



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Л.Й. Дворкін

Заслужений діяч науки і техніки України
професор, доктор технічних наук

ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БЕТОНІВ

(МЕТОДИ, ПРИКЛАДИ, ВПРАВИ)

**КОНДОР**
Київ, 2018



Національний університет
водного господарства
та природокористування

УДК 666.97
Д 24

Рекомендовано вченою радою Національного
університету водного господарства та природокористування
(протокол №4 від 22 червня 2018 р.)

Рецензенти:

Деревянко В.М., доктор техн. наук, професор,
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури
Саницький М.А., доктор технічних наук, професор,
Національний університет "Львівська політехніка";

Дворкін Л.Й.

Д 24 Проектування складів бетонів (Методи, приклади,
вправи): Навчальний посібник/Дворкін Л.Й. – К.: Видавничий дім
«Кондор», 2018. – 613 с.

ISBN

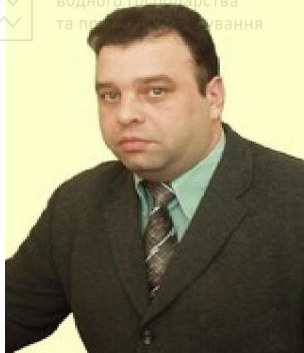
У навчальному посібнику викладено методології проектування складів бетонів різних видів. Розглянуто основні показники будівельно-технічних властивостей бетонів, методи їх визначення і шляхи забезпечення. Наведені загальні положення розрахунково-експериментальних методів проектування складів бетонів з заданими властивостями і алгоритми їх реалізації. Розглянуто комплекс розрахункових залежностей і умови їх застосування при проектуванні складів бетонів. Проаналізовано шляхи оптимізації і забезпечення техніко-економічної ефективності запроектованих складів бетонів. В посібнику наводяться приклади розв'язування різноманітних задач проектування складів бетонів і відповідні вправи.

Посібник призначено для студентів будівельних спеціальностей вищих навчальних закладів. Він також корисний для інженерно-технічних працівників будівельних організацій та підприємств.

ISBN

УДК 666.97

© Дворкін Л.Й., 2018
© Видавничий дім «Кондор», 2018



**Доктор технічних наук,
професор Дворкін О.Л.
1970-2015 рр.**

**Світлій пам'яті професора,
доктора технічних наук
Дворкіна Олега Леонідовича
присвячується**

ПЕРЕДМОВА

Одним з основних розділів бетонознавства є методологія проєктування складів бетонів з заданими властивостями. За останні десятиріччя ця методологія, основи якої були закладені в першій половині ХХ в, отримала суттєвий розвиток завдяки численним теоретичним та експериментальним розробкам, що підтверджені практичним досвідом виробництва бетону, виробів та конструкцій на його основі. Найбільш значний внесок в розвиток методології проєктування складів бетону належить Б.Г. Скрамтаєву, Й. М.Ахвердову, Ю.М. Баженову, В.А. Вонесенському, Г.І. Горчакову, І.М. Грушко, А.Е. Десову, С.А. Миронову, І.А. Риб'єву, В.П. Сизову, В.І.Сорокеру, А.Е. Шейкіну, В.Н. Шмигальському.

Широко відомі також роботи в цьому напрямку Р. Богга, О. Графа, А. Невилля, Ф.Мак-Миллана, Т. Пауерса та ін.

Розвиток методології проєктування складів бетону на сучасному етапі йде по шляху збільшення прогнозуючої здатності розрахункових залежностей показників властивостей бетону, створення банку нових розрахункових залежностей, отриманих як на основі фізичних уявлень про синтез властивостей бетону, так і на базі кібернетичного підходу і математичного моделювання. Ці залежності дозволяють розробляти алгоритми багатопараметричного проєктування складів бетонів різного призначення при нормуванні комплексів необхідних властивостей



і заданих критеріях їх оптимальності. Сучасні інформаційні технології і комп'ютерні програмні комплекси дозволяють реалізувати зазначені алгоритми, в тому числі, і в автоматизованих системах управління технологічними процесами.

Автор протягом багатьох років працює в напрямку розвитку наукових основ проектування складів бетонів різних видів і цій проблемі присвятив ряд монографій, навчальних посібників, практичних рекомендацій. Більшість з них підготовлена у співавторстві з докт. тех. наук., професором Дворкіним О.Л.

Даний посібник відрізняється насиченістю прикладами та вправами, які направлені на розв'язування різноманітних практичних задач, що виникають при проектуванні складів бетонів. Поряд з традиційними методами розрахунків показані великі можливості, які відкриваються при застосуванні експериментально-статистичних моделей для прогнозування властивостей бетонних сумішей і бетонів та визначення їх оптимальних складів.

Сучасна технологія бетону передбачає різноманітні методи регулювання властивостей бетону за рахунок раціонального проектування їх складів. Ці методи також проілюстровані в наведених прикладах.

Особлива увага відводиться в посібнику задачам проектування складів, що забезпечують оптимальним чином комплекс нормованих властивостей бетонних сумішей і бетонів різних видів і вибору ефективних рішень.

Методологія проектування складів бетонів безперервно розвивається і вдосконалюється разом з технологією їх виробництва, а також виробництва виробів і конструкцій на їх основі. Автор сподівається, що даний посібник з часом буде доповнений і відкорегований з урахуванням досягнень в цьому напрямку, зауважень і пропозицій читачів.

Автор висловлює вдячність своїм учням і колегам, які приймали участь разом з ним в наукових розробках, що стосуються проблеми, якої присвячений посібник. Автор також вдячний інженерам Л.І. Ніхаєвій, Л.А. Мацько і Г.В. Киц за технічну допомогу при підготовці книги до видання.



1. СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ. ПОБУДОВА ТА АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Отримання достовірної інформації за результатами лабораторних випробувань і виробничого контролю та прийняття відповідних технологічних рішень потребує широкого застосування статистичних методів.

1.1. Статистичні характеристики. Кореляція та регресія

З деякої можливої сукупності усіх спостережень, або *генеральної сукупності чисел*, в реальному експерименті отримують певну *вибірку* (статистичну сукупність), яка включає n спостережень. Статистичну сукупність чисел, отриманих при значному числі випробувань, можна виразити графічно у вигляді *кривої розподілу*, відклавши по осі абсцис експериментальні дані, а по осі ординат частоту їх повторення.

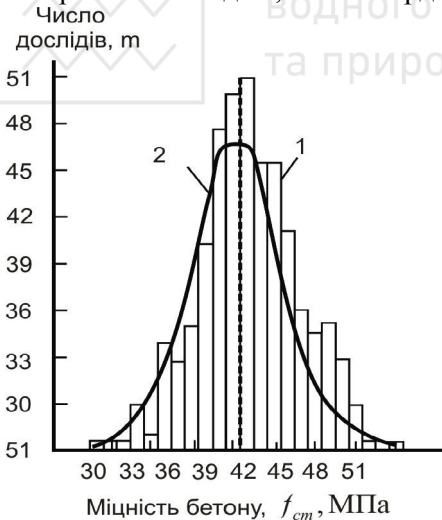


Рис. 1.1. Гістограма (1) та крива нормального розподілу міцності бетону (2)

Для характеристики вибірки значень певного параметра використовують середні

При визначенні властивостей бетону криві розподілу (рис. 1.1) наближаються, як правило, до нормальної кривої Гауса. Ця крива відповідає рівній імовірності появи як додатних, так і від'ємних відхилень від центру. Експериментальні криві розподілу відрізняються від нормальної наявністю *ексцесу* і *асиметрії*, тобто певним зсувом вершини відповідно відносно осей абсцис та ординат.



величини – середнє арифметичне та середнє квадратичне відхилення.

Середнє арифметичне (\bar{x}) характеризує відношення суми всіх зафіксованих значень параметра, що входить у дану сукупність, до кількості його значень.

Середнє квадратичне відхилення (стандарт) S вказує границі мінливості параметра, що визначається, тобто ступінь відхилення окремих його значень щодо середнього.

Величина S^2 характеризує *дисперсію* вимірюваної величини в межах даної вибірки. Якщо об'єм вибірки достатньо великий, величина дисперсії S^2 наближається до величини генеральної дисперсії σ^2 . Згідно теорії ймовірності при нормальному розподілі в межах $\bar{x} \pm 3\sigma$ вкладається 99,7% вимірів, в межах $\bar{x} \pm 2\sigma$ – 95,4% та $\bar{x} \pm \sigma$ – 68,3% (*правило трьох сігм*).

Якщо середнє квадратичне відхилення характеризує абсолютну мінливість параметра, що вивчається, то для вираження відносної мінливості застосовують *коефіцієнт варіації*, рівний відношенню середнього квадратичного відхилення до середнього арифметичного значення параметра, що вимірюється.

Для того, щоб за середнім арифметичним даної обмеженої вибірки судити більш точно про середнє значення вимірюваного показника, визначають *середню похибку t* середнього арифметичного. Відношення величини середньої похибки до величини середнього арифметичного називають *показником точності*.

Для правильного застосування статистичних оцінок потрібно виключити можливі грубі помилки під час експерименту, тобто перевірити однорідність спостережень. Для цього можна використати *максимальне відносне відхилення τ* . Якщо значення максимального відносного відхилення у досліджуваній вибірці більше табличної величини τ при заданій ймовірності або рівні значимості (табл. 1. Дод.Б), то крайнє значення x відкидається як грубо помилкове.



Розрахункові формули для знаходження основних статистичних параметрів, що характеризують експериментальні дані, приведені в табл.1.1.

Таблиця 1.1
Розрахункові формули для визначення статистичних параметрів

№ формули	Статистичний параметр	Розрахункова формула
1.1	Середнє арифметичне	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$ <p>де $\sum_{i=1}^n x_i$ – сума значень параметра у вибірці; n – кількість значень.</p>
1.2	Середнє квадратичне відхилення (стандарт)	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}},$ <p>де $n-1=f$ – кількість ступенів вільності, під якою розуміють кількість членів сукупності, що вільно варіюють.</p>
1.3	Коефіцієнт варіації	$V_c = (S / \bar{x}) \cdot 100\%.$
1.4	Середня похибка	$m = \pm \frac{S}{\sqrt{n}}.$
1.5	Показник точності	$\varepsilon = \pm \frac{m}{\bar{x}} \cdot 100\%.$
1.6	Кількість необхідних спостережень	$n = \frac{V_c t^2}{\varepsilon^2},$ <p>де V_c – коефіцієнт варіації, %; ε – показник точності, %; t – критерій Стьюдента, який визначають при відповідній довірчій ймовірності та кількості ступенів вільності f (табл.2. Дод.Б). В табл. 3.Дод.Б. приведені значення t – критерію при 1% та 5% рівнях значимості.</p>
1.7	Максимальне відносне відхилення	$\tau = \frac{ x - \bar{x} }{S},$



При проведенні експериментально-дослідних робіт часто виникає необхідність у знаходженні кількісної залежності між вимірюваною величиною (вихідний параметр Y) і технологічними факторами (X_i). Така залежність може бути *функціональною* або *кореляційною*. В першому випадку функція і аргументи зв'язані строго і однозначно. Наприклад, при випробуванні міцності зразків певного розміру кожній величині руйнівного навантаження відповідає строго визначена границя міцності матеріалу. При кореляційній залежності одному значенню незалежної перемінної може відповідати деяка сукупність значень вихідного параметру. При лінійній кореляції ступінь цієї залежності виражається *коефіцієнтом кореляції*, який може знаходитися в інтервалі від -1 до $+1$. Чим вища абсолютна величина коефіцієнта, тим тісніший зв'язок і навпаки. Знак коефіцієнту показує характер зв'язку: "+" – прямий, тобто зі збільшенням X зростає Y , а "-" – обернений. Граничні значення коефіцієнта ($\pm 1; 0$) показують, що між змінними існує відповідно строгий лінійний зв'язок або вони лінійно не корельовані.

Таблиця 1.2

Розрахункові формули для визначення коефіцієнтів кореляції, рівнянь регресії та їх статистичних параметрів

№ формули	Статистичний параметр	Розрахункова формула
1.8	Коефіцієнт парної кореляції	$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}$
1.9	Коефіцієнт множинної кореляції	$r_{xyz} = \sqrt{\frac{r_{xy}^2 + r_{xz}^2 - 2r_{xy}r_{xz}r_{yz}}{1 - r_{yz}^2}},$ <p>де r_{xy}, r_{xz} і r_{yz} – парні коефіцієнти кореляції</p>



№ формули	Статистичний параметр	Розрахункова формула
1.10	Значення коефіцієнтів	$\beta = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2},$
1.11	β α	$\alpha = \frac{\sum y_i - \beta \sum x_i}{n} = \bar{y} - \beta \bar{x}$
1.12	Критерій Фішера (F – критерій)	$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2},$ <p>де S_{ad}^2 – залишкова дисперсія (дисперсія адекватності), що характеризує розсіювання експериментальних даних відносно лінії регресії; S_y^2 - дисперсія відтворюваності</p>
1.13	Дисперсія адекватності	$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1},$ <p>де y_i – розрахункове значення залежної змінної; k – кількість незалежних змінних;</p>
1.14	Дисперсія відтворюваності	$S_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}$

Для перевірки гіпотези про наявність або відсутність кореляції необхідно порівняти вибірковий коефіцієнт кореляції



(r) з табличним ($r_{1-p/2}$). Коефіцієнт кореляції буде значимим, якщо задовольняється нерівність $|r| > r_{1-p/2}$. В табл.3, Дод.Б приведені значення $r_{1-p/2}$ для двох рівнів значимості при різній кількості ступенів вільності f .

Коефіцієнт кореляції між двома випадковими величинами називають *коефіцієнтом парної кореляції*. Його знаходять за формулою 1.8, (табл.1.2).

Для виявлення тісного зв'язку між декількома перемінними служить *коефіцієнт множинної кореляції*.

Оцінка залежності параметрів, які вивчаються, за коефіцієнтами кореляції називається *кореляційним аналізом*.

Математичний вираз, що характеризує залежність між середніми значеннями параметру, який вивчається, від параметрів, що на нього впливають, називається *регресією*. В експериментальній практиці знаходять рівняння наближеної регресії. У загальному вигляді задача ставиться так: за даною вибіркою $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$ знайти рівняння наближеної регресії і оцінити допустиму при цьому похибку. Найпростішим видом рівняння регресії є лінійне рівняння:

$$y = \alpha + \beta x . \quad (1.15)$$

Якщо відомий коефіцієнт кореляції r_{xy} , можна коефіцієнт β знайти за формулою:

$$\beta = r_{xy} \frac{S_y}{S_x}, \quad (1.16)$$

де S_y і S_x – середні квадратичні відхилення.

У цьому випадку лінійна регресія прийме вид кореляційного рівняння:

$$y = \bar{y} + r_{xy} \frac{S_y}{S_x} (x - \bar{x}). \quad (1.17)$$



Перевірка адекватності рівняння регресії експериментальним даним проводиться за критерієм Фішера (F-критерієм). Гіпотеза про адекватність рівняння регресії приймається, якщо розрахункове значення F-критерія не перевищує табличного з певною, найчастіше 95%, довірчою ймовірністю (табл. 5. Дод.Б).

Приклади

1.1. Знайти середню активність цементу в партії, її мінливість і точність вимірювань, якщо результати випробувань зразків в МПа наступні: 53,0, 53,7, 54,0, 55,2, 55,9, 56,7. Оцінити однорідність отриманих даних при 5% рівні значимості.

Розрахунок виконуємо за формулами (1.1.-1.7). Результати розрахунку наведено нижче та в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Розрахунок емпіричних характеристик активності цементу

Позна- чення	Номер випробувань						$\sum n = 6$
	1	2	3	4	5	6	
x_i	53,0	53,7	54,0	55,2	55,9	56,7	$\sum x_i = 328,5$
$x_i - \bar{x}$	-1,8	-1,1	-0,8	+0,4	+1,1	+1,9	$\sum (x_i - \bar{x}) = -0,3$
$(x_i - \bar{x})^2$	3,24	1,21	0,64	0,16	1,21	3,61	$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 10,07$

$$\bar{x} = \frac{328,5}{6} = 54,8; S^2 = \frac{10,07}{6-1} = 2,01; S = \sqrt{2,01} = 1,42;$$

$$m = \frac{1,42}{\sqrt{6}} = 0,58; \varepsilon = \frac{0,58}{54,8} \cdot 100 = 1,058\%; V_c = \frac{1,42}{54,8} \cdot 100 = 2,59\%$$

$$\tau_i = \frac{56,7 - 54,8}{1,42} = 1,338;$$

$$\tau_{\text{табл}} = 2,0 (\eta = 6 \rho = 5\%); \tau_i < \tau_{\text{табл.}} \text{ (табл.1. Дод.Б)}$$

Таким чином, з приведеного статистичного аналізу слідує, що середня активність цементу \bar{x} рівна 54,8 МПа, її абсолютна мінливість S – 1,42 МПа, відносна мінливість V_c – 2,59%.



Показник точності ε рівний 1,058%. Усі 6 випробувань однорідні, під час їх проведення грубої помилки не допущено.

1.2. *Визначити кількість зразків, які необхідні для випробування міцності бетону при $V_c=8\%$, довірчої ймовірності 95% і показнику точності 5%.*

Використаємо формулу (1.6). Значення t знайдемо з табл.3, Дод.Б.

$$t_{\text{табл.}} = 1,96(f = \infty); n = \frac{8^2 \cdot 1,96^2}{5^2} = \frac{64 \cdot 3,84}{25} = 9,83.$$

Отже, достатньо при заданих умовах взяти для випробування 10 зразків.

1.3. *Визначити коефіцієнт кореляції між границею міцності при стиску бетону (y , МПа) та витратою цементу (x , кг) при постійному початковому водовмісті бетонної суміші та рівні значимості 5%.*

Дані експериментів та розрахунків зведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Експериментальні та розрахункові дані для визначення коефіцієнта кореляції r_{xy}

№ з/п	x_i	y_i	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})$
1	283	25,6	0	0	-0,4	0,16	0
2	272	24,2	-11	121	-1,8	3,24	19,8
3	269	21,8	-14	196	-4,2	17,64	58,8
4	290	28,4	7	49	2,4	5,76	16,8
5	290	25,6	7	49	-0,4	0,16	-2,8
6	295	30,7	12	144	4,7	22,09	56,4
7	295	29,0	12	144	3,0	9,00	36,0
8	291	26,8	8	64	0,8	0,64	6,4
9	275	23,1	-8	64	-2,9	8,41	23,2
10	270	24,8	-13	169	-1,2	1,44	15,6

$$\sum x = 2830 \quad \sum y = 260,0$$

$$\bar{x} = 283 \quad \bar{y} = 26,0$$

$$\sum = 1000$$

$$\sum = 68,54 \quad \sum = 230,2$$



Коефіцієнт кореляції розраховуємо за формулою (1.8):

$$r_{xy} = \frac{230,2}{\sqrt{1000 \cdot 68,54}} \approx +0,88.$$

Для перевірки гіпотези про наявність кореляції порівнюємо коефіцієнт r_{xy} з табличним $r_{1-p/2}$, встановленим за табл.4, Дод.Б:

$$r_{1-p/2} = 0,602 (f = 10 - 1 = 9; p = 5\%).$$

Задовольняється нерівність $r_{xy} > r_{1-p/2}$, тобто коефіцієнт кореляції значимий.

Отримане значення коефіцієнта кореляції свідчить про те, що характер зв'язку прямий, тобто зі збільшенням витрати цементу границя міцності при стиску бетону зростає.

1.4. За даними прикладу 1.3 знайти лінійне рівняння регресії.

Розрахунки коефіцієнтів регресії β і α виконуємо за формулами (1.10; 1.11). Скористуємося даними табл. 1.4 і

розрахуємо додатково: $\sum_{i=1}^n x_i y_i = 73810,2$; $\sum x_i^2 = 801890$,

$(\sum x_i)^2 = 8008900$.

Отримаємо:

$$\beta = \frac{10 \cdot 73810,2 - 2830 \cdot 260}{10 \cdot 801890 - 8008900} = 0,2302$$

$$\alpha = \frac{260 - 0,2302 \cdot 2830}{10} = -39,146$$

Рівняння регресії має вигляд:

$$y = -39,146 + 0,2302x.$$



Результати розрахунків для визначення F-критерію з метою перевірки адекватності рівняння регресії приведені в табл. 1.5.

Використовуючи формули (1.13, 1.14), визначаємо залишкову дисперсію та дисперсію фактичних значень y_i :

$$S_{\text{зал}}^2 = \frac{15,548}{10-1-1} = 1,9435; \quad S_y^2 = \frac{68,54}{10-1} = 7,615.$$

За формулою (1.12) знайдемо критерій Фішера:

$$F_{\text{розрах}} = \frac{1,9435}{7,615} = 0,255.$$

Таблиця 1.5
Експериментальні та розрахункові дані для визначення F-критерію

№ з/П	x_i	y_i	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	\hat{y}_i	$(y_i - \hat{y}_i)$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
1	283	25,6	-0,4	0,16	26,0	-0,4	0,16
2	272	24,2	-1,8	3,24	23,47	0,73	0,5329
3	269	21,8	-4,2	17,64	22,78	-0,98	0,9604
4	290	28,4	2,4	5,76	27,61	0,79	0,6241
5	290	25,6	-0,4	0,16	27,61	-2,01	4,0401
6	295	30,7	4,7	22,09	28,76	1,94	3,7636
7	295	29,0	3,0	9,0	28,76	0,24	0,0576
8	291	26,8	0,8	0,64	27,84	-1,04	1,0816
9	275	23,1	-2,9	8,41	24,16	-1,06	1,1236
10	270	24,8	-1,2	1,44	23,01	1,79	3,2041

$$n=10 \quad \sum x_i=2830 \quad \sum y_i=260,0$$

$$\sum =68,54$$

$$\sum 15,548$$

$$\bar{x}_i=283 \quad \bar{y}_i=26,0$$

Табличне значення F_m знаходимо за $f_2=10-1-1=8$; $f_1=10-1=9$; $p=5\%$: $F_{\text{табл}}=3,26$. Враховуючи те, що розрахункове значення F-критерію менше табличного при 95% довірчої ймовірності, гіпотезу про адекватність лінійного рівняння можна вважати вірною.



Вправи

1.1. У лабораторії було випробувано на міцність при стиску 10 зразків бетону однієї партії. Вони показали наступні результати: 33,5; 29,4; 31,6; 28,5; 30,1; 34,2; 29,8; 28,7; 30,5; 31,3. Знайти середнє арифметичне значення цієї вибірки і показники однорідності міцності бетону.

1.2. За показниками міцності бетону встановлено, що вони розподіляються на кривій нормального розподілу. Було випробувано 45 зразків. Середнє арифметичне значення міцності бетону на стиск склало 45,5 МПа, середнє квадратичне відхилення – 5,3 МПа. Розрахувати області значень міцності, в яких розташовано більше 60; 90 і 99% вимірів міцності.

1.3. Визначити чи задовольняють 5%-му показнику точності наступні заміри усадки зразків бетону (в мм/м) постійного складу, які тверділи при однакових умовах: 8,3; 7,8; 7,1; 7,5; 8,5; 8,9; 7,1; 6,5.

1.4. При випробуванні бетону в конструкції молотком К.П. Кашкарова було нанесено 10 ударів і по відношенню відбитків на бетоні і еталонному стержні за допомогою градувального графіку визначена міцність бетону на стиск. Значення міцності в МПа виявились наступними: 21,5; 19,4; 23,2; 22,3; 20,8; 24,5; 20,1; 21,7; 24,1. Чи достатню кількість ударів було зроблено, щоб отримані результати були достовірні при 95% довірчої імовірності.

1.5. За умов, викладених у вправі 1.4, перевірити однорідність отриманих результатів при рівні значимості 1%.

1.6. За результатами підборів складів бетону встановили частку піску в суміші піску та щебеню (γ) залежно від витрати цементу (Π) та рухомості за осадкою конусу 2 см. Результати випробувань бетонної суміші наведені нижче:

γ	0.362	0.355	0.343	0.337	0.325	0.310	0.295
Π , кг/м ³	200	250	300	350	400	450	500

При постійних значеннях витрати цементу ($\Pi=300$ кг/м³) і на постійних матеріалах визначили також необхідне значення γ залежно від показника рухомості бетонної суміші – осадки конусу (ОК, см). Отримані результати наведені нижче:



г	0.343	0.361	0.378	0.395	0.410
ОК, см	2	6	10	14	18

Знайти значення коефіцієнтів парної кореляції між г і Ц та між г і ОК, а також значення коефіцієнта множинної кореляції між г, Ц і ОК.

1.7. За умов, що викладені у вправі 1.6, знайти рівняння регресії між г і Ц та між г і ОК.

1.2. Математичне планування експерименту. Експериментально-статистичні моделі

Під *математичним плануванням експерименту* розуміють постановку дослідів за заздалегідь складеною схемою з оптимальними властивостями. Математичне планування дозволяє при мінімально можливій кількості дослідів вирішувати задачу побудови експериментально-статистичних математичних моделей у вигляді рівнянь регресії, які пов'язують вихідні параметри (наприклад, властивості матеріалу або показники, що характеризують певний процес) з вхідними параметрами – різноманітними керованими кількісними факторами, а потім використати ці моделі для аналізу процесів, технологічних розрахунків та оптимізації.

Експеримент планується у відповідності з типовою *матрицею*, тобто таблицею з n рядків та m колонок, в якій приводиться набір комбінацій факторів, варійованих відносно деякого початку координат або нульового (основного) рівня. Допустима область варіювання факторів (*факторний простір*) вибирається на основі попереднього вивчення об'єкту у відповідності з поставленою метою. Для спрощення запису умов експерименту та обробки експериментальних даних верхній рівень факторів кодується +1, нижній –1, а основний відповідає 0. Кодування факторів досягається за допомогою формули:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i_0}}{\Delta \tilde{x}_i}, \quad (1.18)$$

де x_i – кодоване значення фактора;



\tilde{x}_i – натуральне значення фактора,

\tilde{x}_{i_0} – натуральне значення фактора на основному рівні,

$\Delta\tilde{x}_i$ – крок (інтервал) варіювання.

Вид планування залежить від характеру процесів, які вивчаються. Планування на двох рівнях застосовують, якщо можна до дослідів передбачити прямолінійний зв'язок між параметрами, які вивчаються у вибраній області варійованих факторів, а також для визначення напрямку руху в область оптимальних значень вихідних параметрів. Воно дозволяє отримати модель у вигляді поліному першого ступеня, яка містить лінійні члени ($\sum b_i x_i$) та, при необхідності, взаємодії першого порядку ($\sum b_{ij} x_i x_j$). Такий поліном можна представити рівнянням регресії виду:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j, \quad (1.19)$$

де y – розрахункове значення вихідного параметру,

b_0, b_i, b_{ij} – вибіркові коефіцієнти регресії. Величина лінійних коефіцієнтів регресії характеризує ступінь впливу факторів, а знак – його напрямок.

Для побудови лінійних та неповних квадратичних моделей застосовують *повний факторний експеримент* (ПФЕ), в якому передбачені усі можливі комбінації факторів на двох рівнях (планування типу 2^k , де k – число варійованих факторів), (табл.1.6) або частину ПФЕ- *дробову репліку*, одержану діленням ПФЕ зазвичай на число, кратне двом: *напіврепліку* (планування 2^{k-1}); $1/4$ репліки (планування 2^{k-2}) і т.д.



Таблиця 1.6

Матриця ПФЕ ($k=2\dots 4$)

Точки плану, u	Фактори				Вихідний параметр, y_u
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	+1	+1	+1	+1	y_1
2	+1	-1	+1	+1	y_2
3	-1	+1	+1	+1	y_3
4	-1	-1	+1	+1	y_4
5	+1	+1	-1	+1	y_5
6	+1	-1	-1	+1	y_6
7	-1	+1	-1	+1	y_7
8	-1	-1	-1	+1	y_8
9	+1	+1	+1	-1	y_9
10	+1	-1	+1	-1	y_{10}
11	-1	+1	+1	-1	y_{11}
12	-1	-1	+1	-1	y_{12}
13	+1	+1	-1	-1	y_{13}
14	+1	-1	-1	-1	y_{14}
15	-1	+1	-1	-1	y_{15}
16	-1	-1	-1	-1	y_{16}

Зі збільшенням кількості факторів кількість дослідів у матриці ПФЕ зростає за показниковою функцією (2^k). Якщо можливо обмежитися лінійним наближенням або не враховувати деякі взаємодії факторів, доцільне застосування дробових реплік. Наприклад, досліджується вплив трьох факторів і є підстава рахувати, що у вибраній області варіювання процес можна описати лінійною моделлю. Для визначення чотирьох коефіцієнтів регресії (b_0, b_1, b_2 та b_3) достатньо чотирьох дослідів. У матриці ПФЕ 2^2 (табл. 1.7) взаємодію X_1X_2 порівнюємо третьому фактору X_3 і отримаємо матрицю планування 2^{3-1} , яку можна розглядати як напіврепліку від ПФЕ 2^3 .



Таблиця 1.7

Напіврепліка ПФЕ 2^3

№ досліджу	Планування		x_3 (x_1x_2)	y	Кодове позначення рядків
	x_1	x_2			
1	+1	+1	+1	y_1	ab
2	-1	+1	-1	y_2	b
3	+1	-1	-1	y_3	a
4	-1	-1	+1	y_4	(1)

Примітка. При запису матриць планування рівні варіювання факторів часто позначають "+" та "-".

Для технологічного аналізу та відбору суттєвих факторів поряд із перевіркою адекватності рівняння виконується також оцінювання значимості коефіцієнтів регресії. Значимість коефіцієнтів регресії b_i можна оцінити, знайшовши експериментальне значення t-критерію (t_i) та порівнявши його з табличним:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}, \quad (1.20)$$

де S_{b_i} – середнє квадратичне відхилення при визначенні коефіцієнтів регресії.

При вивченні нелінійних залежностей у широкому діапазоні зміни факторів використовують *плани другого порядку*. Для планів другого порядку кожний фактор необхідно планувати не менше ніж на трьох рівнях: верхньому (+1), середньому (0) та нижньому (-1). Плани повних квадратичних залежностей отримують шляхом додавання до ядра (ПФЕ або дробової репліки) додаткових, так званих “зіркових” точок, а в деяких випадках, і “нульових” у відповідності з інтервалом варіювання (табл.6...9, Дод.Б). У практиці експериментальних досліджень в технології бетону найчастіше використовують дво-три-, чотири- та п'ятифакторні плани.



Результати дослідів оброблюють за допомогою методів математичної статистики, отримуючи квадратичні рівняння регресії у загальному вигляді для k факторів:

$$y_i = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j . \quad (1.21)$$

Формули для розрахунків квадратичних моделей наведені в табл. 1.8, 1.9.

Таблиця 1.8

Формули для розрахунків коефіцієнтів математичних моделей

№ формули	Коефіцієнти
Лінійні та неповні квадратичні моделі	
1.22	$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{i_u} y_u}{n},$ <p>де x_{i_u} – кодоване значення фактора x_i у u-му досліді; y_u – значення вихідного параметра у тому ж досліді.</p>
1.23	$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n y_u}{n};$
1.24	$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{i_u} x_{j_u} y_u}{n};$
Квадратичні моделі	
1.25	$b_0 = T_1(O_y) - T_2 \sum_{i=1}^k (iiy)$



№ формули	Коефіцієнти
1.26	$b_i = T_3(iy)$
1.27	$b_{ii} = T_4(iiy) + T_5 \sum_{i=1}^k (iiy) - T_2(O_y)$
1.28	$b_{ij} = T_6(ijy)$ де $T_1...T_6$ – параметри для розрахунку рівнянь регресії (табл. 1.9);
1.29	$O_y = \sum_{u=1}^N y_u$
1.30	$(iy) = \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u$
1.31	$(ijy) = \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u$
1.32	$(iiy) = \sum_{u=1}^N (x_{iu})^2 y_u$, де N – кількість точок плану.

Отримання моделі можна вважати завершеним, а саму модель використовувати для аналізу і прийняття матеріалознавчих і технологічних рішень тільки після того, як алгебраїчний розрахунок оцінок коефіцієнтів буде доповнений статистичним аналізом окремих коефіцієнтів і моделі в цілому.



Таблиця 1.9

Значення параметрів $T_1 \dots T_6$

Число факторів	Тип плану	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
2	Двофакторний	0,2632	0,1579	0,1667	0,5	-0,1053	0,25
3	Трифакторний	0,1832	0,0704	0,1	0,5	-0,1268	0,125
4	B_4	0,2292	0,0625	0,0556	0,5	-0,1042	0,0625
5	Na_5	0,138	0,0303	0,0556	0,5	-0,0909	0,0625

Найбільш легко піддаються аналізу лінійні моделі. Знак при коефіцієнті вказує на характер впливу відповідного фактору: знак "+" свідчить про те, що зі збільшенням значення фактора величина відповідного вихідного параметра збільшується, а знак "-" – про те, що вона спадає. Чим більше значення коефіцієнта, тим сильніший вплив фактора. Якщо необхідно отримати максимальне значення вихідного параметра, значення всіх факторів, коефіцієнти b_i яких мають знак "+", слід приймати максимальними, а значення факторів, коефіцієнти b_i яких мають знак "-" – мінімальними. Абсолютні значення коефіцієнтів рівнянь регресії збільшуються зі збільшенням інтервалів варіювання.

У неповних квадратичних рівняннях регресії знак перед коефіцієнтом лінійного члена відповідає напрямку зміни вихідного параметра за умови, що інші фактори прийняті на основному рівні. Знак "+" перед коефіцієнтом взаємодії свідчить про те, що збільшення вихідного параметра можливе тільки, якщо взаємодіючі фактори перебувають одночасно на верхньому або нижньому рівні, а знак "-" – про те, що один фактор є бажаним на верхньому, а інший – на нижньому рівні.

Якщо прийняти значення всіх факторів (за винятком одного) на основному рівні, квадратичне рівняння можна перетворити у рівняння параболи:

$$\hat{y} = b_0 + b_i x_i + (b_{ii} x_i)^2. \quad (1.33)$$



Приклади

1.5. Отримати математичну модель міцності бетону на стиск у вигляді поліному першого ступеню залежно від цементно-водного відношення (C/V), активності цементу (R_u), модуля крупності ($M_{кр}$) та вмісту відмулюваних домішок у заповнювачі ($Q_{відм}$).

Досліди виконували відповідно до плану ПФЕ 2⁴ (табл. 1.6). Умови планування експерименту наведені в табл. 1.10.

Таблиця 1.10

Умови планування експерименту

Фактори		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
натуральні	кодовані	-1	0	+1	
C/V	x_1	1,4	2,0	2,6	0,6
R_u , МПа	x_2	38,8	45,3	51,8	6,5
$M_{кр}$	x_3	1,4	2,2	3	0,8
$Q_{відм}$, %	x_4	1	3	5	2

Матриця планування дослідів і експериментальні значення міцності бетону наведені в табл. 1.11.

1) Коефіцієнти рівняння регресії визначасмо за формулами (1.22-1.24).

Результати розрахунків b_0 наведені в табл. 1.11, інших коефіцієнтів – в табл. 1.12.



Матриця планування та експериментальні значення
міцності бетону

Точка плану	Фактори				Середнє арифметичне значення міцності, МПа
	x_1	x_2	x_3	x_4	
1	+1	+1	+1	+1	43,6
2	+1	+1	+1	-1	48,7
3	+1	+1	-1	+1	40,9
4	+1	+1	-1	-1	44,4
5	+1	-1	+1	+1	32,2
6	+1	-1	+1	-1	34,8
7	+1	-1	-1	+1	30,4
8	+1	-1	-1	-1	32,3
9	-1	+1	+1	+1	21,2
10	-1	+1	+1	-1	21,8
11	-1	+1	-1	+1	19,6
12	-1	+1	-1	-1	20,3
13	-1	-1	+1	+1	11,9
14	-1	-1	+1	-1	12,6
15	-1	-1	-1	+1	10,4
16	-1	-1	-1	-1	11,1
Сума	-	-	-	-	436,1
					$b_0 = 27,3$

2) Визначаємо статистичні характеристики:

а) дисперсію відтворюваності $S_{\{y\}}^2$ за формулою (1.17) (табл.1.13):

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{30,16}{16(3-1)} = 0,943$$



Таблиця 1.12

Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів									
при лінійних членах				при взаємодіях					
$\bar{y}x_1$	$\bar{y}x_2$	$\bar{y}x_3$	$\bar{y}x_4$	$\bar{y}x_1x_2$	$\bar{y}x_1x_3$	$\bar{y}x_1x_4$	$\bar{y}x_2x_3$	$\bar{y}x_2x_4$	$\bar{y}x_3x_4$
+43,6	+43,6	+43,6	+43,6	+43,6	+43,6	+43,6	+43,6	+43,6	+43,6
+48,7	+48,7	+48,7	-48,7	+48,7	+48,7	-48,7	+48,7	-48,7	-48,7
+40,9	+40,9	-40,9	+40,9	+40,9	-40,9	+40,9	-40,9	+40,9	-40,9
+44,4	+44,4	-44,4	-44,4	+44,4	-44,4	-44,4	-44,4	-44,4	-44,4
+32,2	-32,2	+32,2	+32,2	-32,2	+32,2	+32,2	-32,2	-32,2	+32,2
+34,8	-34,8	+34,8	-34,8	-34,8	+34,8	-34,8	-34,8	+34,8	-34,8
+30,4	-30,4	-30,4	+30,4	-30,4	-30,4	+30,4	+30,4	-30,4	-30,4
+32,3	-32,3	-32,3	-32,3	-32,3	-32,3	-32,3	+32,3	+32,3	+32,3
-21,1	+21,1	+21,1	+21,1	-21,1	-21,1	-21,1	+21,1	+21,1	+21,1
-21,8	+21,8	+21,8	-21,8	-21,8	-21,8	+21,8	+21,8	-21,8	-21,8
-19,6	+19,6	-19,6	+19,6	-19,6	+19,6	-19,6	-19,6	+19,6	+19,6
-20,3	+20,3	-20,3	-20,3	-20,3	+20,3	+20,3	-20,3	-20,3	+20,3
-11,9	-11,9	+11,9	+11,9	+11,9	-11,9	-11,9	-11,9	-11,9	+11,9
-12,6	-12,6	+12,6	-12,6	+12,6	-12,6	+12,6	-12,6	+12,6	-12,6
-10,4	-10,4	-10,4	+10,4	+10,4	+10,4	-10,4	+10,4	-10,4	-10,4
-11,1	-11,1	-11,1	-11,1	+11,1	+11,1	+11,1	+11,1	+11,1	+11,1
$\Sigma=$ +178,5	$\Sigma=$ +84,7	$\Sigma=$ +17,3	$\Sigma=$ -15,9	$\Sigma=$ +11,1	$\Sigma=$ +7,8	$\Sigma=$ -10,3	$\Sigma=$ +2,7	$\Sigma=$ -4,1	$\Sigma=$ -2,3
$b_1=11,2$	$b_2=5,3$	$b_3=1,1$	$b_4=$ -1	$b_{12}=0,9$	$b_{13}=0,5$	$b_{14}=$ -0,6	$b_{23}=$ 0,2	$b_{24}=$ -0,3	$b_{34}=$ -0,1



Таблиця 1.13

Розрахунок дисперсії відтворюваності

Точки плану u	$(y_1 - \bar{y}_u)^2$	$(y_2 - \bar{y}_u)^2$	$(y_3 - \bar{y}_u)^2$	$\sum S_{\{\bar{y}\}}^2$
1	$(44,2-43,6)^2=1,56$	$(43,0-43,6)^2=0,36$	$(42,6-43,6)^2=1$	2,9
2	$(49-48,7)^2=0,09$	$(49,6-48,7)^2=0,81$	$(47,5-48,7)^2=1,44$	2,34
3	$(42,0-40,9)^2=1,21$	$(39,6-40,9)^2=1,69$	$(41,1-40,9)^2=0,04$	2,94
4	$(45,0-44,4)^2=0,36$	$(44,0-44,4)^2=0,16$	$(44,2-44,4)^2=0,04$	0,56
5	$(31,3-32,3)^2=0,81$	$(32,0-32,2)^2=0,04$	$(33,3-32,2)^2=1,21$	2,06
6	$(35,0-34,8)^2=0,04$	$(34,0-34,8)^2=0,64$	$(35,4-34,8)^2=0,36$	1,04
7	$(29,6-30,4)^2=0,64$	$(31,0-30,4)^2=0,36$	$(30,6-30,4)^2=0,04$	1,04
8	$(32,0-32,3)^2=0,09$	$(33,0-32,3)^2=0,49$	$(31,9-32,3)^2=0,16$	0,74
9	$(20,6-21,1)^2=0,25$	$(22,0-21,1)^2=0,81$	$(20,7-21,1)^2=0,16$	1,22
10	$(22,5-21,8)^2=0,49$	$(21,0-21,8)^2=0,64$	$(21,9-21,8)^2=0,01$	1,14
11	$(20,8-19,6)^2=1,44$	$(19,6-19,6)^2=0$	$(18,4-19,6)^2=1,44$	2,88
12	$(21,2-20,3)^2=0,81$	$(19,0-20,3)^2=1,69$	$(20,7-20,3)^2=0,16$	2,66
13	$(12,9-11,9)^2=1$	$(11,0-11,9)^2=0,81$	$(11,8-11,9)^2=0,01$	1,82
14	$(13,7-12,6)^2=1,21$	$(13,0-12,6)^2=0,16$	$(11,1-12,6)^2=2,25$	3,62
15	$(11,0-10,4)^2=0,36$	$(10,4-10,4)^2=0$	$(9,8-10,4)^2=0,36$	0,72
16	$(12,0-11,1)^2=0,81$	$(11,0-11,1)^2=0,01$	$(10,3-11,1)^2=0,64$	1,46

б) середньоквадратичне відхилення $S\{y\}$ за формулою (1.2):

$$S_{\{y\}} = \sqrt{0,943} = 0,97;$$

в) середньоквадратичну помилку $S\{b\}$ при визначенні коефіцієнтів рівнянь регресії за формулою (1.4):

$$S_{\{b_0\}} = S_{\{b_i\}} = S_{\{b_{ij}\}} = \frac{0,97}{\sqrt{16}} = \frac{0,97}{4} = 0,24;$$



г) табличне значення t – критерію при рівні значимості $\alpha=0,05$ ($P = 5\%$) по табл.3, Дод.Б .

Число ступенів вільності f визначаємо за формулою:

$$f = N(r - 1) = 16(3 - 1) = 32, \quad (1.34)$$

де N – число точок плану,

r – число дослідів у кожній точці плану.

Для даного прикладу при $f=32$ табличне значення t -критерію дорівнює 2,016 (табл.3, Дод.Б).

3) Вибираємо з табл. 1.12 найменші коефіцієнти. Розрахункові значення t_p , згідно формули (1.20):

$$t_{34} = \frac{0,1}{0,24} = 0,42; \quad t_{13} = \frac{0,5}{0,24} = 2,08; \quad t_{23} = \frac{0,2}{0,24} = 0,83;$$

$$t_{14} = \frac{0,6}{0,24} = 2,5; \quad t_{24} = \frac{0,3}{0,24} = 1,25.$$

Оскільки $t_{23}, t_{24}, t_{34} < t_{табл.}$, то коефіцієнти b_{23}, b_{24}, b_{34} незначимі (у табл. 1.12 вони підкреслені).

З урахуванням значимості коефіцієнтів математична модель міцності бетону (у кодованому виразі змінних) буде мати вигляд:

$$\hat{y} = 27,3 + 11,2x_1 + 5,3x_2 + 1,1x_3 - x_4 + 0,7x_1x_2 + 0,5x_1x_3 - 0,6x_1x_4.$$

4) Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначаємо розрахункове значення \hat{y} у кожному рядку матриці.

Наприклад, для першого рядка:

$$\hat{y}_{u1} = 27,3 + 11,2(+1) + 5,3(+1) + 1,1(+1) + 0,7(+1)(+1) + 0,5(+1)(+1) - 0,6(+1)(+1) = 44,5 \text{ МПа}$$

Для всіх інших рядків обчислення робимо аналогічно.



Результати вносимо в табл.1.14 і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних від експериментальних значень.

Визначаємо дисперсію адекватності:

$$S_{ad}^2 = \frac{r}{N - m} \sum_{u=1}^N (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2, \quad (1.35)$$

де r – кількість дослідів в рядку матриці;

m – кількість значимих коефіцієнтів у рівнянні;

N – кількість точок плану (u).

Таблиця 1.14

Розрахунок дисперсії адекватності

Точки плану	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	y_u	\bar{y}_u	$(y_u - \bar{y}_u)^2$
1	11,2	5,3	1,1	-1	0,7	0,5	-0,6	0	0	0	44,5	43,6	0,81
2	11,2	5,3	1,1	+1	0,7	0,5	0,6	0	0	0	47,7	48,7	1
3	11,2	5,3	-1,1	-1	0,7	-0,5	-0,6	0	0	0	41,3	40,9	0,16
4	11,2	5,3	-1,1	+1	0,7	-0,5	0,6	0	0	0	44,5	44,4	0,01
5	11,2	-5,3	1,1	-1	-0,7	0,5	-0,6	0	0	0	32,1	32,2	0,09
6	11,2	-5,3	1,1	+1	-0,7	0,5	0,6	0	0	0	35,6	34,8	0,64
7	11,2	-5,3	-1,1	-1	-0,7	0,5	-0,6	0	0	0	29,3	30,4	1,21
8	11,2	-5,3	-1,1	+1	-0,7	0,5	0,6	0	0	0	32,5	32,2	0,04
9	-11,2	5,3	1,1	-1	-0,7	-0,5	0,6	0	0	0	20,9	21,1	0,04
10	-11,2	5,3	1,1	-1	-0,7	-0,5	0,6	0	0	0	20,9	21,1	0,2
11	-11,2	5,3	-1,1	-1	-0,7	0,5	0,6	0	0	0	18,5	19,6	1,1
12	-11,2	5,3	-1,1	+1	-0,7	0,5	-0,6	0	0	0	20,5	20,7	-0,2
13	-11,2	-5,3	1,1	-1	0,7	-0,5	0,6	0	0	0	11,7	11,9	0,2
14	-11,2	-5,3	1,1	+1	0,7	-0,5	-0,6	0	0	0	12,1	12,6	0,5
15	-11,2	-5,3	-1,1	-1	0,7	0,5	0,6	0	0	0	10,5	10,4	0,1
16	-11,2	-5,3	-1,1	+1	0,7	0,5	-0,6	0	0	0	11,3	11,1	-0,2
Сума													5,6

$$S_{ad}^2 = \frac{3 \cdot 5,6}{16 - 8} = 2,1,$$



де 5,6 – сума;

3 – кількість дослідів за рядками матриці;

8 – кількість прийнятих значимих коефіцієнтів (табл. 1.12).

Знаходимо розрахункове значення критерію Фішера за формулою (1.12):

$$F_p = \frac{2,1}{0,943} = 2,13,$$

де 0,943 – значення дисперсії відтворюваності (за формулою 1.14).

Табличне $F_{\text{табл.}}$ шляхом інтерполяції за табл. 5, Дод.Б. при $f_1 = 16(3-1) = 32$ і $f_2 = 16-8 = 8$ складає 2,29.

Оскільки $F_p < F_{\text{табл.}}$, дане рівняння регресії є адекватним.

1.6. Отримати математичну модель міцності бетону на стиск у вигляді поліному другого ступеню залежно від цементно-водного відношення (Ц/В), водовмісту (В), активності цементу (R_u) та вмісту пластифікуючої добавки (Д).

1) Відповідно до поставленої задачі встановлюємо області варіювання зазначених технологічних факторів (табл. 1.15).

Таблиця 1.15

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральні	кодовані	-1	0	+1	
B , кг/м ³	x_1	160	190	220	30
$Ц/В$	x_2	1,5	2,5	3,5	1
R_u , МПа	x_3	39,4	48,75	58,1	9,35
D , % від маси цементу (у перерахунку на суху речовину)	x_4	0	0,25	0,5	0,25

2) Для проведення експериментів приймаємо трирівневий план B_4 (табл. 7, Дод.Б).



Матриця планування, результати експериментів і розрахункові параметри для обчислення коефіцієнтів рівнянь регресії приведені в табл. 1.16.

3) Визначаємо коефіцієнти рівнянь регресії:

Вільний член b_0 обчислюємо за формулою (1.25):

$$b_0 = 0,2292 \cdot 1282 - 0,0625(947,9 + 945,5 + 947,8 + 943,1) = 57,28,$$

де 0,2292 і 0,0625 – параметри T_1 і T_2 з табл. 1.9;

1282 – сума з табл. 1.16;

947,9; 945,5; 947,8 і 943,1 – суми з табл. 1.17.

Коефіцієнти для лінійних членів обчислюємо за формулою (1.26). Наприклад, $b_3 = 0,0556 \cdot 130,4 = 7,24$,

де 130,4 – сума з табл. 1.16;

0,0556 – коефіцієнт із табл. 1.9.

Аналогічно знаходимо значення коефіцієнтів b_1 , b_2 , b_4 ;

Коефіцієнти для квадратичних членів обчислюємо за формулою (1.27). Наприклад,

$$b_{22} = 0,5 \cdot 945,5 - 0,1042(947,9 + 945,5 + 947,8 + 943,1) - 0,0625 \cdot 1282 = -1,66,$$

де 945,5; 947,8; 947,9 і 943,1 – суми з табл. 1.17;

0,5; 0,1042 і 0,0625 – коефіцієнти з табл. 1.9.

Таблиця 1.16

Матриця планування, експериментальні і розрахункові параметри

Точки планування	Фактори				Експериментальні значення y , МПа	Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів при лінійних членах			
	x_1	x_2	x_3	x_4		yx_1	yx_2	yx_3	yx_4
1	+1	+1	+1	+1	78,3	+78,3	+78,3	+78,3	+78,3
2	+1	+1	+1	-1	84,1	+84,1	+84,1	+84,1	-84,1
3	+1	+1	-1	+1	60,8	+60,8	+60,8	-60,8	+60,8
4	+1	+1	-1	-1	65,3	+65,3	+65,3	-65,3	-65,3



продовження табл.1.16

Точки плану и	Фактори				Експериментальні значення у	Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів при лінійних членах			
	x_1	x_2	x_3	x_4		ux_1	ux_2	ux_3	ux_4
5	+1	-1	+1	+1	32,4	+32,4	-32,4	+32,4	+32,4
6	+1	-1	+1	-1	34,6	+34,6	-34,6	+34,6	-34,6
7	+1	-1	-1	+1	22,8	+22,8	-22,8	-22,8	+22,8
8	+1	-1	-1	-1	26,1	+26,1	-26,1	-26,1	-26,1
9	-1	+1	+1	+1	86,2	-86,2	+86,2	+86,2	+86,2
10	-1	+1	+1	-1	89,9	-89,9	+89,9	+89,9	-89,9
11	-1	+1	-1	+1	66,4	-66,4	+66,4	-66,4	+66,4
12	-1	+1	-1	-1	69,7	-69,7	+69,7	-69,7	-69,7
13	-1	-1	+1	+1	33,6	-33,6	-33,6	+33,6	+33,6
14	-1	-1	+1	-1	34,3	-34,3	-34,3	+34,3	-34,3
15	-1	-1	-1	+1	23,8	-23,8	-23,8	-23,8	+23,8
16	-1	-1	-1	-1	25,8	-25,8	-25,8	-25,8	-25,8
17	+1	0	0	0	55,6	+55,6	0	0	0
18	-1	0	0	0	58,2	-58,2	0	0	0
19	0	+1	0	0	77,8	0	+77,8	0	0
20	0	-1	0	0	33,6	0	-33,6	0	0
21	0	0	+1	0	65,7	0	0	+65,7	0
22	0	0	-1	0	48	0	0	-48,	0
23	0	0	0	+1	52,8	0	0	0	+52,8
24	0	0	0	-1	56,2	0	0	0	-56,2
Сума					1282	-27,9	+411,5	+130,4	-28,9
Коефіцієнти					$b_0=57,3$	$b_1=-1,6$	$b_2=22,9$	$b_3=7,2$	$b_4=-1,6$

Аналогічно знаходимо значення коефіцієнтів b_{11} , b_{33} , b_{44} .

Коефіцієнти при взаємодіях обчислюємо за формулою (1.28).

Наприклад,

$$b_{12} = 0,0625 (-22,1) = -1,38,$$

де (-22,1) – сума з табл. 1.17;

0,0625 – коефіцієнт із табл. 1.9.



Так само визначаємо коефіцієнти $b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ (табл. 1.17).

4) Для перевірки значимості коефіцієнтів і наступного визначення адекватності рівняння необхідно знайти дисперсію відтворюваності. З цією метою додатково виконуємо 4 досліди (табл. 1.18), фіксуючи фактори на основному (нульовому) рівні.

Таблиця 1.17
Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів
рівняння регресії

Точки плану	Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів при									
	квадратичних членах				взаємодіях					
u	yx_1^2	yx_2^2	yx_3^2	yx_4^2	yx_1x_2	yx_1x_3	yx_1x_4	yx_2x_3	yx_2x_4	yx_3x_4
1	78,3	78,3	78,3	78,3	+78,3	+78,3	+78,3	+78,3	+78,3	+78,3
2	84,1	84,1	84,1	84,1	+84,1	+84,1	-84,1	+84,1	-84,1	-84,1
3	60,8	60,8	60,8	60,8	+60,8	-60,8	+60,8	-60,8	+60,8	-60,8
4	65,3	65,3	65,3	65,3	+65,3	-65,3	-65,3	-65,3	-65,3	+65,3
5	32,4	32,4	32,4	32,4	-32,4	+32,4	+32,4	-32,4	-32,4	+32,4
6	34,6	34,6	34,6	34,6	-34,6	+34,6	-34,6	+34,6	+34,6	-34,6
7	22,8	22,8	22,8	22,8	-22,8	-22,8	+22,8	+22,8	-22,8	-22,8
8	26,1	26,1	26,1	26,1	-26,1	-26,1	-26,1	+26,1	+26,1	+26,1
9	86,2	86,2	86,2	86,2	-86,2	-86,2	-86,2	+86,2	+86,2	+86,2
10	89,9	89,9	89,9	89,9	-89,9	-89,9	+89,9	+89,9	-89,9	-89,9
11	66,4	66,4	66,4	66,4	-66,4	+66,4	-66,4	-66,4	+66,4	-66,4
12	69,7	69,7	69,7	69,7	-69,7	+69,7	+69,7	-69,7	-69,7	+69,7
13	33,6	33,6	33,6	33,6	+33,6	-33,6	+33,6	-33,6	-33,6	+33,6
14	34,3	34,3	34,3	34,3	+34,3	-34,3	+34,3	-34,3	+34,3	-34,3
15	23,8	23,8	23,8	23,8	+23,8	+23,8	-23,8	+23,8	-23,8	-23,8
16	25,8	25,8	25,8	25,8	+25,8	+25,8	+25,8	+25,8	+25,8	+25,8
17	55,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	58,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	77,8	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	33,6	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	65,7	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	52,8	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	56,2	0	0	0	0	0	0
Сума	947,9	945,5	947,8	943,1	-22,1	-3,9	-6,1	+39,9	-9,1	+0,7
Коефі цієн ти	$b_{11} =$ -0,4	$b_{22} =$ -1,6	$b_{33} =$ -0,4	$b_{44} =$ -2,8	$b_{12} =$ -1,4	$b_{13} =$ -0,3	$b_{14} =$ -0,4	$b_{23} =$ 2,5	$b_{24} =$ -0,6	$b_{34} =$ -0,04



Таблиця 1.18

Результати експериментів і розрахунків у нульових точках

Точки плану u	Фактори				\hat{y}_{ou}	\bar{y}_o	$\hat{y}_{ou} - \bar{y}_o$	$(\hat{y}_{ou} - \bar{y}_o)^2$
	x_1	x_2	x_3	x_4				
1	0	0	0	0	56,1	57,25	-1,14	1,31
2	0	0	0	0	56,45		-0,8	0,64
3	0	0	0	0	58,1		0,85	0,72
4	0	0	0	0	58,35		1,1	1,21
Сума					229	-	-	3,9

Середньоарифметичне значення міцності в МПа за результатами дослідів у нульових точках знаходимо за формулою (1.1):

$$\bar{y}_o = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} y_{oi}}{n_o} = \frac{56,1 + 56,45 + 58,1 + 58,35}{4} = \frac{229}{4} = 57,25$$

Дисперсію відтворюваності $S_{\{\bar{y}_o\}}^2$ у нульових точках розраховуємо за формулою (1.14):

$$S_{\{\bar{y}_o\}}^2 = \frac{(57,25 - 56,10)^2 + (57,25 - 56,45)^2 + (57,25 - 58,1)^2 + (57,25 - 58,35)^2}{(4 - 1)} = \frac{3,9}{3} = 1,3$$

Середньоквадратичне відхилення $S_{\{\bar{y}_o\}}$ знаходимо за формулою (1.2):

$$S_{\{\bar{y}_o\}} = \sqrt{1,3} = 1,14$$

Середньоквадратична помилка $S_{\{b\}}$ при визначенні коефіцієнтів регресії складе:



$$S_{\{b_o\}} = T_7 S_{\{y_u\}} = 0,4787 \cdot 1,14 = 0,55 ;$$

$$S_{\{b_o\}} = T_8 S_{\{y_u\}} = 0,2357 \cdot 1,14 = 0,27 ;$$

$$S_{\{b_o\}} = T_9 S_{\{y_u\}} = 0,6212 \cdot 1,14 = 0,71 ;$$

$$S_{\{b_o\}} = T_{10} S_{\{y_u\}} = 0,25 \cdot 1,14 = 0,29 ,$$

де 0,4787; 0,2357; 0,6212 і 0,25 – приймаємо за табл. 1.19.

Таблиця 1.19

Розрахункові параметри для визначення середньоквадратичних помилок і коефіцієнтів рівнянь регресії другого порядку

Тип плану	К-сть факто рів k	Загальна к-сть точок N	К-сть нульових точок n_{ou}	T_7	T_8	T_9	T_{10}
Ротагабельний	2	13	5	0,4472	0,3536	0,3793	0,5
	3	20	6	0,4078	0,2706	0,2634	0,3536
	4	31	7	0,378	0,2041	0,187	0,25
	5	32	6	0,3989	0,2041	0,1846	0,25
Те ж, на шестикутнику	2	7	1	1	0,5774	1,2247	1,1547
Бокса-Бенкена	3	15	3	0,5774	0,3536	0,5204	0,5
	4	27	3	0,5774	0,2887	0,433	0,5
	5	46	6	0,4082	0,25	0,3385	0,5
Двофакторний трирівневий	2	11	3	0,513	0,4083	0,6282	0,5
Трифакторний трирівневий	3	17	3	0,4279	0,3162	0,6109	0,3536
B_4	4	24	0	0,4787	0,2357	0,6212	0,25
B_5	5	42	0	0,3985	0,1715	0,639	0,1768
Na_5	5	27	1	0,3716	0,2357	0,6396	0,25

Знаходимо t - критерій Стюдента.

Табличне значення t_r – (табл. 2, Дод.Б) при $\alpha=0,05$ і $f_{y_0}^* = 4 - 1 = 3$ дорівнює 3,18.



Розрахункові значення t_p – визначасмо за формулою (1.20), починаючи з найменших за абсолютним значенням коефіцієнтів рівнянь регресії:

$$\begin{aligned}t_1 &= \frac{1,6}{0,27} = 5,92; & t_{13} &= \frac{0,3}{0,29} = 1,03; \\t_{11} &= \frac{0,4}{0,71} = 0,56; & t_{14} &= \frac{0,4}{0,29} = 1,38; \\t_{22} &= \frac{1,6}{0,71} = 2,25; & t_{24} &= \frac{0,6}{0,29} = 2,07; \\t_{44} &= \frac{2,8}{0,71} = 3,94; & t_{12} &= \frac{1,4}{0,29} = 4,83.\end{aligned}$$

Оскільки t_{13}, t_{14}, t_{24} і $t_{34} < t_{табл.}$, то коефіцієнти b_{13}, b_{14}, b_{24} та b_{34} незначимі (у табл. 1.17 вони підкреслені). Квадратичні коефіцієнти b_{11}, b_{22}, b_{33} також незначимі, однак їх не слід видаляти з моделі, тому що всі квадратичні коефіцієнти зв'язані не тільки між собою, але і з вільним членом.

Рівняння регресії міцності бетону має вид:

$$\hat{y} = 57,3 - 1,6x_1 + 22,9x_2 + 7,2x_3 - 1,6x_4 - 0,4x_1^2 - 1,6x_2^2 - 0,4x_3^2 - 2,8x_4^2 - 1,4x_1x_2 + 2,5x_2x_3. \quad (1.36)$$

5) Визначаємо адекватність рівняння регресії.

Для цього знаходимо залишкову суму квадратів відхилень, попередньо обчисливши їх для кожного рядка матриці. Для цього визначаємо розрахункове значення \hat{y} за рівнянням для кожного рядка матриці.

Так, наприклад, для першого рядка отримаємо:

$$\begin{aligned}\hat{y} &= 57,3 - 1,6(+1) + 22,9(+1) + 7,2(+1) - 1,6(+1) - 0,4(+1)^2 - \\&- 1,6(+1)^2 - 0,4(+1)^2 - 2,8(+1)^2 - 1,4(+1)(+1) + 2,5(+1)(+1) = 80,1\end{aligned}$$



Аналогічно проводимо обчислення для всіх рядків матриці.

Визначаємо дисперсію адекватності S_{ad}^2 за формулою (1.13):

$$S_{ad}^2 = \frac{21,9}{24-11} = 1,68,$$

де $21,9 = \sum_1^n (y - \hat{y})^2$;

24 – кількість дослідів;

11 – кількість значимих коефіцієнтів у рівнянні регресії (1.36).

Знаходимо значення F -критерію Фішера.

Розрахункове F_p – визначаємо за формулою (1.12). Для даного прикладу:

$$F_p = \frac{1,68}{1,3} = 1,3,$$

де 1,3 – дисперсія відтворюваності $S_{\{y_o\}}^2$;

1,68 – дисперсія адекватності S_{ad}^2 ;

табличне F_T – знаходимо за табл. 5, Дод.Б

При довірчій імовірності 95%, $f_{y_o} = 4-1=3$ та

$$f_{ad} = 24-11=13, F_{\text{табл}} = 8,7, \left(S_{\{y_o\}}^2 < S_{ad}^2 \right).$$

Так як $F_p < F_{\text{табл}}$, отримане рівняння регресії є адекватним і його можна вважати математичною моделлю міцності бетону для даної області зміни досліджуваних факторів.

1.7. Розрахувати за рівнянням (1.36) значення міцності бетону при зміні фактора x_2 – цементно-водного відношення в межах ± 0.8 (кодований вид) або 1.7...3.3 (натуральний вид) (інтерполяційна задача). Інші фактори прийняті на нульовому рівні: $B=190 \text{ кг/м}^3$, $R_{\text{ц}}=48,75 \text{ МПа}$, $D=0,25\%$.



Рівняння регресії (1.36) прийме вигляд:

$$\hat{y} = 57,3 + 22,9x_2 - 1,6x_2^2 \quad (1.37)$$

Результати розрахунків наведені в табл. 1.20.

Таблиця 1.20

Результати інтерполяції за рівнянням (1.36)

C/V (кодований вид)	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
C/V (натураль- ний вид)	1,7	1,9	2,0	2,1	2,3	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3
f_{cm} , МПа	38,0	43,0	45,5	47,9	52,7	61,8	66,2	68,4	70,5	74,6

1.8. Розрахувати за рівнянням (1.36) значення міцності бетону при зміні фактора x_2 – цементно-водного відношення в межах ± 1.3 (кодований вид) або 1.2...3.8 (натуральний вид) (екстраполяційна задача).

Розв'язання екстраполяційних задач дозволяє прогнозувати значення вихідного параметра за межами області варіювання факторів, наприклад, при $x_j=1,1; 1,2; 1,3$. Однак необхідно мати на увазі, що екстраполяція може бути пов'язана з певними помилками у передбаченні і ці помилки стають більш помітнішими, чим далі вихід за межі області варіювання. Екстраполяція можлива, якщо у дослідника немає сумнівів, що за межами області варіювання факторів характер функції залишається незмінним.

Розв'язок екстраполяційної задачі за рівнянням (1.36) і фіксації інших факторів на нульовому рівні наведений у табл. 1.21.

Таблиця 1.21

Результати екстраполяції за рівнянням (1.37)

C/V (кодований вид)	-1,3	-1,2	-1,1	1,1	1,2	1,3
C/V (натуральний вид)	1,2	1,3	1,4	3,6	3,7	3,8
F_{cm} , МПа	24,8	27,5	30,2	80,6	82,5	84,4



1.9. Побудувати поверхню відгуку, що описує рівняння міцності бетону (1.36) при варіюванні факторів Ц/В (x_2) і R_u (x_3) та значенні інших факторів на основному (нульовому) рівні: $x_1=0$ ($B=190 \text{ л/м}^3$) та $x_4=0$ ($D=0.25\%$) (аналітично-геометрична задача).

При $x_1=0$ та $x_4=0$ рівняння регресії (1.36) набуде вигляду:

$$\hat{y} = 57,3 + 22,9x_2 + 7.2x_3 - 1,6x_2^2 - 0.4x_3^2 + 2.5x_2x_3 \quad (1.38)$$

Для того, аби побудувати поверхню міцності бетону (f_{cm}) у тримірному просторі $f_{cm} - R_u - \text{Ц/В}$ зробимо за рівнянням (1.38) відповідні розрахунки, задаючись значеннями x_2 та x_3 у діапазоні $(-1 \dots +1)$ та визначаючи \hat{y} .

Геометричний образ поверхні відгуку наведено на рис.1.2.

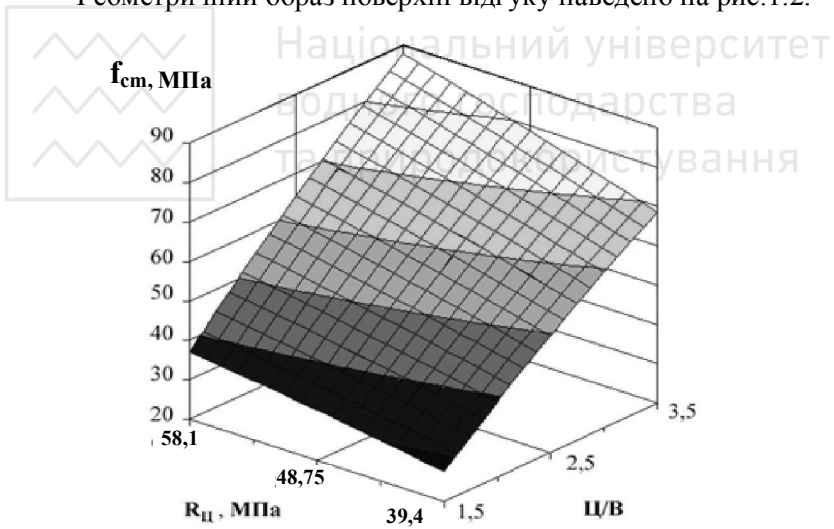


Рис.1 2. Поверхня відгуку міцності, побудована за рівнянням (1.38)

1.10. Визначити значення факторів, які забезпечують мінімально й максимально можливі значення міцності бетону за рівнянням (1.36) (оптимізаційна задача).



Диференціюємо рівняння регресії (1.36) і прирівнюємо часткові похідні до нуля, а також аналізуємо значення вихідного параметру на межі області варіювання факторів.

$$\begin{aligned}\frac{d\hat{y}}{dx_1} &= -1,6 - 0,8x_1 - 1,4x_2 = 0; \\ \frac{d\hat{y}}{dx_2} &= 22,9 - 3,2x_2 - 1,4x_1 + 2,5x_3 = 0;\end{aligned}\tag{1.39}$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_3} = 7,2 - 0,8x_3 + 2,5x_2 = 0; \quad \frac{d\hat{y}}{dx_4} = -1,6 - 5,6x_4 = 0$$

Розв'язавши отриману систему (1.39), наприклад, методом Гауса, отримаємо $x_1=9,94$, $x_2=-6,82$, $x_3=-12,33$, $x_4=-0,29$, тобто точка екстремуму лежить за межами області варіювання. Тому доцільно визначити значення функції на границі області варіювання.

Аналіз рівняння регресії (1.36) дозволяє зробити висновок про те, що його максимум буде досягатися при $x_1=-1$, $x_2=x_3=1$, x_4 – близьке до 0, а мінімум – при $x_1=x_4=1$, $x_2=x_3=-1$. Розрахуємо значення міцності бетону в деяких характерних точках (у загальному випадку потрібен перебір всіх значень на межі області варіювання факторів) (табл. 1.22).

Таблиця 1.22

Результати розрахунку значень міцності бетону у характерних точках

Фактори (кодований вигляд)				Міцність бетону (\hat{y}), МПа
x_1	x_2	x_3	x_4	
-1	1	1	1	86,1
-1	1	1	0	90,5
-1	1	1	-0,29	90,7
-1	1	1	1	86,1
1	-1	-1	-1	25,9
1	-1	-1	0	27,1
1	-1	-1	1	22,7



Найбільше значення міцності, що становить 90,7 МПа, досягається при $x_1=-1$, $x_2=x_3=1$, $x_4=-0,29$, а найменше 22,7 МПа – при $x_1=x_4=1$, $x_2=x_3=-1$.

1.11. За номограмою (рис.1.3), яка побудована за рівнянням (1.36), виконати коректування Ц/В, необхідного для досягнення міцності а) 40 МПа; б) 60 МПа при коливаннях витрати води (В) в межах 160...220 л, активності цементу ($R_{ц}$) 50...65 МПа, витрати добавки ЛСТ (Д) 0...0,4% (задача управління).

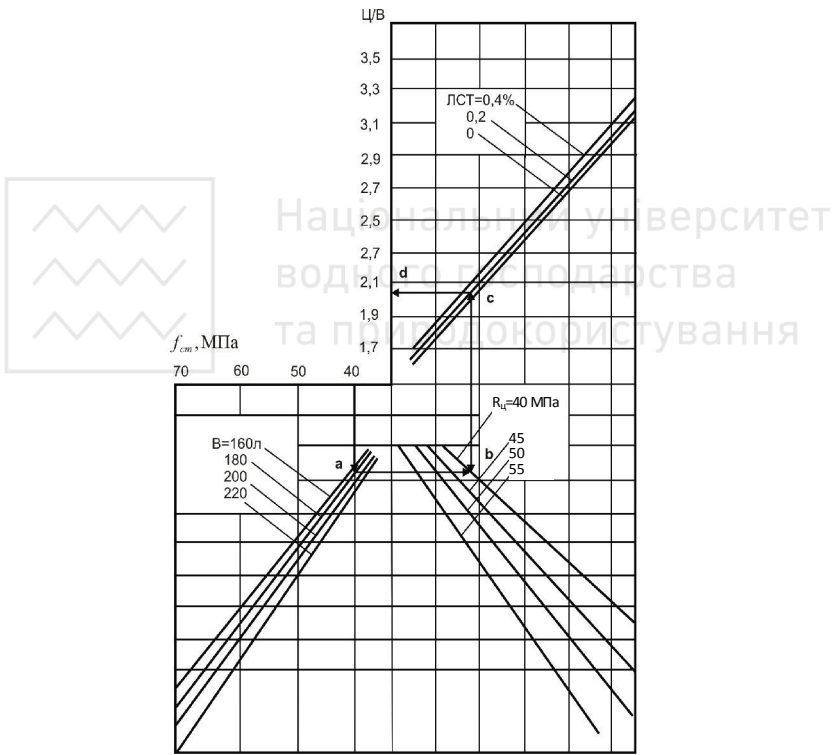


Рис. 1.3. Номограма визначення цементно-водного відношення бетону різної міцності залежно від активності цементу, витрати води і пластифікуючої добавки ЛСТ



Результати розрахунків за номограмою (рис.1.3) наведені в табл.1.23.

Таблиця 1.23

Результати коректування Ц/В за номограмою (рис.1.3)

Міцність бетону, МПа	В л/м ³	R _ц , МПа	Д, %	Ц/В	Міцність бетону, МПа	В л/м ³	R _ц , МПа	Д, %	Ц/В
40	160	50	0	1.96	60	160	40	0	3.01
		60	0,3	1.74			50	0,3	2.60
	180	50	0	2.01		180	40	0	3.14
		60	0,3	1.86			50	0,3	2.68
	200	50	0	2.06		200	40	0	3.21
		60	0,3	1.88			50	0,3	2.78

1.12. Розташувати згідно рівняння (1.36) фактори за ступенем значимості.

Для оцінки ступеню впливу факторів $x_1 \dots x_4$ згідно рівняння (1.36) отримуємо на його основі і проаналізуємо відповідні однофакторні рівняння (табл.1.24) (рис.1.4). Значення факторів, що не враховуються, приймаємо на основному (нульовому) рівні.

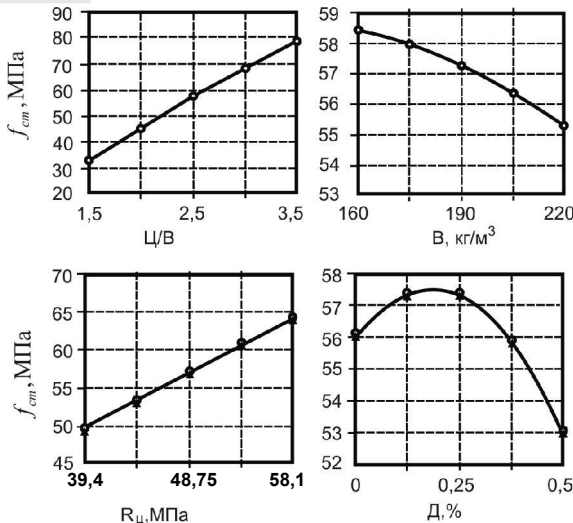


Рис. 1.4. Приклади побудови однофакторних залежностей за рівнянням (1.36)



Таблиця 1.24

Результати розрахунку екстремальних значень \hat{y}
за рівнянням (1.36)

Досліджуваний фактор		Однофакторна модель*	Значення \hat{y} , МПа		$\Delta \hat{y}$
Натуральний	Кодований		мінімальне	максимальне	
В, кг/м ³	x_1	$\hat{y} = 57,3 - 1,6x_1 - 0,4x_1^2$	55,3	58,5	3,2
Ц/В	x_2	$\hat{y} = 57,3 + 22,9x_2 - 1,6x_2^2$	32,8	78,6	45,8
R _ц , МПа	x_3	$y = 57,3 + 7,2x_3 - 0,4x_3^2$	49,7	64,1	14,4
Д, % від маси Ц	x_4	$\hat{y} = 57,3 - 1,6x_4 - 2,8x_4^2$	52,9	57,5	5,4

* - інші фактори прийняті на нульовому рівні.

Аналіз отриманих даних показує, що за ступенем значимості фактори можна розташувати в ряд $x_2 > x_3 > x_4 > x_1$. При цьому збільшення факторів x_2 та x_3 призводить до зростання міцності, а фактора x_1 – до її зменшення. Збільшення фактора x_4 у межах від 0 до 0,18% призводить до росту міцності, подальше збільшення x_4 – до зменшення міцності за інших рівних умов.

Вправи

1.8. Розрахувати із застосуванням результатів повнофакторного експерименту експериментально-статистичні моделі міцності бетону після теплової обробки (y_1) та у 28 діб (y_2), які враховують вплив цементно-водного відношення (x_1), активності цементу $R_{ц}$ (x_2) та тривалості теплової обробки τ . Останню враховуємо через $\lg \tau (x_3)$. Умови планування та результати експериментів наведені в табл. 1.25, 1.26.

Для перевірки значимості коефіцієнтів рівнянь регресії використати значення міцності бетону, отримане за трьома додатково проведеними дослідями:

y_1 : 43,6; 42,5; 42,9 МПа; y_2 : 59,8; 60,2; 59,3 МПа.



Розташувати досліджені фактори за їх впливом на величину міцності бетону. Побудувати графіки впливу Ц/В, $R_{ц}$, τ на міцність бетону та поверхні відгуку отриманих моделей міцності.

Таблиця 1.25

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральні	кодовані	-1	0	+1	
Ц/В	x_1	2,4	2,8	3,2	0,4
$R_{ц}$	x_2	57	62,5	68	5,5
$\lg\tau$	x_3	$\lg 9 = 0,954$	$\lg 12 = 1,079$	$\lg 16 = 1,204$	0,125

Таблиця 1.26

Матриця планування та експериментальні значення міцності бетону

Точки плану	Фактори			Середні значення міцності бетону, МПа	
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2
1	+1	+1	+1	59	76,5
2	+1	+1	-1	48,5	70
3	+1	-1	+1	50	67,5
4	+1	-1	-1	41,5	61
5	-1	+1	+1	41	55
6	-1	+1	-1	35	49,5
7	-1	-1	+1	36	50,5
8	-1	-1	-1	31	44,5

1.9. Розрахувати експериментально-статистичну модель водопотреби золоцементних бетонних сумішей з добавкою поліфункціонального модифікатора (ПФМ), що включає суперпластифікатор С-3 і полівінілацетатну дисперсію. Умови планування експериментів, матриця планування (план B_4) та результати дослідів приведені в табл.1.27 та 1.28.



Таблиця 1.27

Умови планування експериментів

№ з/п	Фактори	Кодоване позначення	Рівні варіювання		
			-1	0	+1
1	Вміст ПФМ, % маси цементу	X_1	0	1.5	3
2	Частка С-3 у складі ПФМ, %	X_2	0	0.5	1.0
3	Водоцементне відношення (В/Ц)	X_3	0.4	0.5	0.6
4	Золоцементне відношення (З/Ц)	X_4	0.1	0.4	0.7

Таблиця 1.28

Матриця планування та результати дослідів з визначення водопотреби золоцементних бетонних сумішей

№ з/п	Кодовані значення факторів				Водопотреба, л/м ³
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	+1	+1	+1	+1	255
2	+1	+1	+1	-1	220
3	+1	+1	-1	+1	250
4	+1	+1	-1	-1	195
5	+1	-1	+1	+1	335
6	+1	-1	+1	-1	310
7	+1	-1	-1	+1	283
8	+1	-1	-1	-1	225
9	-1	+1	+1	+1	275
10	-1	+1	+1	-1	240
11	-1	+1	-1	+1	390
12	-1	+1	-1	-1	351
13	-1	-1	+1	+1	375
14	-1	-1	+1	-1	343
15	-1	-1	-1	+1	385
16	-1	-1	-1	-1	347
17	+1	0	0	0	230
18	-1	0	0	0	260
19	0	+1	0	0	228
20	0	-1	0	0	265
21	0	0	+1	0	220
22	0	0	-1	0	295
23	0	0	0	+1	275
24	0	0	0	-1	235



За допомогою отриманої моделі виконати інтерполяційні та екстраполяційні розрахунки водопотреби бетонної суміші при зміні факторів як в межах, так і поза межами області їх варіювання.

1.10. За умов планування експериментів (табл.1.27), що наведені вище, отримати експериментально-статистичні моделі міцності дрібнозернистих золоцементних бетонів (ДЗБ). Матриця планування та результати експериментів наведені в табл. 1.29.

Таблиця 1.29

Матриця планування та результати експериментів з визначення міцнісних властивостей золоцементних ДЗБ з добавкою ПФМ

№ з/п	Кодовані значення чинників				Границя міцності, МПа	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	при стиску	при згині
1	+1	+1	+1	+1	25.8	4.3
2	+1	+1	+1	-1	24.2	3.8
3	+1	+1	-1	+1	45.3	5.7
4	+1	+1	-1	-1	43.5	5.1
5	+1	-1	+1	+1	22.2	4.8
6	+1	-1	+1	-1	27.4	4.1
7	+1	-1	-1	+1	42.1	6.1
8	+1	-1	-1	-1	44.2	5.9
9	-1	+1	+1	+1	24.3	3.8
10	-1	+1	+1	-1	25.7	3.2
11	-1	+1	-1	+1	44.1	5.8
12	-1	+1	-1	-1	46.2	5.3
13	-1	-1	+1	+1	24.9	3.7
14	-1	-1	+1	-1	21.5	3.4
15	-1	-1	-1	+1	40.5	5.7
16	-1	-1	-1	-1	43.1	5.4
17	+1	0	0	0	33.6	4.7
18	-1	0	0	0	37.5	5.0
19	0	+1	0	0	38.5	5.1
20	0	-1	0	0	36.6	5.6
21	0	0	+1	0	29.5	4.0
22	0	0	-1	0	48.9	6.5
23	0	0	0	+1	31.1	4.7
24	0	0	0	-1	32.0	4.1



Побудувати поверхню відгуку міцності бетону згідно отриманої експериментально-статистичної моделі.

1.11. Розрахувати експериментально-статистичну модель впливу параметрів вібропресування на міцність при стиску дрібнозернистих бетонів.

Умови планування, матриця та результати дослідів приведені в табл. 1.30, 1.31.

Таблиця 1.30

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральні	Кодовані	-1	0	+1	
Витрата цементу (Ц), кг/м ³	X_1	200	400	600	200
Амплітуда вібрування (А), см	X_2	0,35	0,5	0,65	0,15
Тривалість вібрування (Т), с	X_3	5	12,5	20	7,5
Величина привантаження (P_1), МПа	X_4	0,01	0,055	0,1	0,045

Проаналізувати отриману модель і знайти область значень факторів, при яких можливо отримати максимальну міцність.

1.12. За експериментальними даними, наведеними в табл.1.31., розрахувати експериментально-статистичну модель об'єму залишкового повітря для вібропресованого бетону і відповідну номограму. Виконати за номограмою розрахунки впливу параметрів вібропресування на об'єм залишкового повітря, ($V_{з.п.}$).



Таблиця 1.31

Матриця планування та результати експериментів

Кодовані значення факторів				Значення вихідних параметрів	
X_1	X_2	X_3	X_4	$V_{з.п.}, \%$	$f_{cm}, \text{МПа}$
+1	+1	+1	+1	6,06	51,7
+1	+1	+1	-1	13,76	32,2
+1	+1	-1	+1	8,76	39,0
+1	+1	-1	-1	15,65	23,7
+1	-1	+1	+1	8,74	46,3
+1	-1	+1	-1	17,81	24,6
+1	-1	-1	+1	14,96	32,2
+1	-1	-1	-1	23,75	14,8
-1	+1	+1	+1	8,93	19,4
-1	+1	+1	-1	15,95	17,5
-1	+1	-1	+1	12,38	14,1
-1	+1	-1	-1	18,57	16,4
-1	-1	+1	+1	13,48	17,6
-1	-1	+1	-1	22,16	13,5
-1	-1	-1	+1	21	10,9
-1	-1	-1	-1	29,38	11,1
+1	0	0	0	11,51	35,6
-1	0	0	0	15,34	17,5
0	+1	0	0	10,12	25,3
0	-1	0	0	16,14	20
0	0	+1	0	11,76	25,4
0	0	-1	0	16,27	17,8
0	0	0	+1	8,69	29,2
0	0	0	-1	16,15	19,5



2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПОНЕНТІВ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

Для забезпечення необхідних проектних параметрів бетонних сумішей і бетонів важливе значення має врахування якісних показників компонентів бетонних сумішей.

2.1 Цементи

При оцінці цементу як основного компоненту бетонних сумішей важливо враховувати його хіміко-мінералогічний і речовинний склад, а також, основні властивості. Хіміко-мінералогічний склад цементу можна оцінити за даними хімічного та фізико-хімічних методів аналізу.

Для портландцементу та його різновидів визначається у відповідності з ДСТУ БВ.2.7–(185...189):2009 комплекс властивостей, що враховуються при проектуванні складів бетонних сумішей і призначенні технологічних параметрів виготовлення бетону та виробів на їх основі. У цей комплекс входять нормальна густина, строки тужавлення, рівномірність зміни об'єму, водовідділення, міцність на згин та стиск. При необхідності для цементів визначаються спеціальні властивості з урахуванням умов експлуатації конструкцій та споруд: тепловиділення, корозійна стійкість, деформації при твердінні та ін.

До вирішальних властивостей цементів відносяться їх міцність на стиск і згин в задані строки твердіння. З факторів, що впливають на міцність цементу, основними є: мінералогічний та речовинний склад, дисперсність і зерновий склад, умови і термін зберігання, температурно-вологісні умови та тривалість зберігання.

Міцність визначають за стандартних умов на зразках-балочках розмірами 40x40x160 мм, що готують з цементного розчину 1:3 із застосуванням стандартного піску при водоцементному відношенні 0.39. Міцність на згин обчислюють як середнє арифметичне значення трьох, а на стиск – шістьох одиничних результатів, отриманих при випробуванні трьох



зразків-балочок з точністю не менше ніж 0.1 МПа. Якщо одиничне значення з шести результатів відрізняється від середнього арифметичного більше ніж на $\pm 10\%$, його відкидають, а середнє арифметичне значення обчислюють із п'яти результатів, які залишилися. Якщо одиничне значення з п'яти результатів відрізняється від середньоарифметичного більше ніж на $\pm 10\%$, всі результати відкидають і визначення міцності повторюють. Фактична міцність при стиску зразків зі стандартного цементного розчину, що виготовлялись, тверднули та випробовувались за умов і в строки, що установлені стандартом, називається *активністю*.

За речовинним складом (без урахування добавок, що містять сульфат кальцію) цементи поділяють на п'ять типів (табл. 2.1):

тип I – портландцемент;

тип II – портландцемент з мінеральними добавками від 6% до 35%;

тип III – шлакопортландцемент (від 36% до 95% гранульованого доменного шлаку);

тип IV – пуцолановий цемент (від 21% до 55% активних мінеральних добавок, виключаючи доменний гранульований шлак);

тип V – композиційний цемент (від 36% до 80% композиції мінеральних добавок).

Цементи типів II, IV, V поділяють за вмістом компонентів на підтипи А і Б, а типу III – на підтипи А, Б і В (табл. 2.1).

Найближче значення активності в МПа ($\times 10$) до регламентованого ДСТУ БВ.2.7-46:2010 вважається *маркою цементу*. Марки і відповідна міцність цементів на стиск за ДСТУ БВ.2.7-46:2010 наведені в табл.2.2.



Таблиця 2.1

Типи та склад цементів

Тип цементу	Найменування цементу	Умовна позначка цементу	Речовинний склад цементу, у відсотках за масою ¹⁾						
			Основні компоненти						Додаткові компоненти
			Портландцементний клінкер	Гранульований доменний шлак Ш	Пуцоланові матеріали П	Зола-випилення З	Вапняк В		
I	Портландцемент	ПЦ I	95-100	-	-	-	-	0-5	
II	Портландцемент з мінеральними добавками.	ПЦ II/A-Ш	80-94	6-20	-	-	-	0-5	
		ПЦ II/Б-Ш	65-79	21-35	-	-	-	0-5	
	Портландцемент зі шлаком								
	Портландцемент з пуцолановою добавкою	ПЦ II/A-П	80-94	-	6-20	-	-	0-5	
	Портландцемент з зола-випилення	ПЦ II/A-З	80-94	-	-	6-20	-	0-5	
	Портландцемент з вапняком	ПЦ II/A-В	80-94	-	-	-	6-20	0-5	
	Портландцемент композиційний ²⁾	ПЦ II/A-К	80-94	← 6-20 →				0-5	
	ПЦ II/Б-К	65-79	← 21-35 →				0-5		
III	Шлакопортландцемент	ШПЦ III/A	35-64	36-65	-	-	-	0-5	
		ШПЦ III/Б	20-34	66-80	-	-	-	0-5	
		ШПЦ III/В	5-19	81-95	-	-	-	0-5	
IV	Пуцолановий цемент ²⁾	ПЦЦ IV/A	65-79	-	← 21-35 →			0-5	
		ПЦЦ IV/Б	45-64	-	← 36-55 →			0-5	
V	Композиційний цемент ²⁾	КЦ V/A	40-64	18-40	← 10-20 →			0-5	
		КЦ V/Б	20-39	41-60	← 20-40 →			0-5	

¹⁾ Значення у таблиці відносяться до суми основних та додаткових компонентів цементу, що прийнята за 100 %, і не враховують кількість добавок, що містять сульфат кальцію, та технологічні добавки.

²⁾ У портландцементі композиційному, пуцолановому та композиційному цементі основні компоненти (окрім портландцементного клінкеру) мають бути наведені в позначках до цементу.



Таблиця 2.2

Вимоги до міцності цементів

Марка цементу	Міцність на стиск, МПа, не менше, через		
	2 доби	7 діб	28 діб
300	–	15,0	30,0
400	–	20,0	40,0
400P	15	–	40,0
500	15	–	50,0
500P	20	–	50,0

Таблиця 2.3

Граничні значення для одиничних результатів випробувань цементів загальнобудівельного призначення

Найменування показника		Граничні значення для одиничних результатів марки цементу				
		300	400	400P	500	500P
		Рання міцність, МПа, нижнє граничне значення	2 доби	-	-	13,0
	7 діб	13,0	18,0	-	-	-
Стандартна міцність, МПа, нижнє граничне значення	28 діб	28,5	38,0	38,0	47,5	47,5
Початок тужавлення, хв, нижнє граничне значення		50				
Рівномірність зміни об'єму (за методом Ле Шательє), мм верхнє граничне значення		10				
Вміст ангідриду сірчаної кислоти SO ₃ , %, верхнє граничне значення	тип I	4,0			4,5	
	тип II					
	тип IV					
	тип V					
	тип III	4,5				

Відповідно до встановлених марок цементів нормуються нижні граничні значення для одиничних результатів випробувань міцності на стиск, а також тривалості початку тужавлення та верхні граничні значення деформацій, що



характеризують рівномірність зміни об'єму та вміст ангідриду сірчаної кислоти. Останній показує вміст у цементі гіпсу як регулятора строків тужавлення.

Відповідність цементу вимогам нормативного документу підтверджується, якщо дотримуються статистичні критерії відповідності. Нижню (L_n) та верхню (L_b) довірчі границі значення нормованого показника знаходять за умов:

$$L_n \geq D_n; L_n = \bar{x} - KS \quad (2.1)$$

$$L_b \leq D_b; L_b = \bar{x} + KS, \quad (2.2)$$

де D_n і D_b – нижнє та верхнє допустимі значення показника за нормативним документом;

\bar{x} – середнє значення всіх результатів випробувань за контрольний період;

K – константа, яка залежить від допустимого відсотка результатів, що можуть вийти за межі нормативних значень (P_k). Для нижньої границі міцності $P_k=5\%$, верхньої границі стандартної міцності $P_k=10\%$.

Європейські норми визначення активності цементу EN196-1, адаптовані в Україні, мають деякі відмінності у визначенні активності цементу. Зокрема, В/Ц при отриманні розчинової суміші приймається 0,5, дещо відрізняється також фракційність піску.

Таблиця 2.4

Класи міцності цементу

Клас	Міцність на стиск, МПа			
	2 доби, не менше	7 діб, не менше	28 діб	
			не менше	не більше
22,5	-	11	22,5	42,5
32,5		16	32,5	52,5
32,5R	10	-		
42,5	10	-	42,5	62,5
42,5R	20		52,5	-
52,5	20	-		
52,5R	30			



Нормативними характеристиками міцності цементу за EN197-1 є класи (табл. 2.4), які характеризують міцність при стиску в МПа, яку повинен мати цемент у 28-добовому віці при довірчій ймовірності 95%.

Поряд з активністю цементу при нормальному твердінні заводи – постачальники визначають його міцність при пропарюванні. З цією метою зразки після двохгодинного витримування при 20° С піддають тепловологісній обробці при підвищенні температури до 85±5° С, ізотермічній витримці – 4 год. та охолодженні протягом 2 год., розформовують і випробовують через 24 год.

Для цементів загальнобудівельного призначення на основі середніх результатів випробувань при пропарюванні партій цементу даного виду і марки (класу) за попередній місяць або даної партії, що постачається споживачеві, визначають групу за ефективністю пропарювання (табл. 2.5).

Таблиця 2.5
Розподіл цементів загальнобудівельного призначення за ефективністю пропарювання

Група за ефективністю пропарювання	Тип цементу	Міцність при стиску після пропарювання для марок цементу, МПа		
		300	400	500
I	I, II,	>23	>27	>32
	III, IV, V	>21	>25	>30
II	I, II	20...23	24...27	28...32
	III, IV, V	18...21	22...25	26...30
III	I, II	<20	<24	<28
	III, IV, V	<18	<22	<26

Примітка. Для всіх типів цементу загальна тривалість пропарювання прийнята 12...13 год., температура 80° С.

Розроблено ряд прискорених методів визначення активності цементу. Вони базуються в більшості методик на знаходженні емпіричного коефіцієнта переходу від міцності зразків при тепловій обробці до міцності зразків при стандартних умовах у 28-добовому віці. Розроблені також методи, що основані на розробці такого режиму тепловологісної



обробки і способу виготовлення зразків, при яких отримані результати співпадають або близькі до результатів, отриманих при стандартних випробуваннях.

Одним з перших методів прискореного визначення активності цементу був метод ЦНИИПС–2, розроблений І.М.Френкелем. Він передбачає випробування зразків 2х2х2 см з цементного тіста, які після 20 год. витримування у вологому середовищі пропарюють у формах протягом 4 год. Паралельно такі ж зразки твердіють у формах у воді при звичайній температурі. По відношенню добової міцності обох груп зразків встановлюють за графіком перехідний коефіцієнт від прискореного твердіння до нормального.

На практиці отримав поширення метод прискореного визначення активності цементу, розроблений НДІЗБ. Метод включає 2 етапи: підготовчий зі встановленням середнього перехідного коефіцієнту ефективності цементу у пропареному бетоні і основний – прогнозування міцності цементу у віці 28 діб нормального твердіння. Пропарювання зразків бетону здійснюють за прийнятим на даному підприємстві режимом з визначенням їх міцності на стиск через 4 год. після теплової обробки.

Коефіцієнт ефективності цементу при пропарюванні K_{ei} для кожної з випробуваних партій цементу та середній коефіцієнт \bar{K}_e розраховують за формулами:

$$K_{ei} = \frac{R_{\text{ци}}^{28}}{f_{\text{см}}}, \quad (2.3)$$

$$\bar{K}_e = \frac{\sum_{i=1}^n K_{ei}}{n}, \quad (2.4)$$

де $R_{\text{ци}}^{28}$ – активність цементу у віці 28 діб за даними заводу-постачальника або арбітражної лабораторії;

$f_{\text{см}}$ – міцність бетону еталонного складу, виготовленого на даному цементі;

n – кількість випробуваних партій цементу.



Коефіцієнт варіації K_e при пропарюванні V_{K_e} визначають за формулою:

$$V_{K_e} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{ei} - \bar{K}_e)^2}{n}}}{\bar{K}_e} . \quad (2.5)$$

Прогнозовану активність цементу знаходять за формулою:

$$R_{ц}^{28} = f_{cm} \cdot \bar{K}_e . \quad (2.6)$$

Приклади

2.1. На бетонний завод надійшов цемент ПЦ-І, хімічний склад цементу, %: $CaO - 65,5$; $SiO_2 - 22,2$; $Al_2O_3 - 6,4$; $Fe_2O_3 - 3,1$; $MgO - 1,5$; $SO_3 - 0,9$; $Na_2O - 0,9$. Визначити вміст у цементі трикальцієвого силікату C_3S , двокальцієвого силікату C_2S , трикальцієвого алюмінату C_3A , чотирикальцієвого алюмофериту C_4AF , а також сульфату кальцію $CaSO_4$. Встановити до якого виду відноситься за мінеральним складом клінкер, на основі якого отриманий цемент.

Мінералогічний склад цементу, %, можна визначити за формулами, запропонованими В.А.Кіндом:

$$C_3S = 3,8 \cdot SiO_2(3KH - 2), \quad (2.7)$$

$$C_2S = 8,6 \cdot SiO_2(1 - KH), \quad (2.8)$$

де KH – коефіцієнт насичення, що показує відношення кількості оксиду кальцію у клінкері, фактично зв'язаного з кремнеземом, до кількості його, теоретично необхідної для повного зв'язування кремнезему в трикальцієвий силікат.

Коефіцієнт насичення вираховують за спрощеною формулою:



$$KH = \frac{CaO - 1,65 \cdot Al_2O_3 - 0,35 \cdot Fe_2O_3}{2,8 \cdot SiO_2}, \quad (2.9)$$

Формули для розрахунку C_3A і C_4AF вибираються в залежності від значення глиноземистого модуля ГМ, рівного відношенню процентного вмісту Al_2O_3 і Fe_2O_3 .

При $ГМ > 0,64$:

$$C_3A = 2,65 \cdot (Al_2O_3 - 0,64 \cdot Fe_2O_3); \quad C_4AF = 3,04 \cdot Fe_2O_3. \quad (2.10)$$

При $ГМ < 0,64$:

$$C_3A = 1,7 \cdot (Al_2O_3 - 1,57 \cdot Fe_2O_3); \quad C_4AF = 4,77 \cdot Al_2O_3. \quad (2.11)$$

Вміст сульфату кальцію в цементі визначають за формулою

$$CaSO_4 = 1,7 \cdot SO_3. \quad (2.12)$$

За допомогою наведених вище формул розрахуємо мінералогічний склад клінкера за даними хімічного аналізу.

$$ГМ = 6,4 : 3,1 = 2,06;$$

$$C_3A = 2,65 \cdot (6,4 - 0,64 \cdot 3,1) = 11,7\%;$$

$$C_4AF = 3,04 \cdot 3,1 = 9,42\%;$$

$$KH = \frac{65 - 1,65 \cdot 6,4 - 0,35 \cdot 3,1}{2,8 \cdot 22,2} = 0,87,$$

$$C_3S = 3,8 \cdot 22,2 \cdot (3 \cdot 0,87 - 2) = 51,4\%;$$

$$C_2S = 8,6 \cdot 22,2 \cdot (1 - 0,87) = 24,8\%;$$

$$C_3A = 2,65 \cdot (6,4 - 0,64 \cdot 3,1) = 11,7\%.$$

Вміст в цементі $CaSO_4$:

$$CaSO_4 = 1,7 \cdot 0,9 = 1,53\%.$$



За класифікацією, наведеною в табл.2.6, клінкер можна віднести до нормальних (за вмістом основного клінкерного мінералу – аліту).

Таблиця 2.6

Класифікація клінкерів

Клінкер	Приблизний вміст, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Алітовий	Більше 60	Менше 15	—	—
Нормальний (за вмістом аліту)	60 – 37,5	15 – 37,5	—	—
Белітовий	Менше 37,5	Більше 37,5	—	—
Алюмінатний	—	—	Більше 15	Менше 10
Нормальний (за вмістом алюмінату)	—	—	15 – 7	10 – 18
целітовий	—	—	Менше 7	Більше 18

2.2. *Визначити марку цементу, якщо при випробуванні зразків зафіксовані руйнівні навантаження в Н:*

для зразків-призм 40x40x160 мм при випробуванні на згин – 2389, 2475, 2515;

для зразків половинок-призм при випробуванні на стиск – 67200, 70400, 72100, 71500, 69800, 70800.

Міцність при згині у МПа обчислюємо за формулою:

$$R_{32} = \frac{1,5 \cdot F_{32} \cdot l}{b^3}, \quad (2.13)$$

де F_{32} – руйнівне навантаження Н;

l – відстань між підпірними роликками, мм ($l=100$ мм);

b – сторона поперечного перерізу призми, мм ($b=40$ мм).

Міцність при стиску у МПа обчислюємо за формулою:

$$R_y = \frac{F_c}{1000}, \quad (2.14)$$

де F_c – максимальне навантаження в момент руйнування.



Результати випробувань наведені нижче:

№	Міцність на згин, МПа, (F_{3z})	Міцність на стиск, МПа ($R_{ц}$)
1	5,6	42,0
2	5,8	44,0
3	5,9	45,1
4	$\bar{R}_{3z} = 5,8$	44,7
5		43,6
6		44,25

$$\bar{R}_{ц} = 43,9$$

Всі шість одиночні значення міцності на стиск відрізняються від середнього менше ніж на 10%. Враховуючи, що отримані середні значення міцності більші, ніж рекомендовані ДСТУ БВ.2.7-112-2002 мінімальна границя міцності для марки М400 (38 МПа), марку цементу за результатами випробувань можна вважати М400.

2.3. *Визначити якому класу та марці за міцністю відповідає портландцемент. За даними постачальника він повинен відповідати класу 42,5 Н та марці М500.*

Результати випробувань показали, що міцність цементу у віці 2 доби склала 19,5 МПа, 28 діб – 41,2 МПа. Незважаючи на те, що 28-добова міцність цементу менша мінімальної міцності для класу 42,5 Н, він відповідає вимогам ДСТУ за значенням нижньої границі міцності одиночних результатів для цього класу, яка повинна бути не меншою 40 МПа.

Разом з тим цемент не можна вважати таким, що відповідає марці М500, оскільки мінімальна границя міцності зразків для даної марки встановлена 47,5 МПа. Для зразків марки М400 вона може бути 38 МПа (ДСТУ БВ.2.7-112-2002).

Отже даний цемент відповідає вимогам, встановленим для цементу марки М400, класу 42,5 Н.



2.4. *Визначити згідно ДСТУ БВ.2.7–112-2002 нижню довірчу границю міцності портландцементу ПЦ П/А–Ш-400 за результатами приймального контролю.*

Для визначення нижньої довірчої границі міцності L_H у віці 28 діб аналізуємо результати міцності партій цементу, що пройшли приймальний контроль, за строк 6 місяців (табл.2.7).

Таблиця 2.7

Результати випробувань міцності цементу

Номер партії	x_i , МПа	Номер партії	x_i , МПа	Номер партії	x_i , МПа	Номер партії	x_i , МПа
1	42,8	16	42,0	31	42,0	46	44,4
2	41,0	17	43,0	32	40,9	47	42,0
3	42,6	18	43,8	33	42,1	48	40,6
4	44,0	19	42,6	34	43,4	49	43,3
5	39,6	20	41,3	35	42,5	50	42,3
6	42,2	21	41,8	36	42,2	51	42,8
7	43,4	22	42,7	37	44,6	52	41,4
8	43,7	23	42,5	38	44,2	53	39,9
9	42,8	24	43,1	39	41,7	54	42,3
10	42,6	25	42,0	40	42,1	55	42,6
11	42,4	26	41,2	41	42,5	56	42,1
12	42,5	27	42,9	42	39,5	57	44,0
13	43,1	28	41,7	43	42,8	58	41,8
14	42,0	29	41,1	44	42,6	59	43,0
15	41,9	30	43,0	45	43,8	60	43,5

Для цементів загальнобудівельного призначення марки М400 за ДСТУ нормована мінімальна міцність повинна складати не менше 38,0 МПа для одиничних результатів, причому кількість результатів, менших за 40,0 МПа, не повинна перевищувати 5% від загальної кількості партій, прийнятих за квартал або більший контрольний період.

У даному прикладі таких значень три, що складає 5% від загальної кількості партій, тобто критерій відповідності для одиничних результатів задовольняється.

Середнє значення \bar{X} результатів випробувань:

$$\bar{x} = 42,4 \text{ МПа.}$$



Середнє квадратичне відхилення:

$$S = 1,1 \text{ МПа}$$

Нижню довірчу границю L_H значення міцності у віці 28 діб розраховують за формулою (2.1). При $n=60$ $P_k=5\%$, K становить 2,02.

$$L_H = 42,4 - 2,02 \times 1,1 = 40,2 \text{ МПа.}$$

Згідно вимогам статистичного критерія відповідності:

$$L_H \geq D_n \quad 40,2 \text{ МПа} > 40,0 \text{ МПа.}$$

Таким чином, якість цементу ПЦ II/A - III - 400 за показником міцності у віці 28 діб є задовільною.

2.5. Знайти прискореним методом активність цементу. За результатами випробувань за Рекомендаціями НДІЗБ були знайдені коефіцієнти ефективності десяти партій цементу при пропарюванні (табл. 2.8).

Таблиця 2.8

Розрахунок коефіцієнта ефективності цементів при пропарюванні

№ партії	R_c^{np} , МПа	R_c^{28} , МПа	K_e	№ партії	R_c^{np} , МПа	R_c^{28} , МПа	K_e
1	24,8	42,5	1,71	6	26,0	41,8	1,61
2	22,6	43,8	1,94	7	25,2	41,1	1,63
3	25,0	40,7	1,63	8	27,0	40,6	1,50
4	24,6	40,4	1,64	9	26,0	44,0	1,69
5	20,5	39,2	1,57	10	26,0	40,4	1,55

Примітка: R_c^{np} – міцність цементу після пропарювання;

R_c^{28} – міцність цементу після 28 діб твердіння в стандартних умовах.

Середній коефіцієнт ефективності при пропарюванні для випробуваних партій:



$$\bar{K}_e = \frac{16.47}{10} = 1.647.$$

$$V_{K_e} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{ei} - \bar{K}_e)^2}{n-1}} \cdot \frac{100}{\bar{K}_e} = \frac{0,12}{1,647} \cdot 100 = 7,28\%$$

Для бетону нових партій обчислимо активність застосованого цементу (табл. 2.9)

Таблиця 2.9

Прогнозування активності цементу

№ партії	R_c^{np} , МПа	R_c^{28} , МПа
11	26,0	$26,0 \times 1,647 = 42,8$
12	22,0	$22,0 \times 1,647 = 36,2$
13	24,5	$24,5 \times 1,647 = 40,3$
14	26,1	$26,1 \times 1,647 = 45,16$
15	25,0	$25,0 \times 1,647 = 41,2$
16	24,1	$24,1 \times 1,647 = 39,7$
17	27,0	$27,0 \times 1,647 = 44,5$

Вправи

2.1. На бетонний завод надійшов портландцемент I – го типу. Хімічний склад цементу, %: CaO – 61,3; SiO₂ – 23,9; Al₂O₃ – 4,5; Fe₂O₃ – 4,2; MgO – 3,7; SO₃ – 2,1.

Розрахувати мінералогічний склад цементу і дати прогноз його властивостям і раціональної області застосування.

2.2. Портландцемент з незмінним мінералогічним складом при питомій поверхні 270 м²/кг має активність 41,5 МПа, 310 м²/кг – 46,2 МПа, 355 м²/кг – 50,5 МПа, 383 м²/кг – 54,8 МПа. Знайти коефіцієнт кореляції, що зв'язує активність



цементу і його питомою поверхню, а також відповідне рівняння регресії.

2.3. Розрахувати експериментально-статистичну модель активності цементу ($R_{ц}$, МПа) залежно від його питомої поверхні ($S_{пит}$, m^2/kg) і вмісту доменного гранульованого шлаку (Шл., %). При зміні $S_{пит}$ (x_1) в межах 270...360 m^2/kg і Шл (x_2) – 0...50% були реалізовані експерименти за трирівневим планом.

Матриця планування і результати експериментів наведені нижче:

матриця планування		активність
X_1	X_2	$R_{ц}$, МПа
+1	+1	51,3
+1	-1	57,5
-1	+1	37,6
-1	-1	44,8
+1	0	47,7
-1	0	42,5
0	+1	46,6
0	-1	48,2
0	0	45,2
0	0	44,3
0	0	46,1

2.4. При випробуванні зразків половинок призм для трьох цементів зафіксовані максимальні руйнівні навантаження наведені нижче:

цементи	руйнівні навантаження, Н
1	58500; 56600; 59400; 55800; 57300; 57800
2	71400; 69700; 72200; 70700; 73100; 67800
3	82000; 84500; 81100; 80800; 83200; 83200

Визначити марки цементів.

2.5. На завод надійшли два цементи, які в документах про якість були зазначені як цементи класу 42.5 Н, але у одного (цемент №1) з них була вказана марка М400, а у другого (цемент №2) М500. Результати випробувань показали, що міцність на стиск цементу №1 в 2 доби склала 15 МПа, а в 28 діб – 48 МПа,



а цементу №2 відповідно 12 МПа та 44 МПа. Встановити клас та марки цементів.

2.6. За контрольний період було виконано 55 випробувань цементу з очікуваною маркою М400 на міцність при стиску у віці 28 діб. Середнє значення всіх результатів випробувань – 43,5 МПа. Середнє квадратичне відхилення результатів випробувань – 5.2 МПа. Визначити нижню та верхню довірчі границі значення міцності цементу на стиск і зробити висновок щодо відповідності якості цементу за показником 28-добової міцності.

Допустимий відсоток результатів, що можуть вийти за межі нормативних значень (P_k) для нижньої границі – 5% і верхньої границі – 10%. Кількість значень міцності менше 40 МПа у сукупності отриманих результатів – 2.

2.7. Визначити нижню довірчу границю показника початку тужавлення портландцементу марки 500 при допустимому відсотку результатів, що можуть вийти за межі нормативних значень $P_k=5\%$, якщо за результатами приймально-здавальних випробувань цементу за контрольний період було виконано 30 випробувань. Середнє значення часу початку тужавлення становить $\bar{x} = 95$ хв. Середнє квадратичне відхилення складає 10,5 хв. Для всіх одиничних результатів випробувань початок тужавлення перевищує 50 хв.

2.8. Протягом контрольного періоду завод проводив поряд з визначенням марки цементів також визначення згідно ДСТУ БВ.2.7-187 їх міцності після пропарювання. Було проведено випробувань 25 партій цементу. Їх результати наведені нижче:

Цементи	Середнє значення міцності після пропарювання, МПа, для марок		Середнє квадратичне відхилення міцності після пропарювання, МПа, для марок	
	400	500	400	500
Портландцемент	23	27	1,5	1,2
Шлакопортландцемент	25	29	1,6	1,4



Визначити значення коефіцієнтів варіації для міцності цементів після пропарювання та розподілити їх за групами ефективності.

2.9. Знайти прискореним методом активність портландцементу за методикою НДІЗБ. Для розрахунку коефіцієнта ефективності цементу при пропарюванні були проаналізовані результати випробувань 13 партій цементу. Результати випробувань наведені нижче:

Партії	Міцність, МПа	
	після пропарювання R_c^{np}	після 28 діб стандартного твердіння R_c^{28}
1	30,8	53,5
2	32,8	55,1
3	29,7	51,4
4	29,5	52,3
5	29,0	49,6
6	30,6	50,5
7	27,4	48,8
8	29,2	53,1
9	30,0	50,5
10	28,8	49,9
11	28,4	48,9
12	31,1	51,4
13	32,8	54,2

Розрахувати стандартну активність цементу, використовуючи знайдений середній коефіцієнт ефективності і експериментальні значення міцності цементу після пропарювання, МПа: 29,5; 32,6; 35,1; 27,3; 30,6; 31,5.

2.2. Заповнювачі бетону

Найважливішою складовою частиною бетону, як композиційного матеріалу, що займає до 80% його об'єму, є заповнювачі. Формуючи каркас бетону, заповнювачі активно впливають на його властивості, знижуючи напруження від



усадки, збільшуючи модуль пружності і зменшуючи повзучість, впливаючи на густину та інші властивості.

Основними класифікаційними ознаками заповнювачів бетону є: розмір та форма зерен, насипна густина, пористість зерен, походження та методи одержання, призначення (табл.2.10). Щільні заповнювачі бетону представлені неорганічними матеріалами, а пористі бувають як неорганічні, так і органічні. До останніх відносять відходи заготівлі та переробки деревини й інших матеріалів рослинного походження, а також пластмас, гуми та ін.

Таблиця 2.10

Класифікація заповнювачів бетону

Класифікаційний показник	Вид заповнювачів	Характеристика класифікаційного показника
Розмір зерен	дрібний крупний	≤ 5 мм > 5 мм
Форма зерен	гравій щебінь	зерна окатаної форми зерна гострокутної форми
Насипна густина (ρ_0)	важкі легкі	$\rho_n > 1100$ кг/м ³ $\rho_n \leq 1100$ кг/м ³
Пористість (П)	щільні пористі	$P \leq 10\%$ $P > 10\%$
Походження і методи одержання	природні	Добуваються з природних родовищ
	подрібнені	Одержують подрібненням гірських порід
	штучні	Одержують із природної сировини або відходів промисловості за допомогою спеціальних технологій
Призначення	для важких, легких, жаростійких, кислотостійких, гідротехнічних, радіаційностійких та інших бетонів	Властивості заповнювачів повинні відповідати властивостям бетонів



Технологія природних заповнювачів передбачає подрібнення і сортування гірських порід при одержанні щебеню або сортування гравійно-піщаної суміші при видобуванні гравію та піску. Щебінь одержують також подрібненням гравію або відходів промисловості – металургійних шлаків, відходів збагачення та ін.

Піски розрізняють: природні, подрібнені, звичайні, збагачені і фракціоновані, з відсівів подрібнення гірських порід. Піски разом зі щебенем одержують також із відходів збагачення та інших промислових відходів.

Штучні пористі заповнювачі одержують різними способами, що можуть включати подрібнення пористих матеріалів, випал природних матеріалів із случуванням, поризацію розплаву та ін.

Дрібний заповнювач. Для бетонів різних видів найбільш поширеним дрібним заповнювачем служать щільний природний пісок та пісок з відсівів подрібнення з середньою густиною зерен $2,0 \dots 2,8 \text{ г/см}^3$, насипна густина щільного піску повинна бути не меншою 1100 кг/м^3 . В якості дрібного заповнювача важких бетонів застосовують також пісок з доменних та інших видів металургійних шлаків та золошлакові суміші. Для легких бетонів застосовують пористі піски природного та штучного походження.

Якість піску визначається, в основному, його крупністю, зерновим складом, вмістом пиловидних, глинистих, органічних часток та інших шкідливих домішок, міцністю (для дроблених пісків).

Для пористих пісків одним з визначальних якісних показників є насипна густина, залежно від якої встановлюють відповідні марки.

Дрібні так, як і крупні заповнювачі та інші види будівельних матеріалів залежно від сумарної питомої радіоактивності природних радіонуклідів ($A_{\text{сум}}$) поділяються на класи. Для всіх видів бетонів заповнювачі з $A_{\text{сум}}$ не більше 370 Бк/кг (I клас) можуть застосовуватись без обмежень, $A_{\text{сум}}=370 \dots 740 \text{ Бк/кг}$ (II клас) – для промислового та цивільного будівництва у межах території населених пунктів і зон



перспективної забудови, $A_{\text{сум}}=740\dots1350$ Бк/кг (III клас) – для дорожнього будівництва за межами населених пунктів.

Дрібний заповнювач бетонів повинен відповідати технічним умовам ДСТУ БВ.2.7–32–95 та ДСТУ БВ.2.7–232:2010.

Щільний природний пісок повинен мати густину зерен від $2,0 \text{ г/см}^3$ до $2,8 \text{ г/см}^3$.

Інтегральною характеристикою крупності, що широко застосовують для оцінки якості піску як заповнювача бетонів, є *модуль крупності*:

$$M_k = \frac{\sum A}{100}, \quad (2.15)$$

де $\sum A$ – сума повних залишків на контрольних ситах, %:

$$\sum A = A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}. \quad (2.16)$$

Повні залишки на кожному із сит (A) знаходять, сумуючи часткові залишки на даному ситі і ситах із більш крупними отворами (рис. 2.1).

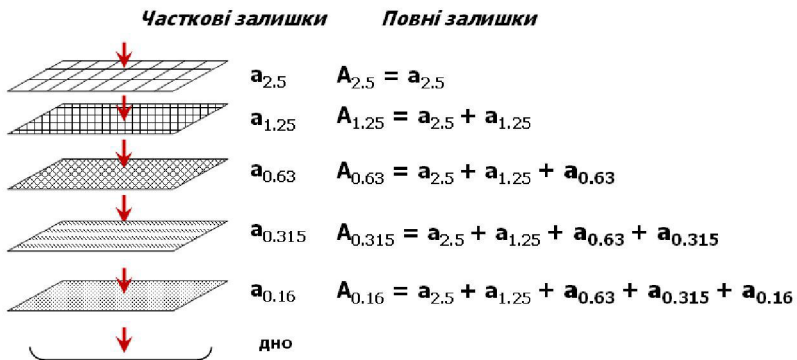


Рис. 2.1. Часткові та повні залишки на стандартних ситах



Як дрібний заповнювач для бетонів можуть використовуватись піски з модулем крупності (M_k) від 1,0 до 4,0. Доцільність використання пісків з M_k 1,0...1,5, а також з M_k 3,25...4,0 визначається після проведення технологічних випробувань і техніко-економічного обґрунтування.

Модуль крупності піску характеризує площу над інтегральною кривою просіювання (рис.2.2). Недоліком цього показника є те, що він неоднозначно характеризує зерновий склад: одному і тому ж значенню M_k можуть відповідати різні криві просіювання (рис.2.2). Для обмеження області можливого варіювання кривих просіювання при оцінці якості піску разом з модулем крупності вказують додатково повний залишок на ситі №063.

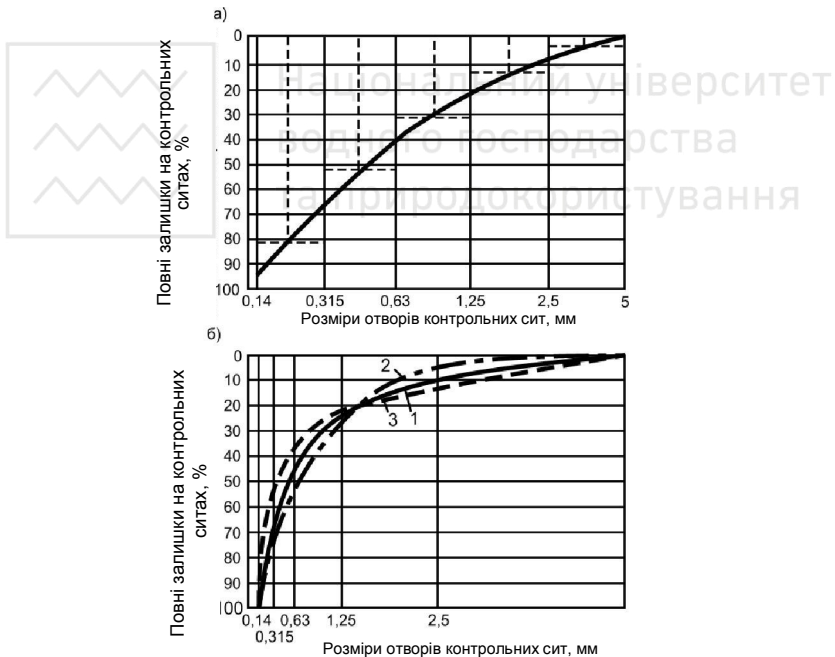


Рис. 2.2. Інтегральні криві просіювання піску:
а – в напівлогарифмічній системі координат; б– варіанти кривих просіювання (1–3) пісків з однаковим модулем крупності



Залежно від модуля крупності і повного залишку на ситі №063 піски, що застосовують для бетонів, поділяють на групи (табл. 2.11).

Таблиця 2.11

Групи пісків за крупністю

Група пісків	Модуль крупності, M_k	Повний залишок на ситі № 063, % за масою
Дуже крупний	$>3,5$	>75
Підвищеної крупності	$3 \dots 3,5$	$65 \dots 75$
Крупний	$2,5 \dots 3,0$	$45 \dots 65$
Середньої крупності	$2,0 \dots 2,5$	$30 \dots 45$
Дрібний	$1,5 \dots 2,0$	$10 \dots 30$
Дуже дрібний	$1,0 \dots 1,5$	до 10

Комплексну оцінку якості піску, як дрібного заповнювача для бетону, дає показник *водопотреби піску* V_p . Його визначають для цементно-піщаного розчину складу 1:2 за масою з таким вмістом води в суміші, при якому забезпечується консистенція розчину, аналогічна консистенції цементного тіста нормальної густоти. Для піску середньої крупності $V_p=7 \dots 7,5\%$.

З підвищенням значення модуля крупності та, відповідно, зменшенням водопотреби піску, як правило, зменшується водопотреба бетонних сумішей і необхідна витрата цементу. При цьому варто враховувати поряд із M_k і пустотність піску, обумовлену його зерновим складом.

Рекомендований зерновий склад піску для бетонів наведений на рис. 2.3.

Наявність у піску зерен розміром від 5,0 до 10,0 мм не повинна перевищувати у відсотках за масою: у рядовому піску – 10; у піску з відсівів подрібнення – 15; у збагачених пісках – 10. Вміст у піску зерен, що проходять крізь сито №016, не повинен перевищувати 15% (у піску з відсівів – 10%).

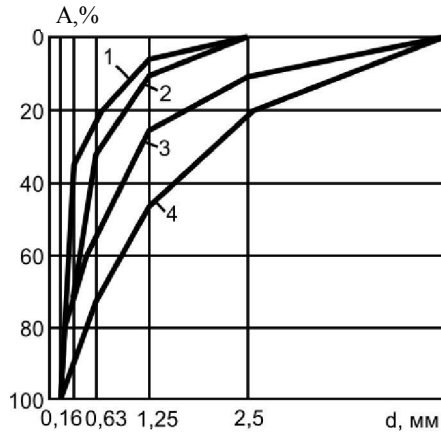


Рис. 2.3. Зерновий склад піску для бетонів:

1,2 – нижня границя крупності, що допускається ($M_k=1,5$) і рекомендується ($M_k=2$); 3,4 – верхня границя крупності, що рекомендується ($M_k=2,5$) і допускається ($M_k=2,25$);

A – повний залишок на ситах розміром d

Питому поверхню пісків (m^2/kg) можна розрахувати за формулою О.С. Ладинського:

$$S = \frac{6,35K}{1000} (0,5a + b + 2v + 4z + 8d + 16e + 36ж), \quad (2.17)$$

де K – коефіцієнт, що залежить від виду піску (для крупного піску $K=2$, дрібного – $K=1,3$),

a, б, в, г, д, е, ж – часткові залишки на ситах від 5 до 0,16 мм (їх можна знайти за різницею повних залишків на суміжних ситах).

Піски з покращеним зерновим складом (збагачені піски) одержують із застосуванням спеціального збагачувального устаткування, їх поділяють на крупні і середні.

Фракціоновані піски (природний і подрібнений) випускають у вигляді фракцій, що поставляються роздільно, із поділом за граничним зерном, що відповідає розмірам контрольних сит.



Вміст пиловидних та глинистих часток у пісках підвищеної крупності, крупних та середніх допускається до 2%, дрібних та дуже дрібних – до 5%, у т.ч. глини у грудках відповідно до 0,25 та 0,5%. Для бетонів транспортних споруд, гідротехнічних споруд із змінним рівнем води, напірних труб максимально допустимий вміст пиловидних та глинистих часток – 2%, у тому числі глини у грудках – 0,25%, а для ніздрюватих бетонів, бетону підводної та внутрішньої зони гідротехнічних споруд відповідно 5 і 0,5%.

До шкідливих домішок у піску відносяться органічні включення (при стандартному випробуванні забарвлення розчину має бути світлішим за колір еталону), аморфні різновиди діоксиду кремнію, що розчиняються у лугах (не більше 50 моль/л), сірка, сульфіді та сульфати (не більше 1%, для піриту – 4% у перерахунку на SO_3), слюда – не більше 2%, вугілля – 1% за масою. Обмежується також вміст інших шкідливих домішок, які визначають залежно від умов експлуатації споруд.

Насипна густина пористих пісків для конструкційно-теплоізоляційних бетонів повинна знаходитись у межах 200...1000 $кг/м^3$. Для конструкційних бетонів насипна густина піску повинна бути не меншою 600 $кг/м^3$ для бетону класів 12,5...20 і не меншою 800 $кг/м^3$ для бетонів класів 25 і вище. Залежно від класів бетонів за міцністю рекомендується вибирати пісок із міцністю при здавлюванні у циліндрі не менше вказаної в табл. 2.12.

Таблиця 2.12

Міцність піску при здавлюванні у циліндрі

Клас бетону за міцністю на стиск	Міцність піску при здавлюванні у циліндрі, МПа, не менше			
	керамзитового	керамзитового і шунгізитового, перлітового	шлакопемзового	аглопоритового
15	2,5	1,2	1,0	0,8
25	4,5	2,2	1,2	1,0
30	6,5	3,3	1,4	1,2
40	8,0	4,0	1,8	1,4



Крупні заповнювачі. До крупних заповнювачів бетонів відносять сипучі матеріали розміром понад 5 до 80 мм включно. Їх підрозділяють на два класи: щільні – з середньою густиною понад $2,0 \text{ г/см}^3$ і пористі – з густиною зерен до $2,0 \text{ г/см}^3$ включно.

Як крупні заповнювачі для важких бетонів застосовують щебінь, який отримують подрібненням природного каменю та гравій – матеріал з окатаних зерен крупністю 3...70 мм, що утворився в результаті природного руйнування гірських порід. Застосовують також щебінь з гравію та вскришних порід та відходів підприємств з переробки руд із середньою густиною зерен вище $2,0 \text{ г/см}^3$. Згідно технічних умов, викладених в ДСТУ БВ.2.7-75-98, якість цих матеріалів визначається їх зерновим складом, формою зерен, міцністю, стираністю, вмістом зерен слабких порід, пиловидних та глинистих частинок, шкідливих домішок, морозостійкістю, радіаційною активністю.

Щебінь та гравій випускають у вигляді окремих фракцій 5...10, 10...20, 20...40, 40...80 (70) мм, їх сумішей, а також нефракційованих продуктів. Повні залишки на контрольних ситах при розсіві фракцій щебеню та гравію повинні відповідати вимогам, наведеним у табл. 2.13, де d і D найменші та найбільші номінальні розміри зерен.

Таблиця 2.13

Вимоги до зернового складу фракцій щебеню та гравію

Діаметр отворів контрольних сит, мм	d	$0,5(d+D)$	D	$1,25D$
Повні залишки на ситах, у відсотках за масою	Понад 90 до 100 вкл.	Понад 30 до 80 вкл.	До 10 вкл.	До 0,5 вкл.

Як і для піску, інтегральним показником крупності щебеню є його водопотреба, яку розраховують за формулою:

$$B_{ц} = \frac{(B/Ц)_{б} - (B/Ц)_{р}}{3,5}, \quad (2.18)$$

де $(B/Ц)_{б}$ – $B/Ц$ бетонної суміші, при якій досягається та ж рухомість, яку має розчинова частина;



(В/Ц)_p – В/Ц розчину складу 1:2, при якому він має розплив конуса 170 мм.

Залежно від вмісту зерен пластинчастої (лещадної) та гілчастої форми щебінь поділяють на 5 груп:

1 – до 10, 2 – 10...15, 3 – 15...25, 4 – 25...35, 5 – 35...50% за масою.

Міцність щебеню та гравію характеризують маркою за дробимістю при стиску (роздавлюванням) у циліндрі (табл.2.14)

Таблиця 2.14

Марки за дробимістю щебеню

Породи	Марки	Втрати маси, %		Породи	Марки	Втрати маси, %	
		для інтрузивних порід	для ефузивних порід			у сухому стані	у насиченому водою стані
Вивержені	1400	До 12	До 9	Осадові і метаморфічні	1200	До 11	До 11
	1200	12...16	9...11		1000	11...13	11...13
	1000	16...20	11...13		800	13...15	13...15
	800	20...25	13...15		600	15...19	15...20
	600	25...34	15...20		400	19...24	20...28
					300	24...28	28...38
			200	28...35	38...54		

Залежно від марки щебеню та гравію за дробимістю нормується вміст зерен слабких порід. До слабких відносяться породи з границею міцності в насиченому водою стані до 20 МПа. Зокрема, для матеріалів марок 1000...1400 він обмежується не більше 5, 400...800 – 10 і 300 – не більше 15%.

Для щебеню та гравію встановлені також марки за стиранистю (табл. 2.15).



Марки щебеню та гравію за стиранистю

Марка за стиранистю щебеню та гравію	Втрата маси при випробуванні	
	щебеню	гравію
Ст1	До 25 включно	До 20 включно
Ст2	Понад 25 до 35	Понад 20 до 30
Ст3	Понад 35 до 45	Понад 30 до 40
Ст4	Понад 45 до 60	Понад 40

За морозостійкістю щебінь і гравій поділяють на марки F15...F400 з втратою маси після випробувань для марок F15, F25 не більше 10%, більш високих марок – 5%.

Важливим показником якості щебеню та гравію є вміст пиловидних та глинистих частинок, який залежно від виду породи і марки за дробимістю обмежується від 1 до 3%, а вміст глини в грудках від 0,25 до 0,5%.

До шкідливих домішок у щебені та гравії відносяться також слюда, азбест, органічні речовини. Корозію бетону викликають мінерали, що містять аморфний діоксид кремнію, сульфіді і сульфати, а корозію арматури – галогеновмісні та водорозчинні сірчані включення. Вміст їх також обмежується Державним стандартом.

Пористі заповнювачі розділяють на природні та штучні, а також заповнювачі з відходів промисловості. Домінуюче положення займають штучні заповнювачі (керамзитовий гравій, аглопорит, шлакова пемза, перліт та ін.).

Крупний заповнювач для легкого бетону підбирається за густиною та міцністю. Залежно від виду дрібного заповнювача, міцності бетону на стиск і його марки за середньою густиною встановлюється максимальна марка крупного заповнювача за насипною густиною і міцністю (табл. 2.16, 2.17, 2.18).



Таблиця 2.16

Максимальні марки гравійних пористих заповнювачів за
наσιпною густиною для конструкційно-теплоізоляційних
бетонів

Клас бетону за міцніс- тю на стиск	Марка бетону за сред- ньою густи- ною	Максимальна марка гравійного крупного заповнювача за наσιпною густиною залежно від виду піску				
		подріб- нений із гравію або зола ТЕС	природ- ний пористий або гранульо- ваний шлак	спучений перлітовий марок 200, 250 за насипною густиною	без піску (пори- зова- ний)	щіль- ний
3,5	D700	-	-	400	350	-
	D800	350	-	500	450	-
	D900	500	350	550	550	300
	D1000	600	500	600	600	500
	D1100	-	600	-	-	600
5	D800	300	-	400	350	-
	D900	450	300	500	500	-
	D1000	550	500	600	600	450
	D1100	600	600	-	-	550
	D1200	-	-	-	-	600
7,5	D800	-	-	350	-	-
	D900	400	-	450	400	-
	D1000	500	350	550	500	-
	D1100	550	500	600	600	450
	D1200	600	600	-	-	550
	D1300	-	-	-	-	600



Таблиця 2.17

Максимальні марки крупних заповнювачів за насипною
густиною для конструкційних бетонів

Клас бетону за міцністю на стиск	Марка бетону за середньою густиною	Максимальна марка крупного заповнювача за насипною густиною			
		гравію		щебеню	
		пісок щільний	пісок пористий	пісок щільний	пісок пористий
10...20	D1200	-	500	-	-
	D1300	-	600	-	400
	D1400	500	700	-	500
	D1500	600	800	400	600
	D1600	700	-	500	700
	D1700	800	-	600	800
	D1800	900	-	700	900
25...40	D1400	-	600	-	-
	D1500	-	700	-	-
	D1600	600	800	-	-
	D1700	700	-	-	700
	D1800	800	-	600	800
	D1900	900	-	700	900
	D2000	-	-	800	1000

Структура пористих щебеню та гравію повинна бути стійкою проти силікатного розпаду і при відповідному випробуванні вони не повинні втрачати більше 5% маси.

Таблиця 2.18

Марки крупних пористих заповнювачів за міцністю

Клас бетону за міцністю на стиск	Марка заповнювача за міцністю	Клас бетону за міцністю на стиск	Марка заповнювача за міцністю
3,5	П 25	20	П 150
5	П 35	22,5	П 200
7,5	П 50	25	П 250
10	П 75	30	П 300
12,5	П 100	35	П 350
15	П 125	40	П 400

Примітка. Крупний заповнювач відносять до тієї чи іншої марки за результатами випробувань в циліндрі.



Приклади

2.6. На завод залізобетонних виробів, що виготовляє напірні труби, надійшли два види пісків: річний дрібний – № 1 і гірський крупний – № 2. Зерновий склад пісків за даними ситового аналізу не задовольняє вимогам, встановленим для бетону напірних труб (табл. 2.19).

Визначити значення модуля крупності пісків, що надійшли на завод, їх питому поверхню і пустотність та можливе співвідношення при змішуванні, що дозволяє отримати зерновий склад, який відповідає рекомендованому. Дійсна густина (ρ) піску №1 – 2,62 г/см³, №2 – 2,65 г/см³, насипна густина (ρ_0) – 1,55 і 1,45 г/см³.

При обчисленні за формулою (2.15) значення модуля крупності M_k для пісків:



$$\begin{aligned} \text{№1} - M_k &= \frac{0 + 5 + 17 + 28 + 75}{100} = 1,35 \\ \text{№2} - M_k &= \frac{32 + 60 + 85 + 95 + 100}{100} = 3,7 \end{aligned}$$

Питома поверхня за формулою (2.17) для пісків

$$\text{№1} \quad S = \frac{6,35 \cdot 1,3}{1000} (0,5 \cdot 0 + 0 + 2,5 + 4 \cdot 12 + 8 \cdot 11 + 16 \cdot 57 + 36 \cdot 15) = 131 \text{ м}^2 / \text{кг}$$

$$\text{№2} \quad S = \frac{6,35 \cdot 2}{1000} (0,5 \cdot 5 + 27 + 2 \cdot 28 + 4 \cdot 25 + 8 \cdot 10 + 16 \cdot 5) = 4,39 \text{ м}^2 / \text{кг}$$

Пустотність пісків розраховуємо за формулою:

$$П = \left(\frac{\rho - \rho_n}{\rho} \right) \cdot 100\% . \quad (2.19)$$

$$\text{Для піску №1} \quad П = \left(\frac{2,62 - 1,55}{2,62} \right) \cdot 100 = 40,8\% .$$



$$\text{Для піску №2 } \Pi = \left(\frac{2,65 - 1,45}{2,65} \right) \cdot 100 = 45,2\%.$$

Для того, щоб при змішуванні пісків № 1 і № 2 з повними залишками на контрольному ситі A_1 і A_2 та отримати пісок № 3 з повним залишком A_3 , необхідно виконати умову:

$$100A_3 = A_1x + A_2(100 - x),$$

де x – вміст піску №1 у змішаному піску;
 $(100-x)$ – вміст піску № 2 у змішаному піску.

Звідси
$$x = \frac{A_2 - A_3}{A_2 - A_1} \cdot 100, \%$$

Щоб отримати на ситі з розміром отворів, наприклад, 0,63 мм необхідний повний залишок $A_3=60\%$ необхідне значення

$$x = \frac{85 - 60}{85 - 17} \cdot 100 = 36,8\%.$$

Знайдемо зерновий склад змішаного піску при $x=36,8\%$ і $100-x=63,2\%$. Як слідує з табл. 2.19 він знаходиться в межах, рекомендованих для бетону напірних труб.

Таблиця 2.19

Зерновий склад пісків

Пісок	Повні залишки, % на ситах з отворами, мм					M_k
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
Рекомендований для напірних труб	10...20	25...45	50...70	70...90	95...100	2,5...3,25
№ 1	0	5	17	28	85	1,35
№ 2	32	60	85	95	100	3,7
Змішаний	20,48	40,2	60,52	7,88	94,6	2,87



2.7. *За результатами випробувань гранітного щебеню фракції 5...20 мм, що наведені нижче, зробити висновок, чи відповідає він вимогам ДСТУ БВ.2.7–75–96.*

1. Повні залишки на ситах, % за масою з діаметрами отворів: 5 мм – 93; 12,5 мм – 45; 20 мм – 15; 22,5 мм – 1,5.
2. Вміст зерен лещадної та голчастої форми – 8%.
3. Втрати маси при випробуванні на дробимість – 18%.
4. Вміст зерен слабких порід – 4%.
5. Марка за морозостійкістю – F300.
6. Вміст пилюватих і глинистих частинок – 3,1%.
7. Вміст глини в грудках – 0,25%.
8. Шкідливі домішки та сполуки – відсутні.
9. Сумарна питома активність природних радіонуклідів – 390 Бк/кг⁻¹.

Аналіз наведених експериментальних даних та співставлення їх з показниками, нормованими ДСТУ БВ.2.7–75–96, дає підстави вважати, що щебінь, проба якого була випробувана, не задовольняє вимогам за зерновим складом, оскільки за отриманими даними вміст зерен більше 20 мм перевищує допустиму межу. Крім того щебінь містить більшу кількість пилюватих та глинистих часток, ніж передбачено для заповнювачів з вивержених порід. Сумарна питома активність природних радіонуклідів дозволяє віднести щебінь до другого класу, який дозволяється застосовувати для дорожнього будівництва і при зведенні виробничих будівель та споруд.

2.8. *Визначити вплив зернового складу наповнювача (часток менше 0,315 мм) на міцність вібропресованого бетону при стиску (f_{cm}).*

Дослідження проводили з використанням симплекс-решітчастого плану Шеффе «суміш-властивість» для побудови поліноміальної моделі неповного третього порядку. Наповнювач був розділений на три фракції: v_1 – 0,315...0,16 мм; v_2 – 0,16...0,08 мм; v_3 – <0,08 мм. Результати експериментів наведені в табл.2.20.

Склад бетону: $C=300$ кг/м³; Z (заповнювач) =1750 кг/м³; $B/C=0,52...0,55$. Вміст наповнювача – 40% від маси



заповнювача. Параметри вібропресування: тиск – 0,1 МПа, амплітуда – 0,5 мм, частота – 50 Гц, тривалість – 15 с.

Таблиця 2.20

Вплив зернового складу наповнювача на міцність
вібропресованого бетону

Точки плану	Зерновий склад наповнювача			y_n	f_{cm} , МПа
	v_1	v_2	v_3		
1	1	0	0	y_1	28,9
2	0	1	0	y_2	36,9
3	0	0	1	y_3	39,2
4	0,5	0,5	0	y_{12}	32,9
5	0,5	0	0,5	y_{13}	36,4
6	0	0,5	0,5	y_{23}	37,1
7	0,333	0,333	0,333	y_{123}	36,0

1. Використовуючи експериментальні дані розрахуємо коефіцієнти полінома неповного третього порядку за формулами:

$$\begin{aligned} b_1 &= 28,9; \\ b_2 &= 36,9; \\ b_3 &= 39,2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{12} &= 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2 = 4 \cdot 32,9 - 2 \cdot 28,9 - 2 \cdot 36,9 = 0; \\ b_{13} &= 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3 = 4 \cdot 36,4 - 2 \cdot 28,9 - 2 \cdot 39,2 = 9,4; \\ b_{23} &= 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3 = 4 \cdot 37,1 - 2 \cdot 36,9 - 2 \cdot 39,2 = -3,8; \\ b_{123} &= 27y_{123} - 12(y_1 + y_{13} + y_{23}) + 3(y_1 + y_2 + y_3) = 27 \cdot 36,0 - \\ &12(28,9 + 36,4 + 37,1) + 3(28,9 + 36,9 + 39,2) = 10,2. \end{aligned} \quad (2.20)$$

У результаті розрахунку отримуємо рівняння регресії:

$$f_{cm} = 28,9v_1 + 36,9v_2 + 39,2v_3 + 9,4v_1v_3 - 3,8v_2v_3 + 10,2v_1v_2v_3 \quad (2.21)$$

Перевірку адекватності отриманого рівняння проводимо за допомогою реалізації експерименту в додаткових точках.



На основі рівняння будемо поверхню відгуку «зерновий склад-міцність» (рис. 2.4.) та ізолінії міцності бетону на сумішевому трикутнику (рис. 2.5).

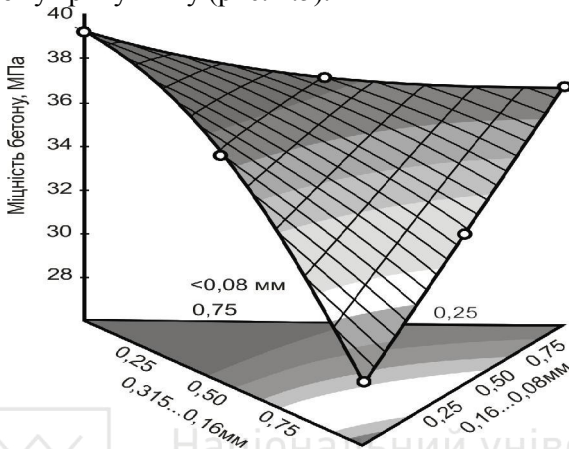


Рис.2.4. Поверхня відгуку міцності при стиску вібропресованого бетону (f_{cm} , МПа)

$V_2 (0,16 \dots 0,08 \text{ мм})$

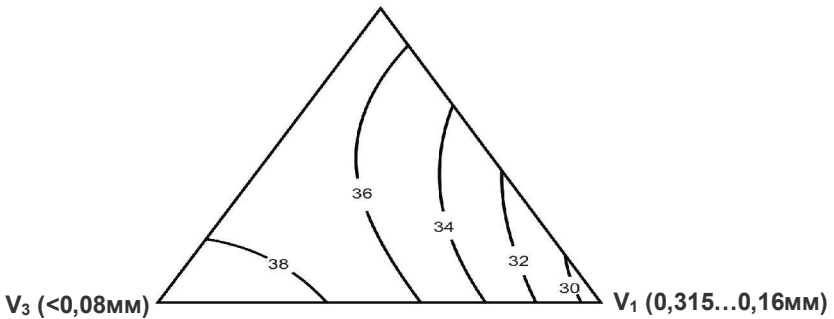


Рис. 2.5. Ізолінії міцності при стиску вібропресованого бетону (f_{cm} , МПа) залежно від зернового складу наповнювача

Аналіз рис. 2.5 показує, що зростання міцності вібропресованого бетону спостерігається зі збільшенням вмісту фракції $<0,08 \text{ мм}$ разом із фракцією $0,16 \dots 0,08 \text{ мм}$ у наповнювачі.



2.9. Проаналізувати вплив водопотреби піску та щебеню на водопотребу бетонної суміші.

За допомогою математичного планування експериментів отримана поліноміальна математична модель водопотреби бетонної суміші (В):

$$B = 1860 + 289x_1 + 103x_2 + 215x_3 + 141x_4 + 9,1x_5 - 2,7x_1^2 + 6,8x_2^2 + 11,3x_3^2 + 7,8x_4^2 + 5,3x_5^2 + 1,6x_1x_4 + 2,1x_1x_5 + 2,1x_3x_4 - 2,4x_3x_5 \quad (2.22)$$

Фактори, які враховані в моделі, та умови їх планування наведені в табл. 2.21.

Таблиця 2.21

Умови планування експериментів при отриманні моделі водопотреби бетонної суміші

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
натуральні	кодовані	-1	0	+1	варіювання
Умовний показник легкоукладальності бетонної суміші*	X ₁	2,0	1,0	0,0	1,0
Цементно-водне відношення	X ₂	1,3	2,1	2,9	0,8
Водопотреба щебеню, %	X ₃	1,0	3,0	5,0	2
Водопотреба піску, %	X ₄	4,0	9,0	14,0	5
Нормальна густина цементу, %	X ₅	24,6	27,2	29,8	2,6

* Умовний показник легкоукладальності 0(нуль) відповідає жорсткості бетонної суміші 40 с; 1 – ОК=5 см; 2 – ОК=13 см.

В результаті аналізу моделі (2.22) побудована номограма (рис. 2.6), яка дозволяє залежно від водопотреби піску та щебеню розраховувати водопотребу бетонної суміші певної легкоукладальності.



Водопотреба бетонної суміші, $\text{кг}/\text{м}^3$

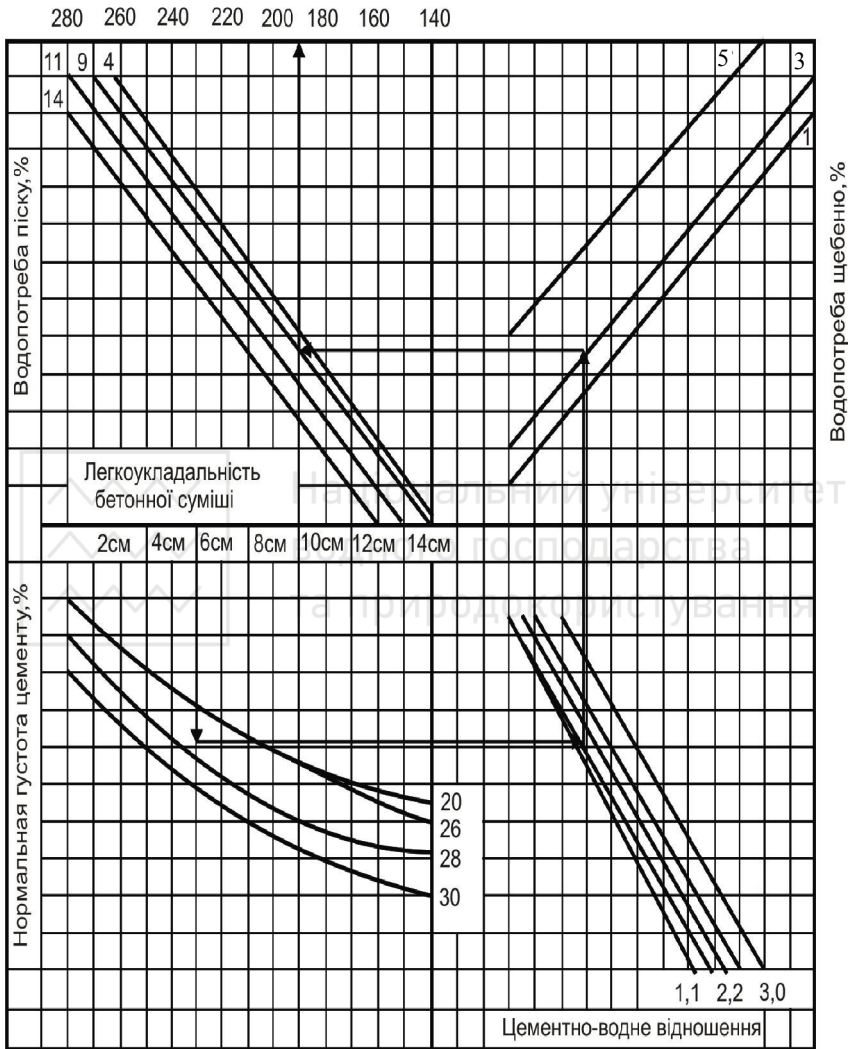


Рис. 2.6. Номограма визначення водопотреби бетонної суміші



2.10. Встановити співвідношення міцності на стиск зерен різних видів пористих заповнювачів та їх насипної густини.

Основні показники густини та міцності окремих видів пористих заповнювачів наведені в табл.2.22.

Таблиця 2.22

Густина та міцність пористих заповнювачів

Заповнювач	Насипна густина, кг/м^3 ρ_n	Границя міцності на стиск, МПа $R_{ст}$	$\frac{R_{ст}}{\rho_n} \cdot 10^{-2}$
Щебінь із пемзи	400...600	1...3,5	0,25...0,58
туфів	700...800	5,0...10	0,71...1,25
черепашників	700...800	1,0...2,5	0,14...0,31
Шлакова пемза	400...600	2,5...10	0,35...0,6
	700...800	5,0...20	0,71...2,5
Керамзитовий гравій	300...400	2,5...10	0,83...2,5
	500...700	5,0...20	1,0...2,8
Щебінь із шлаків і зол	600...1000	2,5...10	0,41...1,0

Аналіз отриманих результатів показує, що для кожного з випробуваних заповнювачів з підвищенням насипної густини міцність зростає. У загальному виді залежність між міцністю та густиною можна виразити степеневою формулою $R_{ст} = A\rho_n^n$, коефіцієнти А і n залежать від особливостей структури, характерної для кожного з видів пористого заповнювача.

2.11. Визначити можливість розрахункового прогнозування міцності керамзитового гравію залежно від густини його зерен.

Для прогнозування міцності керамзитового гравію застосовуємо формулу, запропоновану С.М. Іцковичем:

$$R_x = 15\rho_z^2, \quad (2.23)$$

де ρ_z – густина зерен керамзитового гравію, г/см^3 .



Експериментальні та розрахункові дані наведені в табл.2.23.

Таблиця 2.23

Міцність керамзитового гравію залежно від насипної густини

Марка за насипною густиною	Марка за міцністю	Густина зерен г/см ³	Міцність, МПа		Відхилення міцності $\frac{R_k^p - R_k^e}{R_k^e} \cdot 100\%$
			експериментальна R_k^e	розрахункова R_k^p	
450	П100	0,85	11,5	10,8	5,8
500	П125	0,93	14,3	12,9	9,79
550	П150	1,02	17,3	15,6	9,82
600	П150	1,05	18,8	16,5	12,23
700	П200	1,16	22,5	20,18	10,3
800	П250	1,31	28,3	25,7	9,19

Аналіз отриманих даних свідчить, що розрахунок за формулою дає задовільний прогноз міцності керамзитового гравію для різних марок за насипною густиною.

Вправи

2.10. Визначити модуль крупності, питому поверхню і пустотність річкових пісків, результати просіювання яких і значення густини наведені нижче(табл. 2.24).

Таблиця 2.24

Характеристика пісків

Пісок	Часткові залишки, % за масою, на ситах						Пройшло через сито 0,16 мм, % за масою	Дійсна густина, г/см ³	Насипна густина, кг/м ³	Густина в ущільненому стані, кг/м ³
	5,0	2,05	1,25	0,63	0,315	0,16				
№1	0	7,3	16,4	35,5	24,6	15,1	1,1	2,67	1550	1800
№2	0	1,1	15,5	14,1	31,7	35,5	12,1	2,65	1510	2000
№3	5	3,5	34,1	45,5	4,7	9,5	0,7	2,56	1450	1850



2.11. В якому відношенні потрібно змішати піски 2 і 3, 1 і 2 (вправа 2.10), щоб отримати змішані піски, які мають повний залишок на ситі 0,63 мм 25%. Розрахувати зерновий склад змішаних пісків.

2.12. В.І.Сорокером для оцінки якості піску введений показник – модуль ефективності $M_{\text{эф}}$, л, який показує, яка кількість цементного тіста потрібна для заповнення порожнин і змащення поверхні зерен у 1 кг піску:

$$M_{\text{эф}} = \frac{\rho_n - \rho_{\text{н.п}}}{\rho_n \cdot \rho_{\text{н.п}}} + 0,013 \cdot S, \quad (2.24)$$

де ρ_n – дійсна густина піску, кг/л;

$\rho_{\text{н.п}}$ – насипна густина піску у віброваному стані, кг/л;

S – питома поверхня піску, $\text{м}^2/\text{кг}$.

Визначити модуль ефективності пісків, характеристику яких наведено у вправі 2.10.

2.13. У відповідності з ДСТУ БВ.2.7–32–95 при найбільшій крупності 70 мм вміст фракцій у крупному заповнювачі повинен знаходитись у наступних межах, %: від 5 до 10 мм – 10...20, від 10 до 20 мм – 15...25, від 20 до 40 мм – 20...35, від 40 до 70 мм – 35...55. В якому відношенні потрібно змішати дві фракції щебеню, щоб забезпечити потрібний зерновий склад щебеню, якщо зерновий склад фракцій наступний, %: № 1 – від 5 до 10 мм – 35, від 10 до 20 мм – 40, від 20 до 40 мм – 25, № 2 – від 5 до 10 мм – 5, від 10 до 20 мм – 5, від 20 до 40 мм – 20, від 40 до 70 мм – 70?

2.14. Розрахувати значення пустотності суміші фракцій щебеню, якщо насипна густина суміші 1.65 кг/л, маса суміші – 16.5 кг. При отриманні суміші витрачено 2 л фракції з пустотністю 41%, 5 л – з пустотністю 35% та 3 л – з пустотністю 37%.

Для розрахунків можна використати формулу:

$$P = 1 - \frac{\rho_n^{\text{см}}}{m^{\text{см}}} [V_1(1 - p_1) + V_2(1 - p_2) + \dots + V_n(1 - p_n)], \quad (2.25)$$

де $m^{\text{см}}$ і $\rho_n^{\text{см}}$ – маса суміші заповнювачів та їх насипна густина,



$V_1, V_2 \dots V_n$ – насипні об'єми фракцій, що змішуються,
 $\rho_1, \rho_2 \dots \rho_n$ – пористість фракцій, що змішуються.

2.15. Для виготовлення 1 м^3 бетонної суміші витрачають 750 кг річкового піску з залишками на ситах: 5 мм – 5%, 2,5 мм – 15%, 1,25 мм – 20%, 0,63 мм – 25%, 0,315 мм – 25%. 0,16 мм – 18% та 1200 кг щебеню фракції 5...20 мм з питомою поверхнею $2,1 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Розрахувати питому поверхню суміші заповнювачів за формулою:

$$U_s = U_{щ} + (U_n - U_{щ})r, \quad (2.26)$$

де $U_{щ}$ та U_n – питома поверхня піску та щебеню, $\text{м}^2/\text{кг}$;
 r – частка піску в суміші заповнювачів.

2.16. За номограмою, що приведена на рис. 2.6, розрахувати водопотребу бетонної суміші при водопотребі щебеню 3%, водопотребі піску – 9,11%, нормальній густоті цементу 26 і 30% та цементно-водною відношенню 2,2.

2.17. Користуючись рекомендаціями табл. 2.25, визначити види легких бетонів та їх можливу середню густину при застосуванні керамзитового гравію марок 400, 600 і 800.

Таблиця 2.25

Граничне відношення насипної густини крупного пористого заповнювача до середньої густини легкого бетону

Середня густина легкого бетону у висушеному стані, $\text{кг}/\text{м}^3$	Щільний легкий бетон	Малопіщаний легкий бетон	Безпіщаний (крупнопористий) бетон
До 800	0,4	0,55	0,6
900...1100	0,45	0,6	0,65
1200...1400	0,5	0,65	0,7
1500...2000	0,55	0,7	0,75

2.18. За допомогою формули $R_k = 15\rho_s^2$ знайти очікувану міцність керамзитового гравію, якщо експериментальні



значення густини його зерен (ρ_s^2) виявились наступними, г/см³ :
0.68; 0.77; 0.89; 0.96; 1.07; 1.25.

2.3 Добавки. Вода замішування

Добавки. До добавок у бетони відносять речовини природного або штучного походження, що вводяться під час приготування бетонної суміші для покращення властивостей бетону та економії цементу. Добавки умовно поділяють на хімічні і мінеральні.

Хімічні добавки (добавки-модифікатори) вводять зазвичай у відносно невеликій кількості (до 10%). Відповідно до ДСТУ Б В.2.7-171:2008 їх класифікують за основним ефектом впливу на властивості бетонної суміші і бетону. Виділяють такі види (класи) добавок-модифікаторів:

- добавки, які регулюють властивості готових до використання бетонних і розчинових сумішей;
- добавки, що змінюють властивості бетонів і розчинів;
- добавки, що надають бетонам та розчинам спеціальні властивості.

Одні і ті ж добавки можуть відноситись до різних видів залежно від мети, з якою вони вводяться у бетонну суміш, дозування і т.п.

До добавок першого виду належать:

- пластифікуючі (водоредукуючі), які дозволяють підвищити рухомість бетонної суміші і (або) зменшити її водовміст при зниженні міцності бетону (розчину) в усі строки твердіння не більше, ніж на 5%;
- стабілізуючі, які зменшують розчино-та водовідділення, розшаровуваність бетонної суміші;
- що сприяють стабільності легкоукладальності бетонних сумішей в часі;
- що регулюють строки тужавлення;
- поризуючі (повітровтягувальні, газо-, піноутворювальні).

Пластифікуюче-водоредукуючі добавки розділяють на суперпластифікуючі, сильнопластифікуючі та пластифікуючі залежно від збільшення рухомості бетонної суміші та



водоредукуючого ефекту при введенні добавки. Так, суперпластифікуючі добавки дозволяють збільшити рухомість бетонної суміші від марки P1 (ОК=2...4 см) до P5 (ОК>20 см), а їх водоредукуюча здатність зазвичай перевищує 20%. Сильнопластифікуючі добавки збільшують рухомість бетонної суміші від марки P1 до P4, а пластифікуючі – від P1 до P3. У європейській практиці склався поділ добавок цієї групи на суперпластифікатори з водоредукуючим ефектом понад 12% і пластифікатори.

В Україні найбільшого поширення набули суперпластифікатори нафталінформальдегідного і меламінформальдегідного типів – С-3 (Поліпласт СП-1, СП-3), Melment та інш. Застосовуються також добавки полікарбоксилатного і поліакрилатного типів (Stachement, Marei Dynamon, Melflux, Sika ViscoCrete та інш.).

Класифікація суперпластифікаторів (табл. 2.26) розділяє їх за складом і механізмом дії.

Таблиця 2.26
Класифікація суперпластифікаторів (СП)

Позначення	Склад СП	Механізм дії
НФ	На основі сульфованих нафталінформальдегідних поліконденсатів	Електро статичний
МФ	На основі сульфованих меламіноформальдегідних поліконденсатів	Електро статичний
ЛСТ	На основі очищених від цукрів лігносульфонатів	Електро статичний
П	На основі полікарбоксилатів і поліакрилатів	Стеричний

Вимоги до пластифікуючих добавок окремих груп згідно ДСТУ БВ.2.7-65-97 наведені в табл. 2.27.

Стабілізуючі добавки забезпечують зниження розчино- і водовідділення бетонних сумішей. Ці добавки також підвищують однорідність і знижують проникність бетону. До них відносять поліоксетилен (ПОЕ), метилцелюлозу (МЦ-100), карбоксиметилцелюлозу (КМЦ). Добавки такого типу на основі



ефірів целюлози (під фірмовою назвою Tylose) отримали широке поширення у виробництві сухих будівельних сумішей. Стабілізаторами реологічних властивостей бетонних сумішей також є високодисперсні порошки каоліну, бентонітової глини та ін.

Таблиця 2.27

Вимоги до пластифікуючих добавок

№ з/п	Вид добавки	Критерій ефективності
1	Пластифікуючі I групи	Збільшення рухомості бетонної суміші від P1 до P5 (від 4 см і менше до 25 см) без зниження міцності бетону протягом всього строку випробувань
2	Пластифікуючі II групи	Збільшення рухомості бетонної суміші від P1 до P4 (від 4 см і менше до 20 см) без зниження міцності бетону протягом всього строку випробувань
3	Пластифікуючі III групи	Збільшення рухомості бетонної суміші від P1 до P3 (від 4 см і менше до 9 см) без зниження міцності бетону протягом всього строку випробувань
4	Пластифікуючі IV групи	Збільшення рухомості бетонної суміші від P1 до P2 (від 4 см і менше до 9 см) без зниження міцності бетону протягом всього строку випробувань

Сповільнювачі (прискорювачі) тужавлення разом з мінеральними наповнювачами можуть використовуватися як добавки, що регулюють твердіння бетонних сумішей на початковій стадії. Компоненти, що регулюють строки тужавлення, часто вводять до складу пластифікуючих або комплексних добавок. До сповільнювачів тужавлення відносяться технічні лігносульфонати ЛСТ, цукрова патока – меляса, декстрин та ін. Як прискорювачі тужавлення використовують хлорид кальцію, фторид натрію, іноді сульфати алюмінію, заліза. Побічними ефектами застосування таких



добавок є регулювання кінетики тепловиділення і наростання міцності у ранньому віці.

Пороутворюючі (поризуючі) добавки дозволяють створити в бетоні систему замкнених пор, які позитивно впливають на його морозостійкість і непроникність, зменшують середню густину. Побічним позитивним ефектом є деяка пластифікація бетонної суміші, зменшення її розшарованості. Можна виділити наступні групи добавок цього класу:

- повітровтягувальні: смола нейтралізована повітровтягувальна (СНП, американський аналог – Вінсол), смола деревна омилена (СДО), сульфанол та ін.;
- пластифікуюче-повітровтягувальні: ЛСТ, етилсиліконат (ГКР-10) і метилсиліконат (ГКР-11) натрію та ін.;
- піноутворюючі: СДО, клеєканіфольний, алюмосульфонатний, смолосапоніновий та ін. На основі зазначених піноутворювачів випускаються добавки, які містять також різні стабілізатори властивостей піни, регулятори тужавлення та твердіння цементного тіста;
- газоутворюючі: алюмінієва пудра, полігідросилоксани та ін.

Пороутворюючі добавки забезпечують збільшення об'єму повітря (газу) від 1,5 до 5% у конструкційних, від 6 до 30% у конструкційно-теплоізоляційних і теплоізоляційних і від 15 до 90% у ніздрюватих бетонах.

До добавок другого виду належать добавки:

- що регулюють кінетику твердіння бетону – прискорювачі та сповільнювачі;
- що підвищують міцність;
- що знижують проникність;
- що підвищують захисні властивості відносно сталевій арматури;
- що підвищують морозостійкість;
- що підвищують корозійну стійкість (в т.ч. ті, що регулюють процеси усадки і розширення).

Як сповільнювачі твердіння бетону застосовують перераховані вище сповільнювачі тужавлення. Як прискорювачі



твердіння, крім хлориду кальцію, використовують сульфат натрію, нітрит-нітрат кальцію, нітрат кальцію, нітрат натрію, тринатрійфосфат, добавки на основі роданіду та тіосульфату натрію (Релаксол, Реламікс).

Підвищити міцність бетону можна, використовуючи пластифікуючі добавки, прискорювачі твердіння, тонкомелені порошки.

Корозійну стійкість підвищують повітровтягувальні і гідрофобізуючі добавки, кольматуючі добавки (сульфати алюмінію та заліза, хлорид заліза, поліамідна смола С-89, бітумна емульсія – емульбіт), які закупорюють капілярні пори бетону, а також інгібітори корозії арматури (нітрит натрію, сечовина, біхромати натрію і калію, тетраборат натрію – бура, нітрит-нітрат кальцію НК).

Морозостійкість і непроникність бетону підвищуються при застосуванні повітровтягувальних, кольматуючих і водоредуруючих добавок.

До добавок третього виду звичайно належать:

- протиморозні (прискорювачі твердіння, які застосовуються у підвищених дозах, а також хлорид натрію, аміачна вода, поташ);
- гідрофобізуючі;
- біоцидні, які підвищують бактерицидні і інсектицидні властивості бетону (катапін, оловоорганічні сполуки);
- добавки, які підвищують стійкість до висолоутворення;
- добавки, які змінюють електропровідність бетону (хлористі солі, графітовий порошок, сажа);
- добавки, які підвищують жаростійкість бетону (зола-виносу, тонкомелена хромітова руда, шамот).

Прагнення універсалізувати дію добавок і посилити їх технічний ефект зумовили широке поширення комплексних (композиційних) добавок. *Комплексні добавки* можна поділити на дві категорії. Перші представлені сумішами добавок, що належать до одного виду, а другі – різних видів.



У світовій практиці розповсюджені і дещо інші класифікації добавок за технологічним ефектом, що досягається. Зокрема, запропонована класифікація хімічних добавок Американською асоціацією зі стандартизації та випробування матеріалів (ASTM), (табл. 2.28).

Таблиця 2.28

Класифікація хімічних добавок за ASTM

Тип	Технологічний ефект	Номер стандартів
A	Водозниження	C494
B	Уповільнення твердіння	C494
C	Прискорення твердіння	C494
D	Водозниження / уповільнення	C494
E	Водозниження / прискорення	C494
F	Значне водозниження	C494
	Пластифікування для литого бетону	C1017
	Повітровтягування	C260
	Добавки для торкрет-бетону	C1141

Поряд з хімічними добавками, які вводяться в бетони для модифікування їх властивостей, у бетонні суміші вводяться дисперсні *мінеральні добавки (наповнювачі)*. *Активні мінеральні добавки* характеризуються певною пуцолановою активністю – здатністю хімічно взаємодіяти з гідроксидом кальцію, що виділяється при твердінні цементу в результаті гідролізу клінкерних мінералів. Інертні добавки такої здатності не мають, але вони також приймають участь у структуроутворенні бетону і впливають на його властивості.

З активних мінеральних добавок, що вводяться у бетонну суміш, найбільш поширеною є *зола-виносу*.

Залежно від області застосування зола поділяють на види (1 – для залізобетонних конструкцій і виробів; 2 – для бетонних конструкцій і виробів; 3 – для конструкцій гідротехнічних споруд), а також на класи – для важкого (А) і легкого (Б) бетону.

Питома поверхня золи класу А повинна бути не меншою $2800 \text{ см}^2/\text{г}$, а золи класу Б – в інтервалі $1500..4000 \text{ см}^2/\text{г}$.



Залишок на ситі №008 для золи класу А не повинен перевищувати 15% за масою. Зола повинна забезпечувати рівномірність зміни об'єму суміші її з цементом при випробуванні зразків кип'ятінням у воді.

Основні вимоги до золи, яка вводиться в бетонні суміші, наведені в табл. 2.29.

Таблиця 2.29

Вимоги до золи як добавки в бетон

Показник	Значення показника для золи виду (класу)		
	I (А і Б)	II (А і Б)	III (А)
Вміст $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, % за масою, не менше, для золи : - антрацитової і кам'яновугільної - буровугільної	70 50	Не нормуєть ся Те ж	70 50
Вміст сірчистих і сірчаноокислих сполук у перерахунку на SO_3 , % за масою, не більше	3	3,5	3
Вміст вільного оксиду кальцію (CaO), % за масою, не більше	3	5	2
Вміст оксиду магнію (MgO), % за масою, не більше	5	5	5
Втрати при прожарюванні, % за масою, не більше, для золи : - антрацитової - кам'яновугільної - буровугільної	15 7 5	20 10 5	5 5 3
Вологість, % за масою, не більше	3	3	3

У композиції з добавками суперпластифікаторів виявились особливо ефективними високодисперсні кремнеземисті порошки – мікрокремнеземи (МК), (рис. 2.7). МК утворюються як відходи виробництва феросплавів, які уловлюються при газоочистці. Унікальна питома поверхня (до 20 000 $\text{cm}^2/\text{г}$) у поєднанні з аморфізованою структурою часток, наявністю таких домішок, як карбід кремнію, які володіють



високою поверхневою енергією, обумовлюють високу структуруючу і реакційну здатність цих матеріалів у порівнянні з іншими наповнювачами цементних систем. Вміст МК у бетонах рекомендується в кількості 20...50 кг/м³.

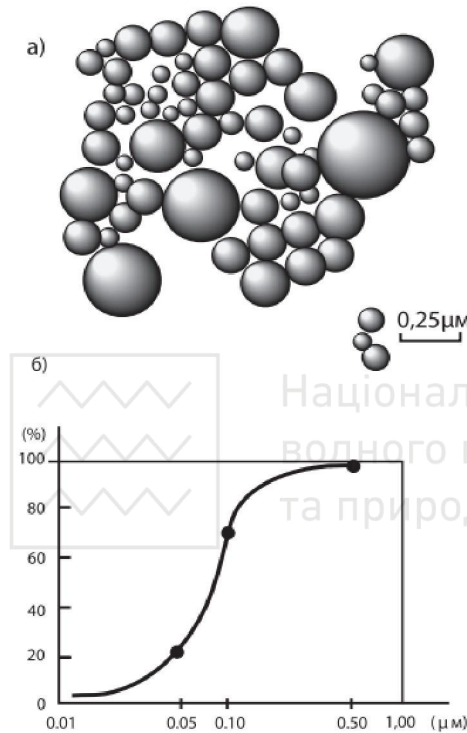


Рис. 2.7. Основні характеристики мікрокремнезему:

а – форма и розмір зерен; б – крива гранулометричного складу

Поряд із МК в якості ефективних модифікаторів бетону за певних умов (висока дисперсність, комбінація із суперпластифікаторами та ін.) можуть служити й інші мінеральні матеріали – метакаолін, цеоліти та ін.

Вода. У технології бетонів та залізобетонних конструкцій вода застосовується для замішування бетонних сумішей, промивки заповнювачів, поливання робочих швів при перервах у бетонуванні та інших технологічних потреб. Вимоги до води, залежно від її призначення, встановлені ДСТУ БВ.2.7– 273: 2011. Вони нормують вміст хімічних сполук та домішок, які впливають на строки

тужавлення цементу, швидкість твердіння, міцність, морозостійкість та водонепроникність бетону, корозію арматури. Не допускається застосування стічної, болотної та торф'яної води, води з водневим показником рН менше 4 і



більше 12,5, вмістом грубодисперсних домішок більше 4% об'єму.

У воді допускаються лише сліди нафтопродуктів, масел та жирів, стійкість піни при наявності поверхнево-активних речовин не повинна бути більшою 2 хвилин, цукор, фосфати у перерахунку на P_2O_5 , сульфідів – на S^{2-} , свинець – Pb^{2+} , цинк – Zn^{2+} можуть бути присутні у максимальній кількості 100 мг/л, нітрати у перерахунку на NO_3^- – 500 мг/л.

Максимально допустимий вміст у воді розчинних солей, сульфатів, хлоридів та зважених часток наведено в табл. 2.30. Загальний вміст у воді іонів Na^+ та K^+ у складі розчинних солей не може перевищувати 1500 мг/л.

Таблиця 2.30

Максимально допустимий вміст у воді розчинних солей,
сульфатів, хлоридів і зважених часток

Призначення води	Максимально допустимий вміст, мг/л			
	розчинних солей	іонів SO_4^{2-}	іонів Cl^-	зважених часток
1. Вода для замішування при виготовленні попередньо напружених залізобетонних конструкцій	2000	600	500	200
2. Вода для замішування при виготовленні конструкцій з ненапруженою арматурою	5000	2700	1200	200
3. Вода для замішування при виготовленні неармованих конструкцій, на яких можливе утворення висолів, а також конструкцій підводної та внутрішньої зон масивних споруд	10000	2700	4500	300
4. Вода для промивки заповнювачів	5000	2000	1200	500
5. Вода для поливання робочих швів при перервах у бетонуванні та поверхні стиків, які підлягають замоноличуванню	1000	500	500	200
6. Вода для поливання конструкцій	5000	2700	1200	500
7. Вода для поливання конструкцій при можливості появи вицвітів та висолів	35000	2000	20000	500



Вода для замішування бетону, яка відповідає вимогам за вмістом небажаних хімічних сполук та зважених часток, визначається придатною, якщо у порівнянні з питною водою вона не викликає зміну строків тужавлення цементу більше ніж на 25 %, а також зниження міцності бетону при нормальних умовах твердіння, його морозостійкості та водонепроникності і не впливає на стійкий пасивний стан арматурної сталі.

Приклади

2.12. *Визначити до якої групи за критерієм ефективності, у відповідності з ДСТУ Б В 2.7-65-97, відносяться пластифікуючі добавки.*

Для перевірки ефективності пластифікуючих добавок було виконано по п'ять лабораторних замісів бетонної суміші та визначено їх рухомість.

Досліди виконувались на бетонних сумішах однакового складу з введенням до основних складів пластифікуючих добавок в оптимальній кількості. Рухомість контрольного складу за осадкою конуса складала 2...4 см.

Пластифікуючу здатність добавок оцінювали за зміною легкоукладальності бетонної суміші у порівнянні з легкоукладальністю контрольного складу.

Експериментальні результати наведені в табл. 2.31.

Таблиця 2.31

Ефективність пластифікуючих добавок

Добавка	Рухомість бетонної суміші, ОК, см					Середнє арифме тичне, см	Середнє квадра тичне	Коефі цієнт варіації %
	Заміс 1	Заміс 2	Заміс 3	Заміс 4	Заміс 5			
Добавка 1	22	24	25	23	25	23,8	1,36	5,7
Добавка 2	18	17	18	20	19	18,4	1,04	5,7
Добавка 3	13	15	13	14	15	14	0,8	5,7
Добавка 4	8	7	8	9	7	7,8	0,56	7,2

З приведеного статистичного аналізу слідє, що всі 5 випробувань однорідні і під час випробувань грубої помилки не



допущено. Про це свідчить розрахований коефіцієнт варіації, який складає менше 10%.

При збільшенні рухомості в результаті введення пластифікуючих добавок зменшення міцності бетонів всіх досліджених складів не відбувалось.

Згідно з ДСТУ добавка 1 відноситься до I групи, так як збільшення рухомості бетонної суміші при її введенні складає від P1 до P5 (від 4 см до 25 см); добавка 2 – до II групи, збільшення рухомості бетонної суміші від P1 до P4 (від 4 см до 20 см); добавка 3 – до III групи, збільшення рухомості бетонної суміші від P1 до P3 (від 4 см до 15 см); добавка 4 – до IV групи, збільшення рухомості бетонної суміші від P1 до P2 (від 4 см до 9 см).

2.13. *Визначити, яка з 4 запропонованих добавок, що регулюють збережуваність бетонної суміші в часі, у відповідності з ДСТУ Б В 2.7-65-97, є найбільш ефективною.*

Початкова рухомість бетонних сумішей контрольного та основних складів відповідала марці за легкоукладальністю P3. Для перевірки ефективності добавок, що регулюють збереженість бетонної суміші в часі, було виконано по п'ять лабораторних замісів бетонної суміші та визначено час втрати рухомості бетонної суміші до 2 см.

Показник ефективності добавок даного виду P_e визначали за формулою:

$$P_e = \frac{\tau_0}{\tau_k}, \quad (2.27)$$

де τ_0 – час втрати рухомості бетонної суміші основних складів від вихідної величини (ОК=15 см) до ОК=2 см, хв;

τ_k – час втрати рухомості бетонної суміші контрольного складу.

Експериментальні результати наведені в табл. 2.32.

З приведенного статистичного аналізу слідує, що всі 5 випробувань однорідні і під час випробувань грубої помилки не допущено. Про це свідчить розрахований коефіцієнт варіації, який складає менше 10%.



Ефективність добавок, що регулюють збережуваність
бетонних сумішей

Добавка	Час втрати рухомості бетонної суміші порівняно з вихідною величиною (РЗ), хв					Середнє арифметичне, хв	Середнє квадратичне	Коефіцієнт варіації %	P _e
	Заміс 1	Заміс 2	Заміс 3	Заміс 4	Заміс 5				
Контрольний склад	95	97	94	99	96	96,2	2,96	3,1	-
Добавка 1	122	128	128	125	123	125,2	6,16	4,9	1,30
Добавка 2	108	111	105	109	103	107,2	8,16	7,6	1,11
Добавка 3	98	100	99	102	100	99,8	1,76	1,8	1,04
Добавка 4	135	138	129	136	136	134,8	9,36	6,9	1,40

Найбільш ефективною добавкою, що регулює збережуваність бетонної суміші в часі є добавка 4, для якої розрахункове значення показника P_e складає 1,4, тобто введення її до складу бетонної суміші дозволяє збільшити тривалість збереження її рухомості на 40%.

2.14. Визначити, яка із 4 запропонованих протиморозних добавок, у відповідності з ДСТУ Б В 2.7-65-97, є найбільш ефективною. Додатково встановити чи є в переліку досліджених добавок такі, які не можна віднести до протиморозних.

Результати лабораторних досліджень ефективності добавок наведені в табл. 2.33.

Всі заміси виконувались на бетонних сумішах однакового складу з додатковим введенням до основних складів протиморозних добавок в оптимальній кількості. Рухомість контрольного та основних складів відповідала марці за легкоукладальністю P1.

Визначено міцність при стиску зразків через 28 діб нормального твердіння для контрольного складу та при температурі -15° С для основних складів.

Зміну міцності бетону Δf_{cm} у відсотках після тверднення



при мінусовій температурі обчислювали за формулою:

$$\Delta f_{cm} = \frac{f_{cm0}^{28}}{f_{cmk}^{28}} \cdot 100, \quad (2.28)$$

де f_{cm0}^{28} – міцність бетону основних складів після знаходження у морозильній камері протягом 28 діб та відтаювання на повітрі, МПа;

f_{cmk}^{28} – міцність бетону контрольного складу після тверднення у нормальних умовах, МПа.

Згідно з ДСТУ до протиморозних належать добавки, які забезпечують тверднення бетону і розчину при температурі мінус $-15 \pm 5^\circ \text{C}$ з набором міцності 30% і більше від міцності контрольного складу у віці 28 діб нормального тверднення.

Таблиця 2.33
Ефективність протиморозних добавок

Добавка	Міцність при стиску через 28 діб, МПа					Серед-не ариф-метичне, МПа	Серед-не квадратич-не	Кое-фі-цієнт варі-ації, %	$\Delta f_{cm}, \%$
	Заміс 1	Заміс 2	Заміс 3	Заміс 4	Заміс 5				
Контроль-ний склад	35,3	36,0	34,9	35,8	36,1	35,6	0,21	0,6	-
Добавка 1	7,1	7,2	6,8	6,9	7,0	7,0	0,02	0,3	19,7
Добавка 2	11,3	11,6	11,1	11,9	11,5	11,5	0,07	0,6	32,2
Добавка 3	14,2	15,0	14,8	15,2	14,6	14,8	0,12	0,8	41,4
Добавка 4	8,8	9,0	9,1	8,7	9,3	9,0	0,05	0,5	25,2

Найбільш ефективною протиморозною добавкою є добавка 3, для якої розрахункове значення міцності бетону Δf_{cm} після тверднення при мінусовій температурі складає 41,4% від контрольної. Також встановлено, що добавки №1 та №4 згідно з ДСТУ не можна віднести до протиморозних, тому що їх міцність через 28 діб твердіння при температурі -15°C складає менше 30% міцності контрольного складу через 28 діб нормального твердіння.



2.15. Оцінити пластифікуючий ефект добавок ЛСТМ, СП-1, Melflux та їх композицій при різних значеннях водоцементного відношення бетонної суміші та вмісту шлаку в цементі.

Дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього були реалізовані алгоритмізовані експерименти за планом «склад-технологія-властивості». У даному плані поєднуються симплекс-планування взаємозалежних факторів суміші компонентів та варіювання незалежних технологічних факторів.

Фактори, що варіювались згідно експериментального плану:

- v_1 – вміст пластифікатора ЛСТМ (0...0,5%);
- v_2 – вміст суперпластифікатора СП-1 (0...0,5%);
- v_3 – вміст суперпластифікатора Melflux (0...0,5%);
- x_1 – вміст шлаку (0...30% від маси цементу);
- x_2 – водоцементне відношення (0,35...0,55)

Після проведення статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі осадки конуса бетонної суміші та пластифікуючого ефекту впливу добавок загального виду:

$$\begin{aligned} y = & A_1v_1 + A_2v_2 + A_3v_3 + A_{12}v_1v_2 + A_{13}v_1v_3 + \\ & + A_{23}v_2v_3 + (Ab)_{11}v_1v_1 + (Ab)_{12}v_1v_2 + \\ & + (Ab)_{21}v_2v_1 + (Ab)_{22}v_2x_2 + (Ab)_{31}v_3x_1 + \\ & + (A/b)_{32}v_3x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Моделі виду (2.29) дозволяють виконувати комплекс розрахунків, пов'язаних з прогнозуванням досліджених вихідних параметрів.

Величина пластифікуючого ефекту добавок визначалась за формулою:

$$PE = \frac{OK - OK_0}{OK_0} \cdot 100\%, \quad (2.30)$$

де OK – осадка конуса при додаванні пластифікуючої добавки;
 OK_0 – осадка конуса контрольного складу.



Таблиця 2.34

Коефіцієнти математичних моделей рухомості бетонної суміші (ОК), пластифікуючого (ПЕ) ефектів добавок

Коефіцієнти	Вихідні параметри		Коефіцієнти	Вихідні параметри	
	ОК, см	ПЕ, %		ОК, см	ПЕ, %
A ₁	11,26	6	(Ab) ₂₁	-4,64	-22
A ₂	6,87	3	(Ab) ₂₂	6,12	8
A ₃	16,29	37	(Ab) ₃₁	-0,53	-6
A ₁₂	-11,99	-46	(Ab) ₃₂	5,59	5
A ₁₃	10,96	88	b ₁₂	-1,38	-9
A ₂₃	3,47	0	b ₁₁	-0,48	3
A ₁₂₃	-	-	b ₂₂	3,23	23
(Ab) ₁₁	-0,79	-5			
(Ab) ₁₂	7,25	9			

Пластифікуючий ефект досліджених добавок різного складу при максимальному їх вмісті 0,5% від маси цементу знаходився в межах від 22% до 82%. Як слідує з математичної моделі ПЕ (табл. 2.34, рис. 2.8), найбільший пластифікуючий ефект надає суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Melflux.

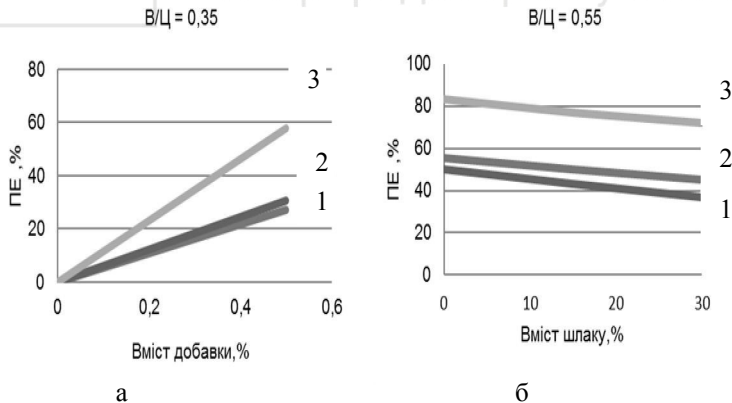


Рис. 2.8. Вплив одинарних добавок на пластифікуючий ефект (ПЕ), %: 1 – добавка ЛСТМ; 2 – СП-1; 3 – Melflux

Пластифікатор ЛСТМ і суперпластифікатор СП-1 показали дещо нижчі значення пластифікуючого ефекту.



Збільшення пластифікуючого ефекту добавок всіх видів характерне при збільшенні В/Ц.

При оцінці спільного впливу добавок різного типу максимальний пластифікуючий ефект спостерігався при поєднанні пластифікатора ЛСТМ з суперпластифікатором Melflux в однакових співвідношеннях (рис. 2.9, а). У даному випадку ПЕ знаходився в межах 52...82%, що наближається до ефекту, отриманого при індивідуальному введенні добавки Melflux. Комплексна добавка Melflux і СП-1 призводить до зниження ПЕ до 35...68%. Найнижче значення пластифікуючого ефекту отримали при поєднанні пластифікатора ЛСТМ і суперпластифікатора СП-1.

Поєднання трьох досліджуваних добавок в однакових пропорціях дозволяє отримати ПЕ при В/Ц=0,55 – 60...63%, при В/Ц=0,55 – 29...31%. Аналіз спільного впливу добавок за потрійною діаграмою дозволив встановити область співвідношень, що забезпечують максимальний пластифікуючий ефект (рис. 2.9, б): при В/Ц=0,35: Melflux – 68...73%, СП-1 – 8...12%, ЛСТМ – 18...23% (ПЕ=37...45%); при В/Ц=0,55: Melflux – 48...53%, СП-1 – 8...15%, ЛСТМ – 35...42% (ПЕ=55...65%).

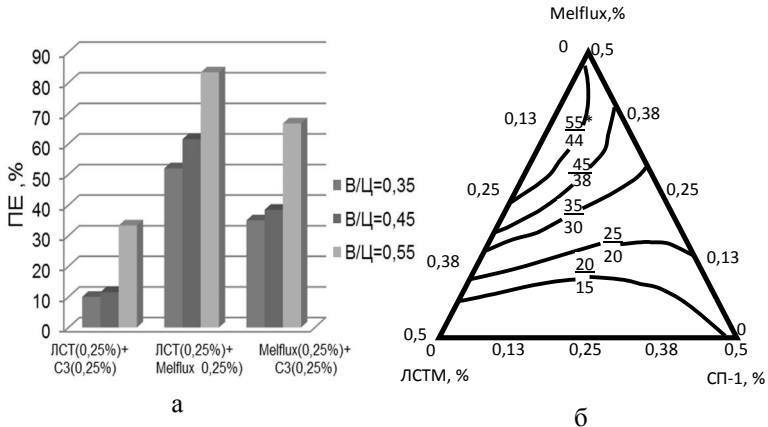


Рис. 2.9. Вплив комплексних добавок на ПЕ, %
* Над рискою значення ПЕ при В/Ц = 0,55, під рискою значення ПЕ при В/Ц = 0,35



2.16. Оцінити водоредукуючий ефект добавок ЛСТМ, СП-1, Melflux та їх композицій.

Водоредукуючий ефект розраховували за формулою:

$$BPE = \frac{B - B_0}{B_0} \cdot 100\%, \quad (2.31)$$

де B – витрата води при додаванні пластифікуючої добавки без зменшення початкової рухомості (ОК=16...20 см) бетонної суміші;

B_0 – витрата води для бетонної суміші без вмісту пластифікатора.

Були реалізовані експерименти за симплекс-решітчастим планом Шеффе «суміш-властивість». Значення факторів $V_1 \dots V_5$ коливались у межах, що вказані у попередньому прикладі. Математичні моделі, що отримані в результаті даних експериментів, мають вигляд:

$$y = A_1 v_1 + A_2 v_2 + A_3 v_3 + A_{12} v_1 v_2 + A_{13} v_1 v_3 + A_{23} v_2 v_3 + A_{123} v_1 v_2 v_3. \quad (2.32)$$

Коефіцієнти отриманої моделі водоредукуючого ефекту наведені нижче.

A_1	A_2	A_3	A_{12}	A_{13}	A_{23}	A_{123}
15,3	15,2	31,3	17,4	37,4	20	41,8

Водоредукуючий ефект (BPE) досліджених добавок змінюється в межах 13...28%. На величину водоредукуючого ефекту найбільший вплив має тип пластифікуючої добавки. Найкращий водоредукуючий ефект показала добавка на основі полікарбоксилатного ефіру (25...30%), нижчий BPE – добавки на основі лігносульфонату і нафталінформальдегіду (10...15%). При оцінці спільного впливу добавок різного типу найкращий BPE спостерігається при поєднанні суперпластифікатора Melflux і пластифікатора ЛСТМ в однакових співвідношеннях. У даному випадку BPE знаходиться в межах 24...28%, що



наближається до ефекту, отриманому при окремому введенні добавки Melflux. Дещо нижчий ВРЕ показали комплексна добавка Melflux і СП-1, а також добавка із трьох компонентів Melflux, СП-1, ЛСТМ. Аналізуючи спільний вплив добавок, за потрібною діаграмою можна встановити, межі добавок, що забезпечують максимальний водоредукуючий ефект: Melflux – 50...55%, СП-1 – 10...15%, ЛСТМ – 30...35%. (рис. 2.10).

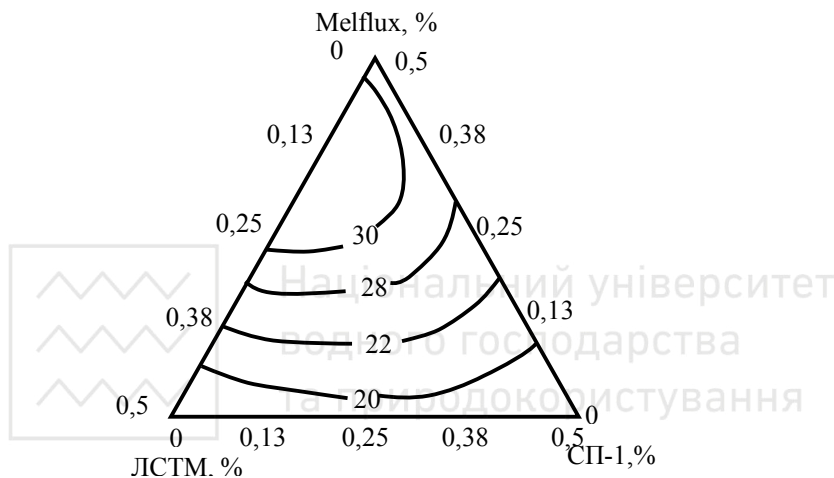


Рис. 2.10. Спільний вплив добавок на ВРЕ

2.17. *Визначити пуцоланову активність та кінетику поглинання СаО мікрокремнеземом та золю-виносу, а також їх композиціями, і вплив на них дисперсності даних мінеральних добавок.*

Для дослідів взяти проби мікрокремнезему з питомою поверхнею для МК-1 – 780 м²/кг, МК-2 – 890 м²/кг і МК-3 – 950 м²/кг, та золи-виносу – 3-1 – 290 м²/кг, 3-2 – 370 м²/кг, 3-3 – 435 м²/кг. Домол золи виконували у лабораторному кульовому млині.

Пуцоланову активність мінеральних добавок та їх композицій визначали за прискореною методикою НДІЗБ. Досліджувані матеріали після нагрівання до 80° С і певної тривалості витримування у насиченому розчині Са(ОН)₂



титрували та розраховували кількість поглиненого мінеральними добавками CaO. Результати дослідів наведені на рис. 2.11.

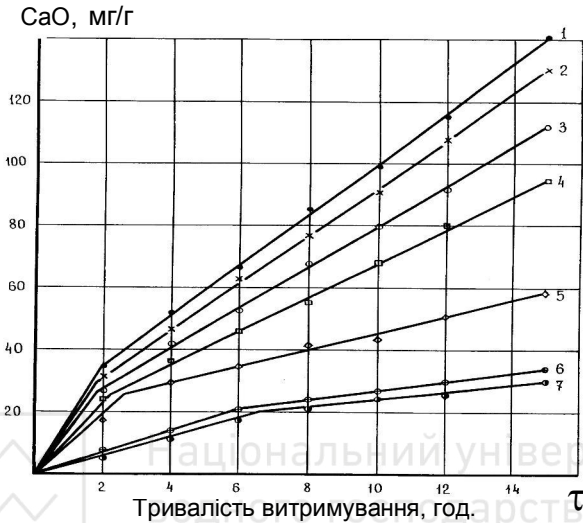


Рис. 2.11. Кінетика поглинання CaO активними наповнювачами:
1 – МК-1; 2 – МК-2; 3 – МК-3; 4 – МК-1 - 50%, 3-1 - 50%;
5 - МК-1 - 20%, 3-1 - 80%; 6 - 3-1; 7 - 3-3

Вони показують, що змішування золи-виносу з 20...30% МК дозволяє збільшити поглинання вапна майже в 2 рази у той час, як додатковий помел золи до $435 \text{ м}^2/\text{кг}$ – тільки у 1,5 рази. Тривалість першого періоду на кривих кінетики поглинання вапна добавками, який відповідає адсорбції $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на активних центрах, у МК та золомікрокремнеземистих сумішах суттєво коротша, ніж у золи.

2.18. *Визначити придатність води для замішування бетону згідно ДСТУ БВ.2.7– 273:2011.*

Для виготовлення бетону та залізобетонних конструкцій є можливість застосування води з двох джерел. Результати попередніх випробувань проб води наведені в табл. 2.35.



Таблиця 2.35

Результати попередніх випробувань води

№ з/п	Показники	Вода № 1	Вода № 2
1	Вміст грубодисперсних домішок, % об'єму	1,5	0,8
2	Кольоровість, град (ГОСТ 3351)	28°	22°
3	Водневий показник, рН	10,8	11,5
4	Зважені частинки, %	0,03	0,06
5	Розчинні солі, %	2,8	3,7
6	Іони натрію (Na^+) і калію (K^+) у розчинних солях, %	0.08	1.5
7	Хлорид-іони (Cl^-), %	1.5	2.2
8	Сульфат- іони (SO_4^{2-}). %	0.25	0.28

Вони показали, що у відповідності до ДСТУ вода №2 є непридатною для замішування бетону. Воду №1 піддали подальшим дослідженням. Результати випробувань наведені в табл. 2.36.

Таблиця 2.36

Результати випробувань води для замішування бетону

Показники	Вміст	Показники (у порівнянні з еталонними)	Значення
Нітрат-іони (NO_3^-), %	0.03	Строки тужавлення	більше на 10%
Сульфід-іони (S^{2-}), %	0,008	Міцність через 7 діб	більше на 7%
Фосфат-іони (P_2O_5), %	0,05	Міцність через 28 діб	більше на 5%
Цукор, %	0,003	Морозостійкість	більше на 10%
Іони цинку (Zn^{2+}), %	0,004	Водонепроникність	більше на 15%
Іони свинцю (Pb^{2+}), %	–	Корозійний стан арматури в бетоні	забезпечується пасивний стан сталі

Аналіз наведених експериментальних даних дозволяє стверджувати, що вода № 1 придатна для замішування бетону.



Вправи

2.19. При випробуванні добавки встановлено, що без зниження міцності при оптимальному дозуванні вона дозволила у порівнянні з контрольним складом збільшити рухомість бетонної суміші від P1 до P4. До яких видів добавок згідно ДСТУ Б В.2.7 – 171:2008 за призначенням можна віднести дану добавку?

2.20. Бетонна суміш з ОК=15 см через 1 год. мала ОК=2 см. При введенні добавки втрата рухомості від вихідного значення до 2 см відбулась через 1,5 год. Чи можна віднести дану добавку до таких, що збільшують термін зберігання рухомості в межах, які рекомендовані ДСТУ Б В.2.7 – 171:2008?

2.21. При отриманні легких бетонів були випробувані два види добавок – повітровтягувальна та піноутворююча. Повітровтягувальна добавка забезпечила вміст затягнутого повітря в бетонну суміш 12%. Після 30 хвилин витримування втрати повітря склали 35%. Піноутворюючу добавку застосували для отримання піни, при введенні якої поризована структура утворювалась при об'ємі повітря в межах від 10 до 25%. Втрати введеного повітря після 30 хв. витримування становили не більше 20%. При введенні обох видів добавок зниження міцності при однаковій середній густині бетону не відмічено. Зробити висновок про ефективність добавок згідно ДСТУ Б В.2.7 – 171:2008.

2.22. При випробуванні трьох гідрофобізуючих добавок зафіксований ефект приведений нижче:

Добавка	Водопоглинання бетону у віці 28 діб, %
1	4,5
2	2,1
3	1,5
Без добавки	7,8

Легкоукладальність бетонних сумішей та умови їх твердіння при введенні добавок підтримувались незмінними.

Розташувати добавки за групами згідно ДСТУ Б В.2.7 – 171:2008 залежно від їх ефективності.



2.23. Для дрібнозернистого вібропресованого бетону досліджували доцільність введення комплексних добавок суперпластифікатора СП-1 і повітровтягувальної добавки СДО. В результаті реалізації тривіневого експериментального плану для двох факторів отримані експериментально-статистичні моделі середньої густини ущільненої бетонної суміші (ρ_0 , кг/м³) та міцності бетону на стиск у віці 28 діб (f_{cm} , МПа) наведені нижче:

$$\rho_0 = 2351 + 58X_1 + 28X_2 - 9X_1^2 - 42X_2^2;$$

$$f_{cm} = 41,5 + 4,7X_1 + 1,8X_2 - 2,1X_1^2 - 0,9X_1X_2.$$

Рівняння дійсні у діапазоні наступних значень факторів: витрата СП-1 (X_1) – 0,5±0,5% маси цементу ($\rho_c=400$ кг/м³); витрата СДО (X_2) – 0,03±0,03% маси цементу ($\rho_c=400$ кг/м³).

Проаналізувати за допомогою графічних залежностей вплив комплексних добавок при різному співвідношенні їх компонентів на середню густину та міцність вібропресованих бетонів.

2.24. В результаті аналізу експериментальних даних отримані рівняння для розрахунків оптимального вмісту у % від маси цементу добавок (D^{opt}) прискорювачів твердіння – тіосульфату натрію (ТСН) і хлориду кальцію (ХК), що дозволяють збільшувати міцність пропарених бетонів, або при постійній міцності знижувати цементно-водне відношення (ρ_c/ρ_w) та температуру ізотермічного прогріву (t_{i3}).

Добавка ТСН:

$$D_1^{opt} = 0.08 \rho_c / \rho_w + 0,00125t_{i3} + 0,7$$

Добавка ХК:

$$D_2^{opt} = 0.14 \rho_c / \rho_w + 0,0045t_{i3} + 1,1$$

Розрахувати оптимальний вміст добавок у % від маси цементу, прийнявши $\rho_c/\rho_w=1,5$, $\rho_c/\rho_w=2$ та $t_{i31}=60^\circ\text{C}$, $t_{i32}=80^\circ\text{C}$.



2.25. Для малоклінкерного шлакопортландцементу (вміст клінкеру 5%, питома поверхня 350 м²/кг) отримана експериментально-статистична модель міцності на стиск (f_{cm}^7) при введенні добавок активатора твердіння Na₂SiF₆ (X₁) 0...4% і суперпластифікатора СП-1 (X₂) 0...1% від маси цементу.

$$f_{cm}^7 = 10,9 + 1,9x_1 + 2,1x_2 - 2,3x_1^2 + 3,5x_2^2 + 1,9x_1x_2 \quad (2.33)$$

Визначити оптимальний вміст добавок та їх співвідношення, що забезпечують максимальну міцність малоклінкерного портландцементу.

2.26. Аналіз води показав, що за вмістом хімічних сполук і домішок, які вказані в технічних вимогах, вона відповідає вимогам ДСТУ БВ. 2.7– 273:2011, встановленим для води замішування бетонної суміші при виготовленні бетонних неармованих конструкцій.

Результати виконаних фізико-механічних випробувань наведені нижче. Склад бетону при випробовуваннях був незмінним.

Таблиця 2.36

Результати фізико-механічних випробувань для оцінювання придатності води для замішування бетонної суміші

№ з/п	Показник	Бетонна суміш на контрольній воді	Бетонна суміш на воді, що випробовується
1.	Строки тужавлення цементу, год.-хвилин початок кінець	1-30 2-50	1-42 3-05
2.	Міцність на стиск, МПа 7 діб 28 діб	21,5 32,3	22,2 28,5
3.	Морозостійкість, цикли	F 250	F 200
4.	Водонепроникність	W 6	W 6

Зробити висновок про придатність води.



3. ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ ТА БЕТОНУ

3.1. Властивості бетонних сумішей

Основні властивості бетонних сумішей і методи їх випробувань регламентуються нормативними документами. В Україні властивості бетонних сумішей стандартизовані у відповідності з ДСТУ БВ.2.7-96-2000, (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Марки бетонної суміші за легкоукладальністю

Марка	Норма легкоукладальності за показником		
	жорсткість, с	рухомість, см	
		осадка конуса	розплив конуса
Наджорсткі суміші			
НЖ3	більше 100	-	-
НЖ2	51...100	-	-
НЖ1	50 і менше	-	-
Жорсткі суміші			
Ж4	31...60	-	-
Ж3	21...30	-	-
Ж2	11...20	-	-
Ж1	5...10	-	-
Рухомі суміші			
P1	4 і менше	1...4	-
P2	-	5...9	-
P3	-	10...15	-
P4	-	16...20	26...30
P5	-	21 і більше	31 і більше

Визначаються властивості бетонних сумішей за ДСТУ БВ.2.7-114-2002 (ГОСТ 10181-2000). Згідно ДСТУ БВ.2.7-176:2008 показники властивостей (марки) бетонних сумішей можуть встановлюватися і визначатися також за Європейськими нормами EN 206-1:2000, (табл. 3.2).



Однією із визначальних властивостей бетонної суміші є *легкоукладальність*, тобто здатність суміші заповнювати форму чи опалубку та ущільнюватись. Легкоукладальність визначають за показниками рухомості та жорсткості (рис. 3.1). Залежно від цих показників встановлені марки бетонної суміші за легкоукладальністю, (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Марки бетонної суміші за EN 206-1:2000
(ДСТУ Б В.2.7-176:2008)

Марка	Показник	Марка	Показник
Осадка конуса, мм		Ступінь ущільнення	
S1	10...40	C0	$\geq 1,46$
S2	50...90	C1	1,45...1,26
S3	100...150	C2	1,25...1,11
S4	160...210	C3	1,10...1,04
S5	≥ 220	C4	$< 1,04$
Час Вебе, с		Діаметр розпливу конуса, мм	
V0	≥ 31	F1	≤ 340
V1	30...21	F2	350...410
V2	20...11	F3	420...480
V3	10...6	F4	490...550
V4	5...3	F5	560...620
		F6	≥ 630

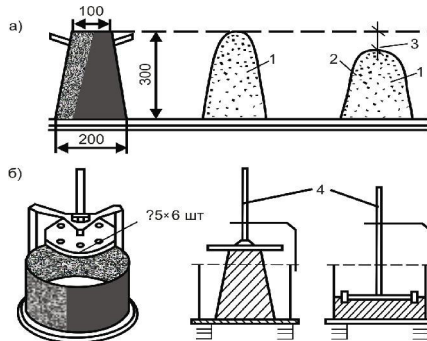


Рис. 3.1. визначення легкоукладальності бетонної суміші (ОК та Ж): а) прилад (конус) для визначення рухомості бетонної суміші: 1 – жорстка суміш; 2 – рухома суміш; 3 – осадка конусу; б) прилад для визначення жорсткості бетонної суміші; 4 – схема випробування



Для бетонних сумішей у певному діапазоні легкоукладальності нормується їх розшаровуваність за водо- та розчиновідділенням (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Вимоги до розшаровуваності бетонних сумішей

Марка за легкоукладальністю	Розшаровуваність, % не більше		
	водовідділення	розчиновідділення	
		важких сумішей	легких сумішей
НЖ3...НЖ1	0...0,1	2	3
Ж4...Ж1	0...0,2	3	4
Р1...Р2	0...0,4	3	4
Р3...Р5	0...0,8	4	6

Основні розрахункові формули для визначення властивостей бетонної суміші наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Розрахункові формули для визначення властивостей бетонних сумішей

№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.1	Ступінь ущільнення	$C = h / (h - s),$ <p>де h – внутрішня висота ємності; s – відстань від поверхні ущільненої бетонної суміші до верхнього краю ємності.</p>
3.2	Середня густина, кг/м ³	$\rho_{см} = \frac{m - m_l}{V} \cdot 1000,$ <p>де m – маса мірної посудини з бетонною сумішшю, г; m_l – маса мірної посудини без суміші, г; V – місткість мірної посудини, см³.</p>
3.3	Фактична маса компонентів бетонної суміші, кг/м ³	$m_k = \frac{\rho_{см}}{\sum m_3} \cdot m_{к.з},$ <p>де $\rho_{см}$ – густина бетонної суміші, кг/м³; $\sum m_3$ – сумарна маса компонентів суміші на заміс; $m_{к.з}$ – маса даного компоненту, який взято на заміс.</p>



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.4	Об'єм повітря (розрахунковий метод), %	$V_n = \frac{1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{П}{\rho_n} + \frac{Щ}{n\rho_{щ}} + B + B_1 \right)}{10}$ <p>де Ц, П, Щ, В і В₁ – фактична маса, кг, відповідно, цементу, сухих піску та щебеню (гравію), води та розчину добавок у 1 м³ ущільненої бетонної суміші; ρ_ц – дійсна густина цементу, г/см³, яку приймають рівною 3,1 для портландцементу та його різновидів, та 3,0 – для шлакопортландцементу; ρ_n, ρ_щ – середня густина зерен піску та щебеню (гравію), г/см³; n – коефіцієнт, який враховує збільшення середньої густини зерен крупного заповнювача в результаті його часткового дроблення при перемішуванні бетонної суміші у змішувачі примусової дії. Приймається рівним 1 для щільного заповнювача; 1,05 – для пористого заповнювача з маркою за міцністю П75 і більше; 1,1 – для пористого заповнювача з маркою за міцністю менше П75.</p>
3.5	Об'єм втягнутого повітря (компресійний метод), %	$V_n = 2C \cdot (H_1 - H_2) \cdot 100,$ <p>де С – ціна поділки шкали приладу; Н₁ і Н₂ – показники шкали приладу</p>
3.6	Водовідділення, %	$П_в = \frac{m_в}{\rho_в \cdot V_{\text{бс}}} \cdot 100,$ <p>де m_в, – маса води, яка відокремилась, г; ρ_в, – густина води, яку приймають 1 г/см³; V_{бс} – об'єм ущільненої бетонної суміші, см³.</p>



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.7	Об'єм втягнутого повітря (об'ємний метод), %	$V_n = \frac{V_{см} + \frac{m_e}{\rho_e} - V_0 - 0,9m_n - \frac{nW_{щ}}{100} \cdot \frac{Щ}{1000} \cdot V_{см}}{V_{см}} \cdot 100,$ <p>де $V_{см}$ – об'єм бетонної суміші, яку випробовують в ущільненому стані, см³; m_e – маса всієї влитої води, г; ρ_e – густина води, яку приймають 1,0 г/см³; V_0 – стала об'ємоміра, см³, ($V_0 = m_{e,з} / \rho_e$, де $m_{e,з}$ – маса влитої в об'ємір води при його градуванні); m_n – маса відібраної піни, г; $W_{щ}$ – водопоглинання крупного заповнювача за час від моменту приготування суміші до закінчення випробування, %, маси; n – коефіцієнт, що дорівнює 0,4 – для пористого гравію і 0,75 – для пористого щебеню; $Щ$ – вміст крупного заповнювача у номінальному складі бетонної суміші, кг/м³.</p>
3.8	Показник розчиновід Ділення, %	$P_p = \frac{m_{pв} - m_{pн}}{m_{pв} + m_{pн}} \cdot 100,$ $m_{pв(н)} = \left(m_{смв(н)} - m_{щв(н)} \right) \cdot \frac{0,5H}{H_{в(н)}},$ <p>де $m_{pв}$, $m_{pн}$ – маса розчинової складової суміші, яка знаходилась у верхній і нижній частинах форми, г; $m_{смв}$, $m_{смн}$ – маса бетонної суміші, відібраної з верхньої та нижньої частин форми, г; $m_{щв}$, $m_{щн}$ – маса висушеного крупного заповнювача, г; H – висота форми чи посудини, мм; $H_{в}$, $H_{н}$ – фактична висота верхнього та нижнього шарів суміші, мм.</p>



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.9	Об'єм міжзернових порожнин в ущільненій бетонній суміші, %	$V_{м.п} = I - \left(\frac{V_2 - V_{цм}}{V_1} \right) \cdot 100,$ <p>де V_1 – об'єм ущільненої бетонної суміші, см^3, що дорівнює місткості мірної посудини чи форми, в якій визначається середня густина; V_2 – об'єм ущільненої бетонної суміші після додавання цементу та води (рекомендується 2000 г цементу та 600...800 г води) і додаткового перемішування:</p> $V_2 = \frac{m_{см} + m_ц + m_в}{\rho_{см}},$ <p>де $m_{см}$ – маса бетонної суміші, яку випробовують (до додавання цементу та води), г; $m_ц$ – маса добавленого цементу, г; $m_в$ – маса добавленої води, г; $\rho_{см}$ – середня густина бетонної суміші в ущільненому стані після додавання до неї цементу та води, г/см^3. Об'єм добавленого цементного тіста, см^3:</p> $V_{цм} = \frac{m_ц}{\rho_ц} + m_в,$ <p>де $\rho_ц$ – дійсна густина цементу, г/см^3.</p>

Приклади

3.1. Знайти за середньоарифметичним значенням вимірювань чи відповідають бетонні суміші необхідним значенням осадки конуса і які результати необхідно повторити на новій пробі.



Для вимірювання осадки конуса бетонних сумішей з різною легкоукладальністю були відібрані відповідні проби. Результати випробувань наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Результати визначення осадки конуса бетонної суміші

Номер проби	Необхідна марка	Значення вимірювань ОК, см	Середньоарифметичне значення, см
1	P3	14,2; 16,1	15
2	P3	16,4; 18,9	$17,65 \times 0,67 = 11,79 \approx 12$
3	P4	16,8; 19,1	18
4	P2	6,1; 9,4	-
5	P2	6,5; 7,5	7

Проби 1 і 2 відрізняються крупністю щебеню. У пробі 2 вона більша 40 мм.

При розв'язуванні цієї задачі врахуємо вимоги ДСТУ БВ.2.7-114-2002:

Осадку конуса бетонної суміші обчислюють з округленням до 1,0 см як середньоарифметичне результатів двох визначень з однієї проби, які відрізняються між собою не більше ніж на 1 см при $OK < 9$ см, 2 см при $OK = 10 \dots 15$ см, 3 см при $OK \geq 16$ см. При більшому розходженні результатів визначення повторюють на новій пробі.

При крупності заповнювача бетонної суміші більше 40 мм для визначення осадки конуса використовують збільшений конус і для приведення отриманих значень до осадки нормального конуса їх множать на коефіцієнт 0,67.

За умовами, наведеними в даній задачі, легкоукладальність, що визначена на пробах 1...3, відповідає необхідним маркам. Проба 4 замінена пробєю 5, оскільки приведені результати двох визначень відрізняються на 3,3 см при допустимій для $OK < 9$ см (марка P2) різниці не більше 1 см.

3.2. Жорсткість двох бетонних сумішей різних складів визначали методом Б.Г.Скрамтаєва. Для визначення жорсткості бетонної суміші №2 було взято дві проби. Встановити яким маркам за жорсткістю відповідають бетонні суміші.



Результати випробувань наведені нижче:

Бетонна суміш	Проби	Час вібрування, с	Середнє арифметичне значення, с
1	№1	35; 38	36
2	№1	21; 39	30
	№2	23;27	25

Згідно ДСТУ БВ. 2.7-114-2002 жорсткість бетонної суміші обчислюють з округленням до 1 с як середньоарифметичне значення результатів двох визначень з однієї проби суміші, які відрізняються між собою не більше ніж на 20% середнього значення. Враховуючи, що проба №1 бетонної суміші №2 цій умові не відповідає, вона не враховується і замінена пробєю №2.

При встановленні марки за жорсткістю бетонної суміші, враховуючи метод її визначення, середні арифметичні значення двох вимірювань необхідно помножити на перехідний коефіцієнт 0,7. Випробувані проби бетонної суміші відповідають маркам Ж3 і Ж2 за ДСТУ БВ. 27-96-2000.

3.3. Розрахувати вміст повітря в бетонних сумішах важкого і легкого бетону.

Вихідні дані: Склад важкого бетону: $\rho_{\text{ц}}=450 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{п}}=650 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{щ}}=1100 \text{ кг/м}^3$, $V=165 \text{ кг/м}^3$.

В бетонну суміш вводиться суперпластифікатор С-3. Маса 10%-го розчину добавки С-3 з густиною $1,045 \text{ г/см}^3$ – 27 кг; $\rho_{\text{ц}}=3,1 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{п}}=2,65 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{щ}}=2,7 \text{ г/см}^3$.

Склад легкого бетону з застосуванням керамзитового гравію в якості крупного заповнювача – $\rho_{\text{ц}}=370 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{п}}=730 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{щ}}=412 \text{ кг/м}^3$, $V=217 \text{ кг/м}^3$.

$\rho_{\text{ц}}=3,1 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{п}}=2,65 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{щ}}=1,05 \text{ г/см}^3$.

Розрахунок об'єму повітря в бетонній суміші виконуємо за формулою 3.4. Коефіцієнт $n=1$ для важкого бетону і $n=1,1$ для керамзитобетону.

Результати розрахунків наведені в табл.3.6.



Таблиця 3.6

Розрахунок об'єму повітря в бетонній суміші

Вид бетону	Розрахунок V_n
Важкий	$V_n = \frac{1000 - \left(\frac{450}{3,1} + \frac{650}{2,65} + \frac{1100}{2,7 \cdot 1,0} + \frac{165}{1,0} + \frac{27}{1,045} \right)}{10} = 1,13\%$
Легкий	$V_n = \frac{1000 - \left(\frac{370}{3,1} + \frac{730}{2,65} + \frac{412}{1,05 \cdot 1,1} + \frac{217}{1,0} + 0 \right)}{10} = 3,1\%$

3.4. Визначити кращу бетонну суміш за показниками, що характеризують розшиаровуваність.

Дані лабораторних випробувань наведені в табл.3.7

Таблиця 3.7

Експериментальні дані для визначення показників розшиаровуваності бетонних сумішей

№ з/п	Експериментальні показники	Бетонна суміш	
		1	2
Розчиновиділення			
1	Маса бетонної суміші, відібраної: з верхньої частини форми, г ($m_{сmb}$)	7990	7650
2	з нижньої частини форми, г ($m_{сmn}$)	7050	6830
3	Маса висушеного крупного заповнювача, який міститься у наважці з верхньої частини форми ($m_{щв}$)	3595	3620
	з нижньої частини форми ($m_{щн}$)	3877	4200
4	Висота форми (H), мм	200	200
5	Висота верхнього шару суміші (H_v), мм	85	81
6	Висота нижнього шару суміші (H_n), мм	75	71

* В табл. наведені середньоарифметичні значення результатів двох визначень експериментів, які відрізнялися між собою не більше ніж на 20% середнього значення.



Розрахунок показників розчинівідділення Π_r виконували за формулами (3.8). Вони становили:

для бетонної суміші №1

$$m_{pe} = (7990 - 3595) \cdot \frac{0,5 \cdot 200}{85} = 5170 \text{ г}$$

$$m_{pn} = (7050 - 3877) \cdot \frac{0,5 \cdot 200}{75} = 4230 \text{ г}$$

$$\Pi_{p1} = \frac{5170 - 4230}{5170 + 4230} \cdot 100 = 10\%$$

для бетонної суміші №2

$$m_{pe} = (7650 - 3620) \cdot \frac{0,5 \cdot 200}{81} = 4975 \text{ г}$$

$$m_{pn} = (6830 - 4200) \cdot \frac{0,5 \cdot 200}{71} = 3704 \text{ г}$$

$$\Pi_{p2} = \frac{4975 - 3704}{4975 + 3704} \cdot 100 = 14,6\%$$

Водовідділення бетонної суміші розраховували за формулою (3.6).

Вихідні дані: маса води (m_w), що виділилась за 2 год. з бетонної суміші №1 – 55 г, №2 – 68 г. Об'єм бетонних сумішей ($V_{б,см}$) №1 – 890 см^3 , №2 – 910 см^3 .

$$\Pi_{w1} = \frac{55}{1 \cdot 890} \cdot 100 = 6,1\%$$

$$\Pi_{w2} = \frac{68}{1 \cdot 910} \cdot 100 = 7,5\%$$

Як слідує з отриманих експериментальних даних, бетонна суміш №1 виявилась більш стійкою до розшарування за показниками розчинівідділення і водовідділення.



3.5. Визначити об'єм міжзернових порожнин в ущільненій бетонній суміші.

Об'єм міжзернових порожнин ($V_{м.п}$) є показником ступеню ущільнення бетонної суміші. Його визначають у % до загального об'єму суміші і обчислюють за формулою (3.9). Необхідні для розрахунків $V_{м.п}$ експериментальні дані обчислюють як середні арифметичні значення двох випробувань однієї проби, які відрізняються між собою не більше ніж на 20% середнього значення.

Вихідні дані: Об'єм ущільненої бетонної суміші V_1 , який дорівнював місткості використаної мірної посудини (форми 150x150x150 мм), становив 3375 см³.

Об'єм ущільненої бетонної суміші V_2 після додавання 2000 г цементу і 600 г води дорівнює:



$$V_2 = \frac{7950 + 2000 + 600}{2,35} = 4489 \text{ см}^3.$$

Об'єм добавленого цементного тіста:

$$V_{ц.м} = \frac{m_ц}{\rho_ц} + m_в = \frac{2000}{3,1} + 600 = 1245 \text{ см}^3.$$

За формулою (3.9):

$$V_{м.п} = 1 - \left(\frac{4489 - 1245}{3375} \right) \cdot 100 = 4\%.$$

3.6. Визначити у відповідності з європейськими нормами EN 12350-2000 класи бетонних сумішей за розпливом конуса на струшуючому столику та ступенем ущільнення.

Після стандартних випробувань (15 струшувань на спеціальному струшуючому столі) замірювали нижній діаметр коржа, що утворився при розпливі конуса бетонної суміші у двох



взаємно перпендикулярних напрямках. Ступінь ущільнення C знаходили за формулою (3.1).

Результати вимірювань наведені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Результати визначення розпливу конуса та ступеню ущільнення бетонної суміші

№ проби	Ступінь ущільнення, C		Розплив конуса, мм		Консистенція суміші
	експериментальні значення	клас	експериментальні значення	клас	
1	$C_1=1,31; C_2=1,35;$ $\bar{C} = 1,33$	C1	$PK_1=340; PK_2=332;$ $\bar{PK} = 336$	F1	жорстка
2	$C_1=1,15; C_2=1,20;$ $\bar{C} = 1,17$	C2	$PK_1=420; PK_2=432;$ $\bar{PK} = 426$	F3	пластична
3	$C_1=1,05; C_2=1,09;$ $\bar{C} = 1,07$	C3	$PK_1=570; PK_2=582;$ $\bar{PK} = 576$	F5	рідка

Вправи

3.1. Визначити марки бетонних сумішей за рухомістю та жорсткістю за результатами випробувань проб, що наведені нижче. Встановити проби, які потребують заміни та повторних випробувань.

Таблиця 3.9

Результати вимірювань

№ проби	Результати вимірювань ОК, см		№ проби	Результати вимірювань Ж, с	
	1	2		1	2
1	2,3	2,9	7	7	8
2	4,2	6,5	8	12	14
3	10,4	12,1	9	22	24
4	11,5	14,7	10	35	39
5	16,3	19,1	11**	44	50
6	16,5	19,7			
7*	21,4	23,5			

* Для проби 7, осадка конуса визначалась у збільшеному конусі.

** Для проби 11 жорсткість визначали на приладі Скрамтаєва.



3.2. Визначити коефіцієнт кореляції та рівняння регресії між осадкою конуса бетонної суміші (ОК, см) та водопотребою (V , л/м³) за результатами вимірювань:

ОК, см	V , л/м ³	ОК, см	V , л/м ³
2	170	10	200
4	180	15	207
6	185	20	215
8	190		

3.3. Визначити коефіцієнт кореляції та рівняння регресії розпливу конуса бетонної суміші (РК в мм) від дозування пластифікуючої добавки (D , % від маси цементу) при постійному водовмісті. Результати випробувань: $D=0$, РК=340; $D=0,1$, РК=355; $D=0,2$, РК= 380; $D=0,3$, РК= 420; $D=0,4$, РК= 470; $D=0,5$, РК= 540; $D=0,6$, РК= 620; $D=0,7$, РК= 670.

3.4. За допомогою повнофакторного експерименту 2³ знайти рівняння регресії залежності осадки конуса бетонної суміші (ОК, см) від витрат води (V , л/м³, крупності щебеню ($D_{щ}$, мм) та водопотреби піску ($V_{п}$, %). Під час експерименту фактори змінювались у діапазоні (x_1) $V=170...220$ л/м³; (x_2) $D_{щ}=10...40$ мм; (x_3) $V_{п}=5...9$ %. Результати дослідів наведені в табл.3.10.

Таблиця 3.10

Матриця та результати дослідів

№ з/п	Фактори			ОК, см		№ з/п	Фактори			ОК, см	
	x_1	x_2	x_3	1	2		x_1	x_2	x_3	1	2
1	+1	+1	+1	20	18	5	+1	+1	-1	24	21
2	+1	-1	+1	15	14	6	+1	-1	-1	18	16
3	-1	+1	+1	4	5	7	-1	+1	-1	9	8
4	-1	-1	+1	1	2	8	-1	-1	-1	5	4

3.5. Визначити розрахунковим способом вплив пластифікуючої добавки на об'єм повітря в ущільненій бетонній суміші.

На заміс було взято 14 кг сухих матеріалів: 2,5 кг цементу ($\rho_{ц}=3,1$ г/см³), 5 кг піску ($\rho_{п}=2,65$ г/см³) та 6,5 кг щебеню ($\rho_{щ}=2,67$ г/см³). Витрата води склала 1,25 л без добавки пластифікатора та 1 л при введенні пластифікуючої добавки. Об'єм розчину добавки, що був введений у бетонну суміш при



перемішуванні компонентів, $V_1=0,075$ л. Густина бетонної суміші після ущільнення становила 2380 кг/м^3 .

3.6. Об'єм повітря у бетонній суміші керамзитобетону з вмістом керамзитового гравію з водопоглинанням 9%, який визначали за допомогою об'ємоміру, складає 690 кг/м^3 . При його градуванні маса влитої води дорівнювала 6000 см^3 . Об'єм бетонної суміші, яку випробовували в ущільненому стані, становив 5 л. При випробуванні у поромір налили 7,5 л води і протягом 3 хв перемішували бетонну суміш з водою. Піну, що утворювалась в об'ємомірі, гасили вливанням 2 мл метилового спирту. Визначити за отриманими даними об'єм повітря у бетонній суміші.

3.7. Для висновку про повноту ущільнення визначити об'єм міжзернових порождин бетонної суміші за результатами випробування двох проб. Початковий об'єм ущільненої бетонної суміші, рівний місткості форми $20 \times 20 \times 20$ мм, складав 8 л при середній густині для першої проби 2350 кг/м^3 , другої – 2380 кг/м^3 . Після додавання 2 кг цементу і 800 г води середня густина бетонної суміші в ущільненому стані збільшилась до 2420 кг/м^3 у першій пробі і 2450 кг/м^3 у другій.

3.8. Визначити за результатами випробувань двох бетонних сумішей з різним складом показник розчинивдділення. З ущільнених бетонних сумішей, які знаходились у формах кубів з розміром ребра 15 см, відбирали по дві проби, які зважували і піддавали мокрому розсіву на ситі з діаметром 5 мм для повного видалення цементно-піщаного розчину. Середньоарифметичні результати випробувань для двох проб наведені нижче:

Показники для верхнього шару	проби		Показники для нижнього шару	проби	
	1	2		1	2
висота, мм	63	71	висота, мм	75	73
маса бетонної суміші, відібраної з форми, г	3270	3640	маса бетонної суміші, відібраної з форми, г	3030	3545
маса висушеного крупного заповнювача, г	1845	1975	маса висушеного крупного заповнювача, г	2110	2250



3.9. Знайти коефіцієнт кореляції та рівняння регресії між ступенем ущільнення (СУ) бетонної суміші та її рухомістю (ОК, см). За однакових умов випробувань (EN 12350:2000) отримані наступні дані:

СУ:	1,35	1,42	1,25	1,18	1,11	1,08	1,04	1,02
ОК:	2	4	8	11	14	16	20	24

3.10. Знайти рівняння регресії, що описує залежність між осадкою конуса (ОК, см), тривалістю витримування бетонної суміші (τ , год.) та температурою оточуючого повітря (t , °С).

Для знаходження рівняння регресії експерименти виконані згідно тривірневого плану. Умови планування факторів на рівнях -1; 0; +1 були відповідно наступними (x_1) τ – 0,5; 1; 1,5 год.; (x_2) t – 15; 25; 35° С.

Результати експериментів наведені в табл.3.11.

Таблиця 3.11

Вплив тривалості витримування та температури на рухомість бетонної суміші

Точки плану	Матриця планування		ОК, см	Точки плану	Матриця планування		ОК, см
	x_1	x_2			x_1	x_2	
1	+1	+1	5	7	0	+1	8
2	+1	-1	9	8	0	-1	12
3	-1	+1	7	9	0	0	6
4	-1	-1	14	10	0	0	4
5	+1	0	8	11	0	0	3
6	-1	0	4				

3.2. Фізичні та структурні характеристики бетону

До групи основних фізичних характеристик бетону належать властивості, що характеризують особливості фізичного стану та відношення бетонів до дії води та температури. Вони розраховуються за формулами наведеними в табл. 3.12, 3.13. Середня густина бетону, його вологість, водопоглинання бетону, водонепроникність та пористість визначаються згідно ДСТУ БВ.2.7-170:2008, морозостійкість – ДСТУ БВ.2.7-46-96, теплопровідність та термічний опір – ДСТУ БВ.2.7-41-95 та ДСТУ БВ.2.7-105-2000.



Розрахункові формули для визначення фізичних властивостей бетонів

№ формул и	Параметр	Розрахункова формула
3.10	Середня густина бетону при нормованому вологовому стані, кг/м ³	$\rho_n = \rho_w \frac{1 + W_n / 100}{1 + W_m / 100},$ $\rho_w = \frac{m}{V},$ <p>де ρ_n – нормована середня густина бетону, кг/м³; ρ_w – середня густина бетону при вологості W_m, кг/м³; W_n – нормована вологість бетону, %; W_m – вологість бетону в момент випробування; m – маса зразка, кг; V – об'єм зразка.</p>
3.11	Об'єм зразка за об'ємом води, що витісняється парафінованим зразком (в об'ємомірі), см ³	$V = \frac{m_2 - m_1}{\rho_6},$ <p>де m_1 – маса порожньої посудини, г; m_2 – маса посудини з водою, витиснутою зразком, г; ρ_6 – середня густина води, $\rho_6 = 1$ г/см³.</p>
3.12	Об'єм зразка на гідростатичних вагах, см ³	$V_o = \frac{m_{нас} - m'_{нас}}{\rho_6} - \frac{m_n - m_c}{\rho_n},$ <p>де $m_{нас}$ – маса насиченого водою зразка, визначена звичайним зважуванням, г; $m'_{нас}$ – маса насиченого водою зразка, визначена зважуванням у воді, г; m_c – маса висушеного зразка, г; m_n – маса парафінованого зразка, г; ρ_6 – густина води, ($\rho_6 = 1$ г/см³); ρ_n – густина парафіну, ($\rho_n = 0,93$ г/см³).</p>



№ формули	Параметр	Розрахункова формула								
3.13	Вологість бетону за масою, %	$W_m = \frac{m_g - m_c}{m_c} \cdot 100,$ <p>де m_g – маса зразка бетону до сушіння, г; m_c – маса проби (зразка) бетону після сушіння, г</p>								
3.14	Водопоглинання, % за масою: за об'ємом:	$W'_m = \frac{m_g - m_c}{m_c} \cdot 100,$ $W'_o = \frac{W'_m \rho_o}{\rho_g},$ <p>де m_g – маса зразка після насичення водою, г; m_c – маса сухого зразка, г. ρ_o – середня густина сухого бетону, г/см³; ρ_g – густина води ($\rho_g = 1$ г/см³).</p>								
3.15	Коефіцієнт фільтрації, см/с	$K_\phi = \frac{\eta \cdot Q \cdot \delta}{S \cdot \tau \cdot p},$ <p>де Q – вага фільтрату, Н; δ – товщина зразка, см; S – площа зразка, см²; τ – час випробування зразка, протягом якого вимірюють масу фільтрату, с; p – надлишковий тиск в установці, МПа; η – коефіцієнт, що враховує в'язкість води при різній температурі:</p> <table><tr><td>температура води, °С</td><td>15</td><td>20</td><td>25</td></tr><tr><td>коефіцієнт η</td><td>1,0</td><td>0,89</td><td>1,13</td></tr></table>	температура води, °С	15	20	25	коефіцієнт η	1,0	0,89	1,13
температура води, °С	15	20	25							
коефіцієнт η	1,0	0,89	1,13							



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.16	Теплопровідність, Вт/(м, °С)	$\lambda = \frac{Q\delta}{F\tau\Delta T},$ де Q – кількість теплоти, Дж; δ – товщина матеріалу, м; F – площа перерізу, що перпендикулярна напрямленню теплового потоку, м ² ; ΔT – різниця температур, °С; τ – час, с.
3.17	Теплопровідність за В. П. Некрасовим, Вт/(м, °С)	$\lambda = 1,16\sqrt{0,0196 + 0,22d^2} - 0,16,$ де d – відносна густина матеріалу.
3.18	Теплоємність бетонної суміші, кДж/К	$C_{б.с.} = 0,84(m_u + m_n + m_{щ}) + 3,76m_e,$ де $m_u, m_n, m_{щ}, m_e$ – відповідно маса цементу, піску, щебеню (гравію) та води в т/м ³ .
3.19	Теплоємність форми, кДж/К	$C_{ф.} = C_{м.ф.} \frac{m_{ф.}}{2},$ де $C_{м.ф.}$ – питома теплоємність матеріалу форми, кДж/(кг·К); $m_{ф.}$ – маса форми з кришкою.
3.20	Питоме тепловиділення цементу у бетоні, кДж/кг	$q = \frac{C_{заг.}}{m_u} (t - t_0),$ де $C_{заг.} = C_{б.с.} + C_{ф.}$ – теплоємність бетонної суміші та форми, кДж/К ; m_u – маса цементу, кг; t_0 – початкова температура бетонної суміші, К; t – температура бетону наприкінці даного проміжку часу, К.



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.21	Тепловиділення бетону у віці 7 діб, кДж/м ³	$Q_7 = 0,83q_7(C + 22,3OK),$ де q_7 – питоме тепловиділення цементу у віці 7 діб, визначене стандартним методом, кДж/кг; OK – осадка конуса бетонної суміші, см; C – витрата цементу, кг/м ³ .
3.22	Тепловиділення бетону у різні строки тверднення, кДж/м ³	$Q_\tau = q_\tau C,$ де q_τ – питоме тепловиділення цементу у віці τ діб, кДж/кг, C – витрата цементу, кг/м ³ .
3.23	Тепловиділення бетону з урахуванням температури твердіння, кДж/кг	$Q_\tau = 0,00097q_{28}(B/C)^{0,44}t_6\tau,$ де q_{28} – питоме тепловиділення цементу у віці 28 діб, кДж/кг; t_6 – температура бетону, °С; τ – тривалість твердіння, год; B/C – водоцементне відношення.

Таблиця 3.13

Розрахункові формули для визначення параметрів пористості бетону

№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.24	Радіус капіляра	$r = \frac{2\sigma \cos \theta}{P},$ де σ – поверхневий натяг; θ – крайовий кут змочування, P – тиск.
3.25	Загальний об'єм пор бетону, %	$P_3 = \left[\frac{\rho_b - \rho_o}{\rho_b} \right] \cdot 100,$ де ρ_b – дійсна густина подрібненого у порошок бетону, кг/м ³ ; ρ_o – середня густина сухого бетону в серії зразків, кг/м ³ .



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.26	Об'єм відкритих капілярних пор бетону, %	$\Pi_g = W'_o ,$ <p>де W'_o – об'ємне водопоглинання, %</p>
3.27	Об'єм відкритих некапілярних пор бетону (об'єм міжзернових порожнин, %)	$\Pi_{мз} = \frac{V - V_1}{V} \cdot 100 ,$ <p>де V – об'єм зразка; V_1 – об'єм зразка, визначений у об'ємі без попереднього висушування та парафінування після насичування водою протягом 24 год. та витримування 10 хв. на решітці.</p>
3.28	Об'єм умовно-замкнених пор бетону, %	$\Pi_3 = \Pi_3 - \Pi_g - \Pi_{мз},$ <p>де Π_3 – загальний об'єм пор бетону, %; Π_g – об'єм відкритих капілярних пор бетону, %; $\Pi_{мз}$ – об'єм відкритих некапілярних пор бетону, %.</p>
3.29	Водопоглинання бетону залежно від показників пористості, %	$W_t = W_m \left[1 - e^{-(\bar{\lambda} t) \alpha} \right],$ <p>де W_t – водопоглинання зразка за час t у % за масою; W_m – водопоглинання зразка, у % за масою; e – основа натурального логарифму, рівна 2,718; $\bar{\lambda}$ – показник середнього розміру відкритих капілярних пор, рівний границі відношення прискорення процесу водопоглинання до його швидкості; α – показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор, визначається за номограмами.</p>



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.30	Показник мікропористості бетону	$P_{MK} = \frac{W_C}{P_6 + P_{M3}},$ <p>де W_C – сорбційна вологість бетону в серії зразків у % за об'ємом при відносній вологості повітря від 95% до 100%;</p> <p>P_6 – об'єм відкритих капілярних пор бетону, %;</p> <p>P_{M3} – об'єм відкритих некапілярних пор бетону, %.</p>

Приклади

3.7. Визначити середню густину бетону на зразках неправильної форми у сухому стані та при вологості W . Застосовується гідростатичне зважування (рис.3.2.)

Вихідні дані та експериментальні результати зведені в табл.3.14.

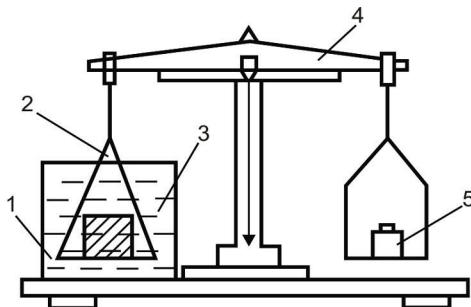


Рис. 3.2 єма гідростатичного зважування: 1 – посудина з водою; 2 – підвіс для зразка; 3 – зразок; 4 – ваги; 5 – важок



Таблиця 3.14

Вихідні дані та експериментальні результати

Показники	Значення для зразків, г			
	1	2	3	Середнє арифметичне
Маса зразка з вологістю W_m (m), г	580	570	550	567
Маса висушеного зразка (m_c), г	550	540	520	537
Маса насиченого водою зразка ($m_{нас}$), г	615	605	590	603
Маса насиченого водою зразка при гідростатичному зважуванні ($m'_{нас}$), г	293	305	280	293
Маса парафінованого зразка (m_n), г	562	555	535	551

За формулою (3.12) розраховуємо об'єми зразків:



$$V_1 = \frac{615 - 293}{1} - \frac{562 - 550}{0,93} = 309 \text{ см}^3;$$

$$V_2 = \frac{605 - 305}{1} - \frac{555 - 540}{0,93} = 284 \text{ см}^3;$$

$$V_3 = \frac{590 - 280}{1} - \frac{535 - 520}{0,93} = 294 \text{ см}^3;$$

$$V_{cp} = \frac{603 - 293}{1} - \frac{551 - 537}{0,93} = 295 \text{ см}^3.$$

Середню густину зразків в $\text{кг}/\text{м}^3$ із вологістю W_m (ρ_w) і в сухому стані (ρ_c) обчислюємо за формулою (3.10):

$$\rho_{w1} = \frac{580}{309} = 1,87 \text{ г}/\text{см}^3 (1870 \text{ кг}/\text{м}^3);$$

$$\rho_{w2} = \frac{570}{284} = 2,01 \text{ г}/\text{см}^3 (2010 \text{ кг}/\text{м}^3);$$

$$\rho_{w3} = \frac{550}{294} = 1,87 \text{ г}/\text{см}^3 (1870 \text{ кг}/\text{м}^3);$$



$$\rho_{w,cp} = \frac{567}{295} = 1,92 \text{ г/см}^3 \text{ (1920 кг/м}^3\text{)};$$

$$\rho_{c_1} = \frac{550}{309} = 1,78 \text{ г/см}^3 \text{ (1780 кг/м}^3\text{)};$$

$$\rho_{c_2} = \frac{540}{284} = 1,90 \text{ г/см}^3 \text{ (1900 кг/м}^3\text{)};$$

$$\rho_{c_3} = \frac{520}{294} = 1,77 \text{ г/см}^3 \text{ (1770 кг/м}^3\text{)};$$

$$\rho_{c,cp} = \frac{537}{295} = 1,82 \text{ г/см}^3 \text{ (1820 кг/м}^3\text{)}.$$

3.8. Визначити вологість та водопоглинання проб легкого бетону, отриманих подрібненням зразків після випробування на міцність, якщо їх маса становить: до сушіння: $m_{w_1} = 230 \text{ г}$; $m_{w_2} = 240 \text{ г}$; після сушіння: $m_{c_1} = 205 \text{ г}$; $m_{c_2} = 205 \text{ г}$; після насичення водою: $m_{n_1} = 250 \text{ г}$; $m_{n_2} = 270 \text{ г}$.

Вологість та водопоглинання бетону за масою обчислюємо за формулами (3.13, 3.14).

Вологість бетону:

$$W_{m_1} = \frac{230 - 205}{205} \cdot 100 = 12,2\%;$$

$$W_{m_2} = \frac{240 - 205}{205} \cdot 100 = 17,1\%;$$

$$W_{mcp} = \frac{12,2 + 17,1}{2} = 14,6\%.$$

Водопоглинання бетону за масою:

$$W'_{m_1} = \frac{250 - 205}{205} \cdot 100 = 22\%;$$

$$W'_{m_2} = \frac{270 - 205}{205} \cdot 100 = 31,2\%;$$



$$W'_{m.c.p} = \frac{22 + 31,2}{2} = 26,6\%.$$

Визначення водопоглинання за об'ємом W'_o здійснюється (при відомій густині бетону ρ_o) за формулою (3.14).

3.9. Встановити градувальну залежність для визначення водонепроникності бетону прискореним методом за його повітропроникністю.

Результати випробувань виконані на приладі, схема якого наведена на рис.3.3.

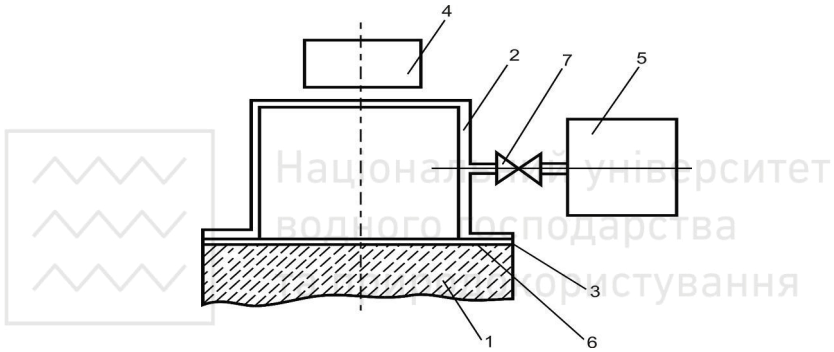


Рис. 3.3. Схема пристрою для визначення повітропроникності поверхневих шарів бетону: 1 – бетонний зразок; 2 – камера пристрою; 3 – фланець камери; 4 – вакуумметричний датчик; 5 – вакуум-насос; 6 – герметизуюча мастика; 7 – вентиль

Результати випробувань приведені в табл. 3.15.

Таблиця 3.15

Результати випробувань водонепроникності бетону

Номер серії зразків	Параметр повітропроникності бетону a_{c_i} , см ² /с	W_i	$lg a_{c_i}$	$W_i lg a_{c_i}$	$(lg a_{c_i})^2$
1	0,106	2	-0,975	-1,95	0,95
2	0,048	8	-1,319	-10,55	1,74
3	0,0046	22	-2,337	-51,41	5,46
Σ	0,1586	32	-4,631	-63,91	8,15



Коефіцієнти рівняння регресії розраховуємо за формулами (1.22, 1.23):

$$b_0 = \frac{32 \cdot 8,15 - 4,631 \cdot 63,91}{3 \cdot 8 \cdot 15 - (-4,631)^2} = -11,67;$$
$$b_1 = \frac{3 \cdot (-63,91) + 4,631 \cdot 32}{3 \cdot 8 \cdot 15 - (-4,631)^2} = -14,47.$$

Градувальна залежність має вигляд:

$$W = -11,67 - 14,47 \cdot \lg a_c.$$

3.10. Для облицювання каналу товщиною 0,1 м при напорі $H=2$ м і фільтраційних втратах $Q_{\phi}=0,0035$ л(діб·м) необхідний бетон з достатньою водонепроникністю. Знайти коефіцієнт фільтрації бетону та його марку за водонепроникністю.

Для знаходження коефіцієнта фільтрації використовуємо номограму (рис. 3.4).

Необхідним умовою відповідає бетон з коефіцієнтом фільтрації водонасичених зразків $K_{\phi}=3 \cdot 10^{-10}$ см/с. Такому коефіцієнту фільтрації відповідає марка бетону за водонепроникністю W4, (табл. 3.16).

Таблиця 3.16

Зв'язок між марками бетону за водонепроникністю та коефіцієнтом фільтрації

Марка бетону за водонепроникністю	Коефіцієнт фільтрації K_{ϕ} (см/с) при випробуванні на зразках у стані	
	рівноважної вологості	водонасичення
W2	Понад $7 \cdot 10^{-9}$ до $2 \cdot 10^{-8}$	Понад $5 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-9}$
W4	Понад $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$	Понад $1 \cdot 10^{-10}$ до $5 \cdot 10^{-10}$
W6	Понад $6 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$	Понад $5 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-10}$
W8	Понад $1 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-10}$	Понад $1 \cdot 10^{-11}$ до $5 \cdot 10^{-11}$
W10	Понад $6 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-10}$	Понад $5 \cdot 10^{-12}$ до $1 \cdot 10^{-11}$
W12	$6 \cdot 10^{-10}$ і менше	$5 \cdot 10^{-12}$ і менше

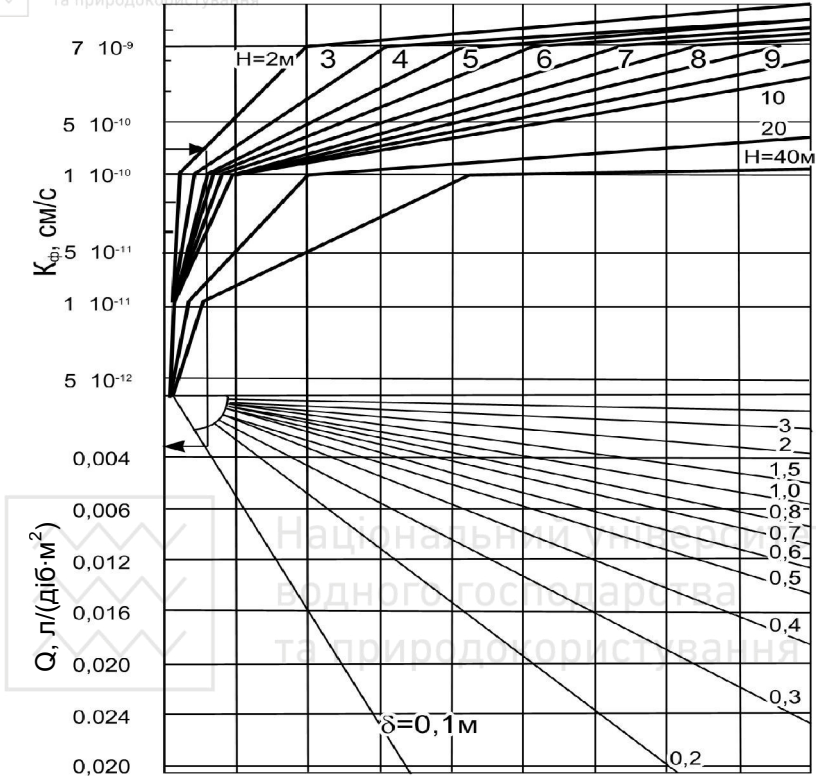


Рис. 3.4. омограма для розрахунку водонепроникності бетонних облицювань. Вище осі абсцис – криві напорів H , нижче - товщина облицювання; K_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації; Q – фільтраційна витрата води через бетон облицювання

3.11. Розрахувати за даними вимірювань в адіабатичному калориметрі (рис. 3.5) питому теплоту гідратації цементу в бетоні у віці 7 та 28 діб.

Склад бетону: Ц – $210 \text{ кг}/\text{м}^3$; П – $465 \text{ кг}/\text{м}^3$; Щ – $1155 \text{ кг}/\text{м}^3$; В – $112 \text{ кг}/\text{м}^3$. Маса форми з кришкою $m_{\phi}=4,2 \text{ кг}$. Теплоємність матеріалу форми $C_{m,\phi}=0,5 \text{ кДж}/\text{К}$.

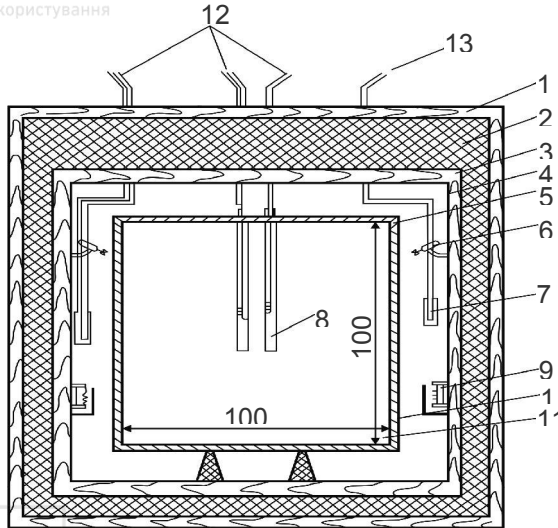


Рис. 3.5. Схема адіабатичного калориметра:
1 – зовнішня обшивка з деревини; 2 – теплоізоляція;
3 – внутрішня обшивка; 4 – металевий екран; 5 – кришка
форми; 6 – вентилятор; 7 – термометр опору; 8 – мідна
гільза; 9 – нагрівний елемент; 10 – форма для бетонної
суміші; 11 – бетон; 12 – виводи для електронного моста, що
реєструє температуру в камері і в бетоні; 13 – виводи до
приладу, що автоматично регулює температуру в камері

1. За формулою (3.18) знаходимо теплоємність бетонної суміші:

$$C_{б.с.} = 0,84(0,21 + 0,465 + 1,155) + 3,76 \cdot 0,112 = 1,958 \text{ кДж} / \text{К}$$

2. Теплоємність форми C_{ϕ} , кДж/К розраховують за формулою (3.19):

$$C_{\phi} = 0,5 \frac{4,2}{2} = 1,05 \text{ кДж} / \text{К} .$$

3. Визначаємо загальну теплоємність:

$$C_{заг} = 1,958 + 1,05 = 3,008 \text{ кДж} / \text{К} .$$



4. За формулою $\Delta t = \left(1 + \frac{C_{\phi}}{C_{б.с.}}\right)(t - t_0)$ обчислюємо

підвищення температури бетону з поправкою на теплоємність форми Δt . Початкову температуру бетону та температуру бетону у віці 7 та 28 діб знаходимо за рис. 3.6.

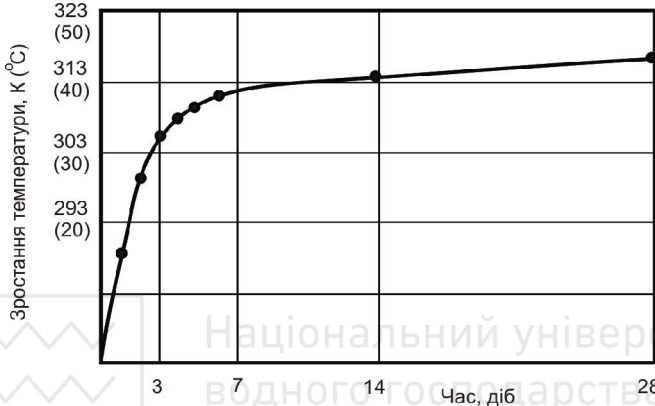


Рис. 3.6. Пříklad кривої підйому температури бетону, який тверднув у адіабатичних умовах

Початкова температура 286,4 К. Температура бетону у віці 7 діб – 310,4 К; у віці 28 діб – 317,4 К:

$$\Delta t_7 = \left(1 + \frac{1,05}{1,958}\right)(310,4 - 286,4) = 36,87 \text{ К};$$

$$\Delta t_{28} = \left(1 + \frac{1,05}{1,958}\right)(317,4 - 286,4) = 47,63 \text{ К}.$$

5. За формулою (3.20) знаходимо питоме тепловиділення цементу в бетоні q , кДж/кг за даний проміжок часу, відповідно в 7 (q_7) і 28 (q_{28}) діб:

$$q_7 = \frac{3,008}{0,21} 36,87 = 521,1 \text{ кДж / кг};$$



$$q_{28} = \frac{3,008}{0,21} 47,63 = 682,2 \text{ кДж/кг.}$$

3.12. Розрахувати тепловиділення бетону з $V/C=0,4$, виготовленого на портландцементі М400 при пропарюванні, якщо температура бетону $t_6=80^\circ\text{C}$. Тривалість теплової обробки $\tau=6,25$ год.

Знайдемо кількість градусо-годин, що витрачені при теплової обробці бетону: $t_6\tau=80 \cdot 6,25=500$ град-год.

За номограмою (рис. 3.7) визначаємо тепловиділення бетону:

$$Q=230 \text{ кДж/кг.}$$

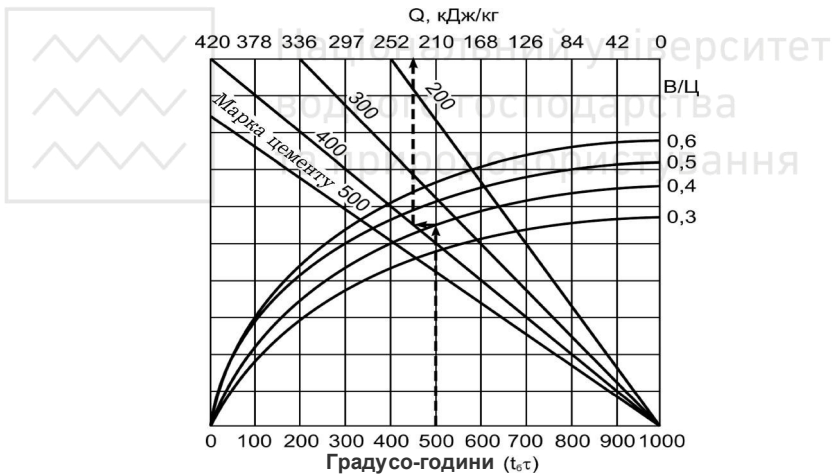


Рис. 3.7. Номограма для визначення тепловиділення бетону, виготовленого на портландцементі, при теплової обробці

3.13. Розрахувати теплопровідність зразків з різних видів бетону і співставити отримані значення з довідковими даними.

Розрахунок виконуємо за формулою В.П.Некрасова, (3.17), запропонованою для матеріалів з вологістю 3%.



Види бетонів, для яких виконані розрахунки, їх густина, довідкові дані з теплопровідності у Вт/м·°С та результати розрахунків наведені нижче:

Вид бетонів	Густина, кг/м ³	Теплопровідність, Вт/м·°С	
		довідкова	розрахункова
Важкий на кварцовому піску і щебені	2200	1,2	1,048
Легкий на доменному шлаку	1800	0,7	0,83
Керамзитобетон	1200	0,41	0,51
Пінобетон	600	0,16	0,20
Пінобетон	300	0,08	0,07

Аналіз отриманих даних свідчить, що для взятих зразків бетонів різних видів розходження між довідковими та розрахунковими даними з теплопровідності знаходяться в діапазоні 15...20%.

3.14. Знайти параметри порової структури бетону за кінетикою водопоглинання при безперервному гідростатичному зважуванні, (рис. 3.8). Маса сухого зразка $m_c=815$ г; насиченого водою при звичайному зважуванні $m_{нас}=866$ г, при гідростатичному зважуванні – $m'_{нас}=512$ г.



Рис. 3.8. Ваги лабораторні для гідростатичного зважування

1. Максимальне водопоглинання зразка за масою:

$$W_m = \frac{866 - 815}{815} \cdot 100 = 6,26\%;$$



2. Середня густина зразка:

$$\rho_o = \frac{815}{866 - 512} = 2,31 \text{ г/см}^3;$$

3. Максимальне водопоглинання зразка за об'ємом:

$$W_o = 6,26 \cdot 2,31 = 14,5\%;$$

4. Водопоглинання при $0,632 W_m$:

$$W_t = 0,632 \cdot 6,26 = 3,96\%;$$

5. За кривою водопоглинання (рис. 3.9) при $W_t = 3,96\%$ $t_1 = 0,65$ год. За номограмою (рис. 3.10) знаходимо при $t_1 = 0,65$ год. $\lambda = 1,54$.

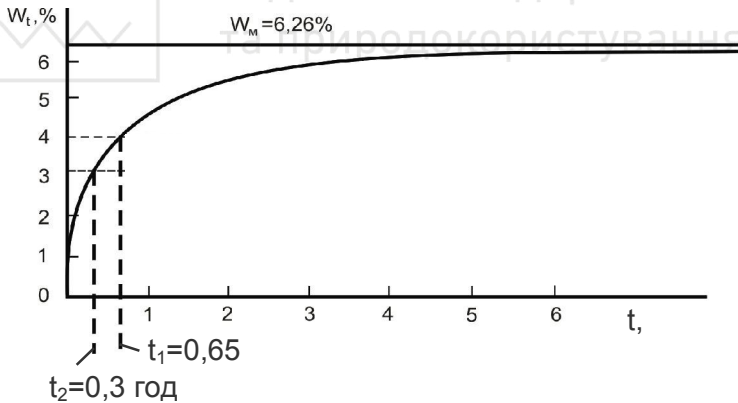


Рис. 3.9. Крива водопоглинання бетонного зразка

6. Водопоглинання при $0,5 W_m = 6,26 \cdot 0,5 = 3,13\%$.

7. За кривою водопоглинання (рис. 3.9) при $W_{t_2} = 3,13\%$, $t_2 = 0,3$ год. За номограмою (рис. 3.10) знаходимо при $t_2 = 0,3$ $\alpha = 0,5$.

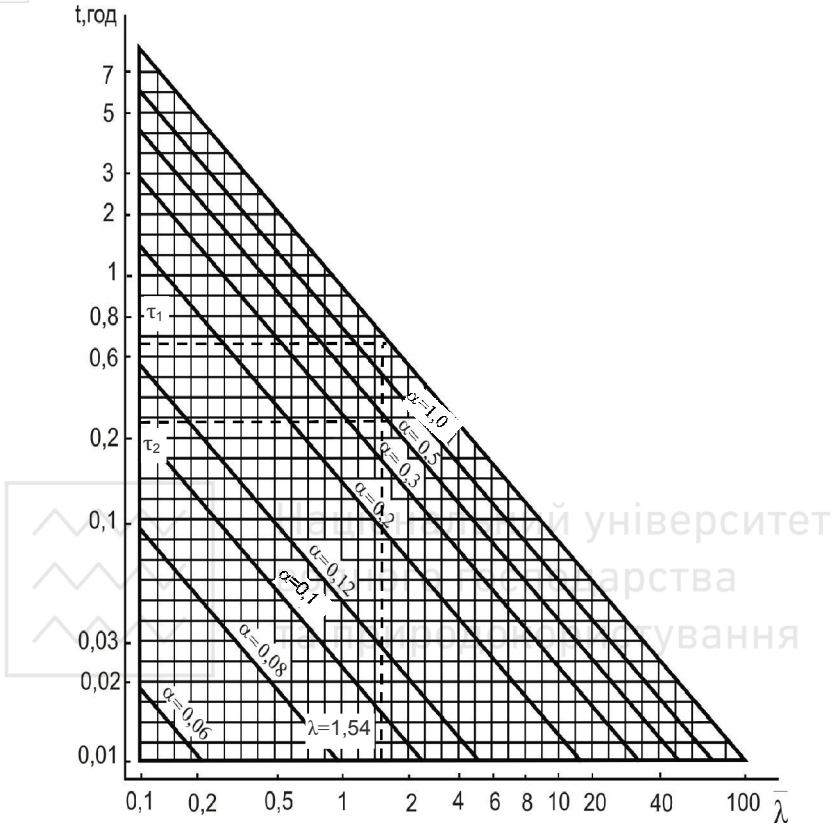


Рис.3.10. Номограма для визначення параметрів порової структури бетону за кінетикою водопоглинання (безперервний метод)

Вправи

3.11. При витримуванні у вологих умовах бетонні вироби розмірами 10x10x60 см мали середнє арифметичне значення маси 14,5 кг та вологість 7,5%. Яку середню густину будуть мати вироби при нормованій вологості 3%.



3.12. Зразки бетону однакового складу кубічної форми з розміром ребра 9,8; 10,1 та 12,2 см мали після витримування у лабораторії масу відповідно 2,38; 2,41 та 2,45 кг. Після висушування вони мали вагу відповідно 2,22; 2,31 та 2,38 кг, а після витримування у воді до постійної маси – 2,42; 2,50 та 2,55 кг. Знайти вологість зразків та їх водопоглинання за масою та об'ємом.

3.13. Водопроникний канал має напір води 3 м. Товщина бетонного облицювання 0,2 м, допустимі фільтраційні витрати води через бетон облицювання $0,004 \text{ л}/(\text{діб}\cdot\text{м}^2)$. Визначити необхідні значення коефіцієнта фільтрації (K_f) та марки за водонепроникністю бетону для облицювання каналу (W). Знайти значення цементно-водного відношення ($\text{Ц}/\text{В}$) бетону (марка портландцементу М500), що забезпечує необхідну марку за водонепроникністю. Для знаходження $\text{Ц}/\text{В}$ бетону використати формулу В.П. Сізова:

$$W = A(R_c / 10(\text{Ц} / \text{В} - 0,5)), \quad (3.31)$$

де R_c – марочна міцність цементу на стиск. Коефіцієнт A прийняти рівним 1.

3.14. Знайти за даними лабораторних випробувань, наведеними нижче, коефіцієнт кореляції між показниками водопоглинання бетону (B_n) та його маркою за водонепроникністю (W), а також відповідне рівняння регресії.

B_n , % за масою	3,2;	3,5;	3,9;	4,1;	4,5;	5,1;	6,1.
W	14;	12;	10;	8;	6;	4;	2.

3.15. Знайти загальний об'єм пор та об'єм відкритих капілярних пор бетону зразків, розміри і маса яких вказані у вправі 3.12, якщо середнє арифметичне значення дійсної густини подрібненого у порошок бетону $\rho_6=2780 \text{ кг}/\text{м}^3$.

3.16. Знайти об'єм відкритих некапілярних пор (об'єм міжзернових порожнин, $\text{П}_{\text{мз}}$ у %), а також об'єм умовно-замкнених пор ($\text{П}_{\text{у.з}}$) та показник мікропористості бетону $\text{П}_{\text{мк}}$.



Об'єм зразка бетону $V=980 \text{ см}^3$, об'єм зразка, визначений у об'ємометрі без попереднього висушування і парафінування після насичення водою протягом 24 год. і витримування протягом 10 хв. на решітці, $V_1=921 \text{ см}^3$, дійсна густина подрібненого у порошок бетону $\rho_0=2780 \text{ кг/м}^3$, середня густина бетону $\rho_0=2320 \text{ кг/м}^3$, водопоглинання $W=6,8\%$, сорбційна вологість за об'ємом при відносній вологості повітря від 95 до 100%. $W_c = 3,5\%$.

3.17. Визначити за аналізом кінетики водопоглинання при безперервному гідростатичному зважуванні, у якого з двох досліджених бетонів середній розмір відкритих капілярних пор менший.

Маса сухих зразків: №1 – 805 г, №2 – 825 г, насичених водою при звичайному зважуванні: №1 – 858 г, №2 – 875 г, при гідростатичному зважуванні: №1 – 532 г, №2 – 563 г. Водопоглинання за 0,65 год. зразків: №1 – 3,85%, №2 – 4,10%, за 0,3 год.: №1 – 3,1%, №2 – 3,45%.

3.18. Визначити орієнтовно за формулою В.П. Некрасова теплопровідність(λ) зразків бетону у Вт/(м $^\circ$ С) за різною густиною (d), кг/м 3 : 2350, 2100, 1750, 1430, 930 та 550. Побудувати графік залежності $\lambda=f(d)$.

Розрахувати за формулою $R_T = \delta / \lambda$ якою повинна бути товщина огорожуючої конструкції δ у м для того, щоб забезпечити однаковий термічний опір $R_T=0,586 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ при застосуванні бетонів з густиною 1750, 930 та 550 кг/м 3 .

3.19. Теплопровідність газобетонів з маркою за середньою густиною D450, $\lambda=0,110$, D650, $\lambda=0,160$ та D900, $\lambda=0,240$ Вт/(м $^\circ$ С). Якою має бути товщина стіни з цих матеріалів при забезпеченні однакового термічного опору $R_T=0,710 \text{ м}^2 \cdot \text{°C /Вт}$.

3.20. Побудувати графік підйому температури при випробуванні зразків бетону однакового складу на двох різних видах цементу (загальнобудівельного призначення та сульфатостійкому) в адиабатичному калориметрі.



Підвищення температури бетону з поправкою на теплоємність форми об'ємом 1 л обчислити за формулою:

$$\Delta t = \left(1 + \frac{C_{\phi}}{C_{б.с}}\right)(t - t_o), \quad (3.31a)$$

де C_{ϕ} – теплоємність форми;

$C_{б.с}$ – теплоємність бетонної суміші;

t_o – початкова температура бетонної суміші;

t – температура бетону наприкінці даного проміжку часу.

Склад бетону: Ц=280 кг/м³; П=620 кг/м³; ШЦ=1270 кг/м³; В=-180 кг/м³. Маса форми з кришкою 4,5 кг. Питома теплоємність матеріалу форми 4,2 кДж/(кг·°С). Початкова температура бетону 15°С, температура бетону на портландцементі загальнобудівельного призначення у віці 1 доба – 31°С, 3 доби – 38°С, 7 діб – 50°С, 28 діб – 55°С, на сульфатостійкому цементі відповідно 25; 31; 42; 46°С.

3.21. Знайти за результатами випробувань у адіабатичному калориметрі, наведеними у попередній вправі, питоме тепловиділення цементів у віці 7 та 28 діб.

3.22. Розрахувати очікуване тепловиділення бетонів у віці 7 діб на рядовому та сульфатостійкому цементах. Склад бетону наведений у вправі 3.20. Питоме тепловиділення прийняти за результатами випробувань (вправа 3.21).

3.23. За номограмою (рис. 3.7) знайти та порівняти розрахункові значення тепловиділення бетонів при тепловій обробці. Вихідні дані:

Бетон	Марка цементу	В/Ц	Температура бетону, °С	Тривалість твердіння, год
1	500	0,4	80	8
2	500	0,6	80	12
3	400	0,3	80	12
4	400	0,5	80	10
5	500	0,4	60	10
6	400	0,4	80	12



3.3. Міцність бетону

Міцність бетону є основною його характеристикою, яка визначає несучу здатність бетонних та залізобетонних конструкцій. Мірою міцності є *границя міцності* – максимальне напруження, при якому має місце руйнування матеріалу.

Величина показника міцності зразків залежить від характеру прикладених зусиль. Найважливішим міцнісним показником бетону є його міцність на стиск. З іншими міцнісними показниками (міцністю при розтязі, зрізі, розколюванні та ін.) вона пов'язана кореляційними залежностями.

При проектуванні бетонних та залізобетонних конструкцій залежно від їх призначення встановлюють *класи бетону за міцністю*, тобто їх нормативні показники міцності, задані з певною, як правило 95%, забезпеченістю. Клас бетону (C) залежить від середньої міцності (f_{cm} , МПа):

$$C = f_{cm} (1 - tV_c), \quad (3.32)$$

де V_c – коефіцієнт варіації міцності бетону; t – коефіцієнт, який характеризує прийняту при проектуванні забезпеченість класу бетону (при зазвичай прийнятій забезпеченості 0,95 $t=1,64$).

При нормативному коефіцієнті варіації $V_c=13,5\%$ (0,135) середню міцність можна визначити за формулою:

$$f_{cm} = C / 0,778. \quad (3.32a)$$

Класи звичайних та високоміцних бетонів за міцністю на стиск, нормовані ЕН 206-1 та ДБН В.2.6-98:2009, наведені в табл. 3.17.

Контроль міцності бетону за кожним видом нормованої міцності здійснюють із використанням даних контролю попередніх партій у наступному порядку (ДСТУ Б В.2.7-214:2009):

- визначають міцність бетону кожної партії, виготовленої протягом *аналізованого періоду*;



- обчислюють характеристики однорідності міцності бетону за аналізований період;
- обчислюють за характеристиками однорідності міцності бетону в аналізованому періоді необхідну міцність бетону для наступного *контрольованого періоду*.

Таблиця 3.17

Класи бетону за міцністю на стиск

Клас бетону за міцністю на стиск	Мінімальна міцність на стиск зразків-циліндрів діаметром 150 мм і довжиною 300 мм у віці 28 діб, МПа	Мінімальна міцність на стиск зразків-кубів із ребром 150 мм у віці 28 діб, МПа
Звичайні бетони		
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
Високоміцні бетони		
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Визначення міцності бетону в партії здійснюють на основі результатів випробувань зразків бетону або неруйнівними методами. Партією бетону вважають об'єм бетонної суміші, виготовленої на одному технологічному комплексі за регламентований час.



Міцність бетону у МПа розраховується з точністю до 0,1 МПа.

Розрахункові формули для визначення міцності бетону наведені в табл. 3.18, 3.19, 3.20.

Таблиця 3.18

Розрахункові формули для визначення міцності бетону

№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.33	Необхідна середня міцність бетону, МПа	$f_{cm} = k_t C_n,$ <p>де C_n – значення класу бетону за міцністю на стиск, осьовий розтяг або розтяг при згині, МПа, у проектному або проміжному віці, що зазначений у нормативній або проектній документації (<i>характеристична міцність бетону</i>); k_t – коефіцієнт необхідної міцності для усіх видів бетонів, що приймається залежно від середнього значення групового коефіцієнта варіації міцності бетону V_{cm} (табл.3.19)</p>
3.34	Необхідна середня міцність бетону до введення статистичного контролю, МПа	$f_{cm} = 1,1 \frac{C_n}{k_b},$ <p>де k_b – коефіцієнт, що приймається залежно від виду бетону (табл.3.20).</p>
3.35	Коефіцієнт варіації міцності бетону в партії, %	$V_c = \frac{S_m}{f_{cm}} \cdot 100,$ <p>де f_{cm} – середня міцність бетону в партії ($f_{cm} = \sum_{i=1}^n f_{ci} / n$), де f_{ci} – одиничне значення міцності бетону, МПа, n – загальна кількість одиничних значень міцності бетону в партії); S_m – середнє квадратичне відхилення міцності бетону в партії.</p>



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.36	Середнє квадратичне відхилення міцності бетону, МПа	$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n-1}}$
3.37	Середнє квадратичне відхилення міцності бетону при $n \leq 6$, МПа	$S_m = \frac{W_m}{a},$ <p>де W_m – розмах одиничних значень міцності бетону в контрольованій партії, що визначається як різниця між максимальним і мінімальним одиничними значеннями міцності, МПа; a – коефіцієнт, що залежить від числа одиничних значень (n): n: 2 3 4 5 6 a: 1,13 1,60 2,06 2,33 2,50</p>
3.38	Середнє значення групового(між партійного) коефіцієнта варіації міцності бетону, %	$V_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{ci} n_i}{\sum_{i=1}^N n_i},$ <p>де V_{ci} – коефіцієнт варіації міцності бетону кожної i-ої з n проконтрольованих партій бетону; n_i – число одиничних значень міцності бетону в кожній i-ій з n партій бетону; N – число проконтрольованих партій бетону; $\sum_{i=1}^N n_i$ – загальне число одиничних значень міцності бетону за аналізований період (не менше 30).</p>



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.39	Середній внутрішньо-серійний коефіцієнт варіації міцності бетону, %	$V_{cm} = \frac{W_{cm}}{df_{cm}}, \text{ де}$ <p>d – коефіцієнт, що приймається залежно від кількості зразків n у серії: при $n=2, d=1,13; n=3, d=1,69; n=4, d=2,06; n=6, d=2,50$.</p> $W_{cm} = \frac{\sum_{j=1}^{30} W_{cj}}{30}, f_{cm} = \frac{\sum_{j=1}^{30} f_{cmj}}{30},$ $W_{cj} = f_{i_{\max}} - f_{i_{\min}},$ <p>де $f_{j_{\max}}$ та $f_{j_{\min}}$ – максимальне та мінімальне значення міцності бетону в кожній серії зразків, МПа; f_{cmj} та W_{cj} – середня міцність та розмах міцності бетону в кожній серії зразків, МПа;</p>
3.40	Міцність бетону на стиск, МПа	$f_{cm} = (\alpha \cdot F \cdot k_w) / A,$ <p>де F – руйнівне навантаження, Н; A – площа робочого перерізу зразка, мм²; k_w – поправочний коефіцієнт для ніздрюватого бетону, який враховує вологість зразків на момент випробування; α – масштабний коефіцієнт для приведення міцності бетону до міцності бетону в зразках базового розміру та форми.</p>



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.41	Міцність бетону на осьовий розтяг, МПа	$f_{ct} = (\beta \cdot F \cdot k_w) / A$, де β – масштабний коефіцієнт.
3.42	Міцність бетону на розтяг при розколюванні, МПа	$f_{ct.sp} = (\gamma \cdot 2F \cdot k_w) / (\pi \cdot A)$, де γ – масштабні коефіцієнти для приведення міцності бетону до міцності бетону в зразках базового розміру та форми.
3.43	Міцність бетону на розтяг при згині, МПа	$f_{ct.f} = (\delta \cdot F \cdot l \cdot k_w) / (a \cdot b^2)$, a – ширина поперечного пере-різу призми, мм (см); b – висота поперечного перерізу призми, мм; l – відстань між опорами при випробуваннях зразків-призм на розтяг при згині, мм; δ – масштабний коефіцієнт.

Таблиця 3.19

Значення коефіцієнта необхідної міцності k_t

Коефі- цієнт варіації міцності бетону V_{cm} , %	Значення коефіцієнта необхідної міцності k_t для бетону			
	усіх видів (крім щільних силікат- них, ніздрюватих) і конструкцій, окрім масивних гідротехнічних	для щільного силікатно- го бетону	для авто- клавного ніздрю- ватого бетону	для масивних гідротех- нічних конструкцій
6 і менше	1,07	1,06	1,08	1,09
7	1,08	1,07	1,09	1,10
8	1,09	1,08	1,10	1,11
9	1,10	1,09	1,12	1,13
10	1,14	1,12	1,13	1,14
11	1,18	1,14	1,14	1,16



продовження табл. 3.19

Коефі- цієнт варіації міцності бетону $V_{ст}, \%$	Значення коефіцієнта необхідної міцності k_t для бетону			
	усіх видів (крім щільних силікат- них, ніздрюватих) і конструкцій, окрім масивних гідротехнічних	для щільного силікатно- го бетону	для авто- клавного ніздрю- ватого бетону	для масивних гідротех- нічних конструкцій
12	1,23	1,18	1,17	1,18
13	1,28	1,22	1,22	1,20
13,5	1,31	1,25	1,24	1,21
14	1,33	1,27	1,26	1,22
15	1,38	1,33	1,32	1,23
16	1,43	1,39	1,37	1,25
17	Область недопустимих значень k_t	1,46	1,43	1,28
18			1,50	1,32
19			1,57	1,36
20	Область недопустимих значень k_t			1,39
21 і більше				

Таблиця 3.20

Значення коефіцієнта k_b залежно від виду бетону

Вид бетону	Коефіцієнт k_b
Для всіх бетонів (крім ніздрюватого та щільного силікатного)	0,78
Ніздрюватий	0,70
Щільний силікатний	0,75

Форма та розміри зразків для визначення міцності бетону наведені в табл. 3.21, схеми випробувань на рис.3.11...3.13.

Значення масштабних коефіцієнтів визначають експериментально. Для окремих видів бетонів їх допускається приймати згідно табл. 3.22.



Форма і номінальні розміри зразків для визначення
міцності бетону

Показник міцності	Форма зразка	Розміри зразка	
		Параметр розміру	Розмір, мм
Міцність на стиск і на розтяг при розколюванні, МПа	Куб	Довжина ребра	100; 150; 200; 300
	Циліндр	Діаметр d	100; 150; 200; 300
		Висота h	2d
Міцність на осьовий розтяг, МПа	Призма	Переріз a×a	100×100; 150×150; 200×200
		Висота h	4 a
	Циліндр	Діаметр d	100; 150; 200; 300
		Висота h	2d
Міцність на розтяг при згині та розколюванні, МПа	Призма	Переріз a×a	100×100; 150×150; 200×200
		Висота h	4a

Примітки. 1. Допускається застосовувати зразки інших розмірів і форми: куби з ребром завдовжки 70 мм; призми розміром (70×70×280) мм; циліндри висотою, що дорівнює відповідному діаметру при визначенні міцності на розтяг при розколюванні, і висотою, що дорівнює від двох до чотирьох діаметрів при визначенні міцності на осьовий розтяг. 2. При визначенні міцності на осьовий розтяг допускається застосування зразків вісімок, на стиск – половинок зразків-призм, отриманих після випробувань на розтяг при згині.

Значення коефіцієнта k_w для ніздрюватого бетону приймають залежно від його вологості W_0 , %: при $W_0=0\%$ – $k_w=0,8$; $W_0=10\%$ – $k_w=1,0$; $W_0=20\%$ – $k_w=1,10$; $W_0 \geq 25\%$ – $k_w=1,15$. При проміжних значеннях вологості бетону значення коефіцієнта k_w визначають лінійною інтерполяцією. Для інших видів бетону значення коефіцієнта k_w дорівнює одиниці.



Таблиця 3.22

Значення масштабних коефіцієнтів для окремих видів бетонів

Форма і розміри зразка, мм	Коефіцієнти, що застосовуються при				
	стиску, α всіх видів бетонів, крім ніздрюва того	розтягу при розколюванні γ		розтягу при згині	осьово- му розтягу β
		важко го бетону	дрібнозер нистого бетону	важкого бетону δ	
Куб із розміром ребра або квадратна призма із розміром сторони:					
70	0,85	0,78	0,87	0,86	0,86
100	0,95	0,88	0,92	0,92	0,92
150	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	1,05	1,10	1,05	1,15	1,08
300	1,10	-	-	1,34	-
Циліндр (діаметр×висо- ту):					
100×200	1,16	0,98	0,99	-	-
150×300	1,20	1,13	1,08	-	-
200×400	1,24	-	-	-	-
300×600	1,28	-	-	-	-

Примітка. Для ніздрюватого бетону з середньою густиною менше 400 кг/м^3 масштабний коефіцієнт α слід приймати рівним 1,0 незалежно від розмірів і форми зразків. Для бетону з середньою густиною 400 кг/м^3 і більше масштабний коефіцієнт α для циліндрів діаметром і заввишки 70 мм, що вибурувались, і кубів з ребром завдовжки 70 мм, що випилювались, приймають рівним 0,90, а для циліндрів діаметром і заввишки 100 мм і кубів з ребром завдовжки 100 мм – рівним 0,95.

Міцність бетону (крім ніздрюватого) визначають як середньоарифметичне значення в серії:



- із двох зразків – за двома зразками;
- із трьох зразків – за двома зразками з найбільшою міцністю;
- із чотирьох зразків – за трьома зразками з найбільшою міцністю;
- із шести зразків – за чотирма зразками з найбільшою міцністю.

У разі відбраковування дефектних зразків міцність бетону в серії зразків визначають за всіма зразками, що залишилися, якщо їх не менше двох. Результати випробувань серії з двох зразків у разі відбраковування одного зразка не враховують.

Для *прискороного визначення міцності* бетону при твердненні в нормальних умовах застосовують експериментально встановлену градувальну залежність між нею і міцністю зразків, що тверднули при тепловій обробці. Теплову обробку зразків проводять за режимами, наведеними в табл. 3.23.

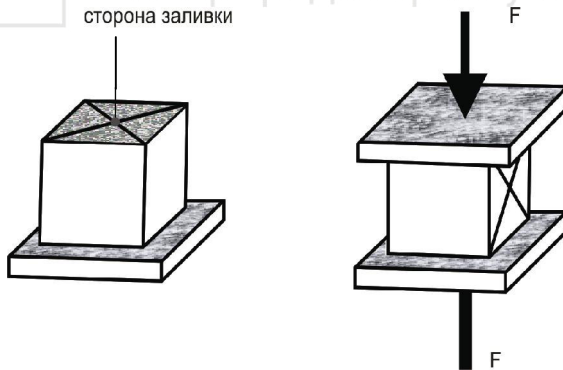


Рис. 3.11. Схема випробувань на стиск

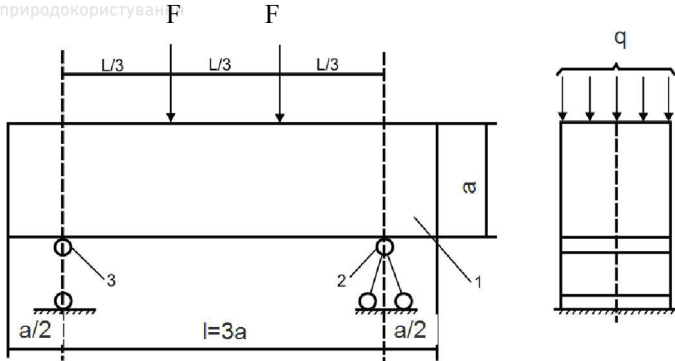


Рис. 3.12. Схема випробувань на розтяг при згині:
1 – зразок-призма; 2 – нерухома опора; 3 – рухома
опора

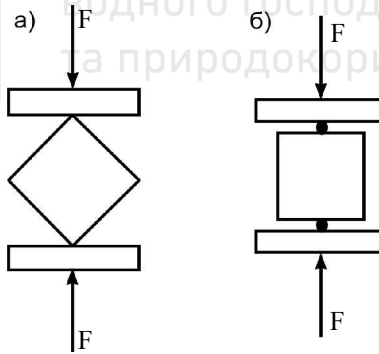


Рис.3.13. Схема випробування кубів розколюванням:
а – в положенні “на ребро”; б – в положенні “по грані” за
допомогою металевих стержнів



Режими теплової обробки зразків бетону для прискороного визначення міцності

Етапи тверднення	Температура, °С	Режим I		Режим II	
		Номіналь на тривалість, год	Граничні відхилення, хв	Номіналь на тривалість, год	Граничні відхилення, хв
Попередня витримка на повітрі	20±5	2	±15	1	±5
Прогрів у воді	70±2	16	±15	4,5	±5
Охолодження на повітрі до розпалублення	20±5	0,5	±5	0,5	±5
Охолодження на повітрі після розпалублення	20±5	1	±10	1	±10
Загальна тривалість тверднення	-	19,5	±25	7	±15

Градувальну залежність встановлюють для бетонів одного проектного віку, що приготовлені з однакових матеріалів незалежно від складу і його класу.

Градувальну залежність приймають лінійною, типу:

$$f_{cm} = \epsilon_0 + \epsilon_1 f'_{cm}, \quad (3.44)$$

де f'_{cm} – міцність бетону при прискороному твердненні.

Перехідний коефіцієнт K обчислюють за формулою:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f_{cm}}{f'_{cm}}, \quad (3.45)$$

де N – число серій зразків при прискороному твердненні і в проектному віці.



При використанні перехідного коефіцієнту міцність бетону в проектному віці знаходять за формулою:

$$f_{cm} = Kf'_{cm}. \quad (3.46)$$

Міцність бетону при застосуванні неруйнівних методів визначають за попередньо встановленими градувальними залежностями між міцністю зразків на стиск та непрямими характеристиками міцності.

Розрізняють механічні та фізичні неруйнівні методи (рис. 3.14).



Рис. 3.14. Класифікація методів неруйнівного контролю

Механічні методи базуються на кореляційних зв'язках між міцністю та іншими механічними характеристиками бетону (твердістю, пружністю, здатністю до пластичних деформацій та ін.), а також зусиллями, що викликають його місцеві руйнування.

Механічні методи неруйнівного контролю застосовують для визначення всіх видів нормованої міцності, а також при прийманні конструкцій та їх обстеженні. Область застосування



того чи іншого методу залежить від граничних значень вимірюваної міцності (табл. 3.24).

Таблиця 3.24

Граничні значення міцності бетону при застосуванні механічних неруйнівних методів

Найменування методу	Граничні значення міцності бетону, МПа
Пружний відскок і пластична деформація	5-50
Ударний імпульс	10-70
Відрив	5-60
Сколювання ребра	10-70
Відрив зі сколюванням	5-100

Метод пластичних деформацій для визначення міцності бетону здійснюється за допомогою молотка К.П. Кашкарова, приладів ДПГ-4, ДПГ-5 та ін. (рис. 3.15).

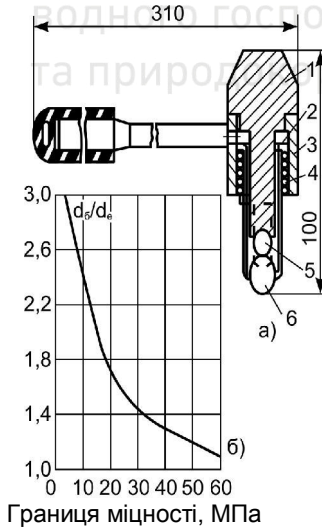


Рис. 3.15. Молоток конструкції К.П. Кашкарова: а – загальний вигляд; б – градувальний графік; 1 – корпус; 2 – стакан; 3 – головка; 4 – пружина; 5 – кулька; 6 – стержень; d_s – діаметр відбитку на бетоні; d_e – діаметр відбитку еталону



За методом пружного відскоку працюють склерометри-молотки Шмідта (рис. 3.16), методом ударного імпульсу прилади ІПС-МГ, Онікс-25 та ін.(рис. 3.17).



Рис. 3.16. Молоток Шмідта



Рис.3.17 Прилад ІПС-МГ

За методами відриву, відриву зі сколюванням і сколювання ребра застосовують гідравлічні преси-насоси (ГПНВ-5, ГПНС-4 та ін.), (рис. 3.18).

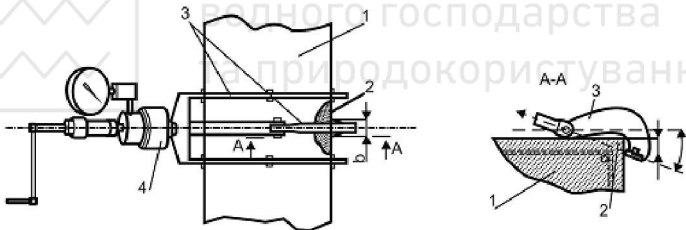


Рис. 3.18. Прилад для випробування методом сколювання ребра: 1 – конструкція, що випробується; 2 – бетон, що сколюється; 3 – пристрій УРС; 4 – прилад

При *фізичних методах* застосовуються кореляційні зв'язки міцності бетону зі швидкістю розповсюдження в ньому ультразвукових хвиль та деякими іншими фізичними характеристиками (частотою коливань, інтенсивністю гамма-опроміювання при проходженні крізь бетон та ін.). Із фізичних методів на практиці застосовується ультразвуковий метод.

Ультразвуковий метод (ДСТУ Б В.2.7 – 226:2009) базується на зв'язку між міцністю бетону та швидкістю поширення ультразвукових коливань. Цей метод застосовують



для прискореного визначення міцності бетону на стиск класів С8/10...С30/37 збірних і монолітних конструкцій і споруд. Його застосовують також для визначення міцності бетону в процесі тверднення в теплових установках або в природних умовах.

Для ультразвукових вимірювань рекомендуються прилади УК-14ПМ, УК-39, Пульсар та ін., (рис. 3.19, 3.20).



Рис.3.19. Ультразвуковий прилад для контролю міцності Пульсар-1.0

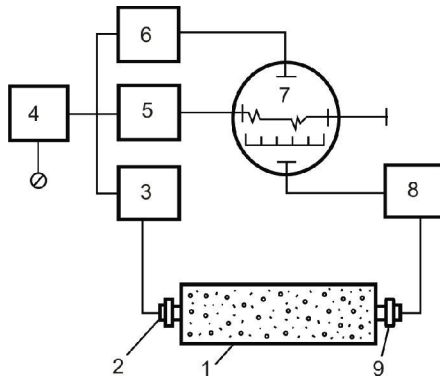


Рис. 3.20. Схема ультразвукового імпульсного приладу:
1 – бетонний зразок; 2 – випромінювач; 3 – генератор імпульсів; генератор; 5 – електронний пристрій для моделювання розповсюдження ультразвуку в бетоні; 6 – генератор міток; 7 – електронно-променева трубка; 8 – підсилювач; 9 – приймач



Градувальна залежність між міцністю бетону та непрямою характеристикою міцності може мати вигляд графіка, таблиці або формули. Градувальну залежність встановлюють на основі результатів випробувань зразків-кубів спочатку неруйнівним методом, а потім за ДСТУ Б В. 2.7 –214: 2009.

При встановленні градувальних залежностей рівняння “непряма характеристика – міцність” приймають лінійним за видом:

$$f_H = a_0 + a_1 \cdot H, \quad (3.47)$$

де f_H – міцність бетону, МПа;

H – непряма характеристика.

Коефіцієнти a_0 і a_1 розраховуються за формулами:

$$a_0 = f_{cm} - a_1 \cdot \bar{H}; \quad (3.48)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H}) \cdot (f_i - f_{cm})}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}. \quad (3.49)$$

Середні значення міцності f_{cm} , що визначені шляхом випробування зразків і непрямих характеристик \bar{H} , які необхідні для визначення цих коефіцієнтів, розраховують за формулами:

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}, \quad (3.50)$$

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N}, \quad (3.51)$$

де f_i , H_i – відповідно значення міцності та непрямої характеристики для окремих серій;

N – число серій (або окремих зразків), які використані для побудови градувальної залежності.



Після побудови градуовальної залежності за формулою (3.47) виконують її коригування шляхом відбракування одиночних результатів випробувань, що не задовольняють умові:

$$\frac{|f_i - f_{i,H}|}{S} \leq 2, \quad (3.52)$$

де S – залишкове середнє квадратичне відхилення, що визначається за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f_{i,H})^2}{N - 2}}, \quad (3.53)$$

де $f_{i,H}$ – міцність бетону в i -й серії зразків, що визначена за градуовальною залежністю за формулою (3.47)

Після відбракування градуовальну залежність встановлюють знову за формулами (3.47...3.49) за залишковими результатами випробування.

Градуовальна залежність повинна мати середнє квадратичне (залишкове) відхилення S , що не перевищує 12% при використанні серії зразків або 15% при використанні окремих зразків від середнього значення міцності f_{cm} . Якщо $\frac{S}{f_{cm}} \times 100\% \geq 12\%$ (або 15%), то проведення контролю та оцінка міцності за отриманою залежністю не допускається.

Приклади

3.15. За результатами виробничого контролю розрахувати статистичні параметри та міцнісні показники бетону.

Бетонний завод працює 7 днів на тиждень. Проби бетонної суміші відбирають 1 раз на добу. У табл. 3.25 приведені результати контролю міцності бетону класу С 12/15 за один місяць.



Прийmemo в якості партії тижневий обсяг випуску бетону. Так як число результатів у партії 7, для обчислення середньоквадратичного відхилення застосуємо формулу (3.36). Коефіцієнт варіації міцності бетону в окремих партіях розраховуємо за формулою (3.35). Середнє значення коефіцієнта варіації міцності бетону за аналізований період можна знайти за формулою (3.38). Оскільки в розглянутому прикладі в кожній партії була однакова кількість результатів, то формула (3.38) може бути замінена на більш просту:

$$V_{cm} = \sum_{i=1}^N \frac{V_c}{N}. \quad (3.54)$$

Таблиця 3.25

Результати контролю міцності бетону

Тижд.1 Дні	$f_{c,i}$ МПа	Тижд.2 Дні	$f_{c,i}$ МПа	Тижд.3 Дні	$f_{c,i}$ МПа	Тижд.4 Дні	$f_{c,i}$ МПа
1	21,5	1	24,2	1	20,8	1	23,2
2	24,6	2	19,4	2	21,7	2	26,4
3	21,8	3	21	3	24,5	3	23
4	20,4	4	20,3	4	22,8	4	21,3
5	21	5	23,1	5	20,7	5	24,1
6	23,4	6	22,5	6	23,8	6	23,6
7	22,1	7	23,2	7	24	7	23
$n=7$		$n=7$		$n=7$		$n=7$	
$f_{cm},$ МПа	22,1		22,0		22,6		23,5
$S_m,$ МПа	1,44		1,75		1,57		1,54
$V_c,$ %	6,5		8,0		6,9		6,5

У даному прикладі $N=4$ і $V_{cm} = (6,5+8,0+6,9+6,5)/4=7\%$.

Необхідна середня міцність бетону (на зразках-кубах) у проектному віці у відповідності з формулою (3.33) і табл. 3.25 для бетону класу С12/15 повинна бути $f_{cm}=1,08 \cdot 15=16,2$ МПа. Враховуючи, що фактичні значення міцності бетону f_{cm} всіх партій вищі необхідної міцності, вони підлягають прийманню.



3.16. *За результатами випробувань, що виконані в лабораторії бетонного заводу, необхідно визначити міцність на стиск і розтяг при згині важкого бетону з двох видів бетонної суміші – з максимальною крупністю заповнювача 20 мм і 40 мм, а також бетону, відібраного з конструкції дорожнього покриття (максимальна крупність заповнювача – 20 мм). Очікуваний клас бетону за міцністю на стиск – C16/20. Внутрішньосерійний коефіцієнт варіації (V_{cm}) міцності бетону на зразках, що виготовляються з бетонної суміші – 4%, відібраних з конструкцій – 5%.*

Враховуючи найбільший розмір заповнювача та значення V_{cm} , для визначення міцності на стиск бетону з бетонних сумішей виготовлено зразки-куби з розмірами ребра 100 і 150 мм двох серій по 3 зразки в кожній. Розмір ребра зразків-кубів, що відібрані з дорожнього покриття прийнято 100 мм.

Для визначення міцності на розтяг при згині для бетону з бетонної суміші з максимальною крупністю заповнювача 20 мм і 40 мм виготовлено дві серії по 3 зразки призм розмірами відповідно 100×100×400 мм і 150×150×600 мм, з дорожнього покриття відібрані три зразки-призми розмірами 100×100×400 мм.

Після нормального тверднення у віці 28 діб зразки були випробувані. Дефектів структури та аномального характеру руйнування за результатами візуального огляду не зафіксовано. Результати випробувань наведені в табл. 3.26.

Міцність на стиск і розтяг при згині бетону обчислювали за формулами (3.40 та 3.43). Значення масштабних коефіцієнтів прийняті згідно з табл. 3.22. Для зразків-кубів із розміром ребра 100 мм $\alpha=0,95$, 150 мм $\alpha=1,0$; для зразків-призм 100×100×400 мм $\delta=0,88$; 150×150×600 мм $\delta=1,0$. Відстань між опорами l при випробуванні зразків-призм завдовжки 400 мм прийнята 300 мм, 600 мм – 450 мм.

Міцнісні показники бетону розраховувались для кожної серії як середнє арифметичне значення двох найбільших результатів.



Результати випробувань бетону на міцність

Міцнісний параметр	Вид зразків бетону	Розміри зразків, мм	Максимальна крупність заповнювача, мм	Середнє значення руйнівного навантаження(за двома найбільшими значеннями) $10^4 \cdot \text{мм}^2$	Середнє значення площі робочого перерізу зразків, $10^4 \cdot \text{мм}^2$	Середня границя міцності, МПа
Міцність на стиск	Куби з бетонної суміші	100x100x100 150x150x150	20 40	28,5 58,4	1,0 2,25	27,1 25,5
	з дорожнього покриття	100x100x100	20	27,3	1,01	25,7
Міцність на розтяг при згині	Призми з бетонної суміші	100x100x400	20	1,41	1,01	3,9
		150x150x600	40	2,57	2,25	3,4
	з дорожнього покриття	100x100x400	20	1,44	1,02	3,9

3.17. На бетонному заводі з одних і тих самих матеріалів випускають бетон з проектною міцністю від 25 до 50 МПа. Очікувану міцність при нормальному твердненні у віці 28 діб визначають прискореним методом. Розрахувати градувальну залежність.

Для встановлення градувальної залежності між міцністю бетону при прискореному твердненні (f'_{cm}) і в проектному віці при нормальному твердненні (f_{cm}) було випробувано 25 паралельних серій контрольних зразків різних марок бетону, виготовлених із однакових матеріалів.

Результати випробувань наведені в табл. 3.27.



Таблиця 3.27

Результати випробувань серій контрольних зразків

Номери проб	Міцність бетону, МПа		Номера проб	Міцність бетону, МПа	
	при прис- кореному твердненні (f'_{cm})	при нормаль- ному тверд- ненні у віці 28 діб (f_{cm})		при прис- кореному твердненні (f'_{cm})	при нормаль- ному тверд- ненні у віці 28 діб (f_{cm})
1	25,2	39,3	14	26,5	41,8
2	28,9	41,6	15	25,4	33,1
3	32,9	42,6	16	20,0	34,3
4	32,3	47,6	17	19,6	36,0
5	36,6	49,7	18	12,8	19,2
6	21,2	32,3	19	15,3	24,8
7	22,3	33,7	20	17,0	30,6
8	39,2	47,2	21	20,5	30,2
9	31,8	42,6	22	19,0	30,4
10	27,0	36,3	23	18,8	33,4
11	33,9	42,3	24	22,8	33,4
12	35,9	47,0	25	19,7	31,2
13	29,5	44,1			

Для визначення коефіцієнтів рівнянь градувальної залежності визначають середньоарифметичні значення величини (\bar{f}'_{cm}) і (\bar{f}_{cm}):

$$\bar{f}'_{cm} = \frac{25,2 + 28,9 + 32,9 + \dots + 19,7}{25} = 25,4 \text{ МПа};$$

$$\bar{f}_{cm} = \frac{39,3 + 41,6 + 42,6 + \dots + 31,2}{25} = 37,0 \text{ МПа}.$$

За формулами (1.22 і 1.23) розраховуємо коефіцієнти регресії лінійного рівняння (3.48):



$$a_1 = \frac{(25,2 - 25,4)(39,8 - 37,0) + \dots + (19,7 - 25,4)(31,2 - 37,0)}{(25,2 - 25,4)^2 + (28,9 - 25,7)^2 + \dots + (19,7 - 25,4)^2} = 0,98;$$

$$a_0 = 37,0 - 0,98 \cdot 25,4 = 10,6.$$

У відповідності з формулою (3.44) градувальна залежність "міцність при прискореному твердненні – міцність у проектному віці" описується рівнянням:

$$f_{cm} = 10,6 + 0,98 \cdot f'_{cm}.$$

Графік цього рівняння та результати випробувань зразків наведені на рис. 3.21.

Коефіцієнт кореляції (r) і середньоквадратичне відхилення (S_r), яке характеризує точність отриманої залежності, визначають за формулами (1.8) і (1.2):

$$r = \frac{(25,2 - 25,4)(39,8 - 37,0) + \dots + (19,7 - 25,4)(31,2 - 37,0)}{\sqrt{[(25,2 - 25,4)^2 + \dots + (19,7 - 25,4)^2][(39,8 - 37,0)^2 + \dots + (31,2 - 37,0)^2]}} = 0,93$$

$$S_r = \sqrt{\frac{(39,8 - 10,6 - 0,98 \cdot 25,2)^2 + \dots + (31,2 - 10,6 - 0,98 \cdot 19,7)^2}{25}} = 2,68 \text{ МПа}.$$

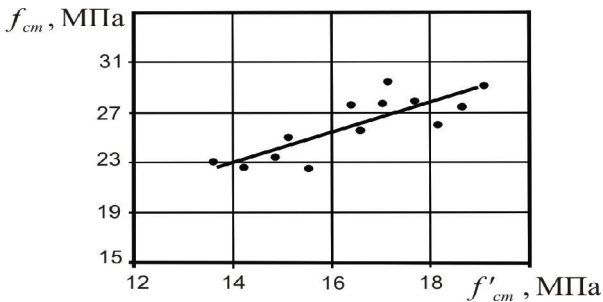


Рис. 3.21. Графік градувальної залежності



3.18. На бетонозмішувальному заводі випускають бетон класу $C 16/20$. Розрахувати необхідний для прискореного контролю коефіцієнт K для переходу від міцності бетону при прискореному твердненні до міцності при нормальному твердненні.

Для розрахунку коефіцієнта K випробовували 13 паралельних серій контрольних зразків. Середні результати випробувань контрольних зразків по кожній серії наведені в табл. 3.28.

Визначаємо: $\bar{f}_{cm} = 26,0$ МПа.

Підставляючи дані табл. 3.28 у формулу (3.45), отримуємо:

$$K = \frac{1}{13} \left(\frac{23,4}{14,8} + \frac{22,6}{14,2} + \dots + \frac{26,1}{18,1} \right) = 1,59.$$

Величину середнього квадратичного відхилення визначаємо за формулою (3.53):

$$S = \frac{(23,4 - 1,59 \cdot 14,8)^2 + \dots + (26,1 - 1,59 \cdot 18,1)^2}{11} = 0,654 \text{ МПа}$$

У зв'язку з тим, що

$$\frac{S}{\bar{f}_{cm}} \cdot 100 \% = \frac{0,654}{26,0} \cdot 100 \% = 2,52 \% < 12 \%,$$

допускається проведення контролю міцності прискореним способом.



Середні результати випробувань контрольних зразків по кожній серії

Номер серії	Міцність бетону, МПа		Відношення f_{cm} / f'_{cm}
	при прискореному твердненні (f'_{cm})	при нормальному твердненні у віці 28 діб (f_{cm})	
1	14,8	23,4	1,58
2	14,2	22,6	1,59
3	15,1	25,1	1,66
4	13,6	23,2	1,70
5	15,5	22,6	1,46
6	17,1	29,7	1,74
7	17,7	27,8	1,57
8	17,0	27,9	1,64
9	18,6	27,4	1,47
10	16,4	27,7	1,69
11	19,0	29,1	1,53
12	16,5	25,9	1,60
13	18,1	26,1	1,44

3.19. Розрахувати градувальну залежність при визначенні міцності методом відскоку за допомогою склерометру.

Для встановлення залежності між значеннями відскоку та міцністю бетону було випробувано на протязі 5 діб 20 серій зразків-кубів розміром $100 \times 100 \times 100$ мм ($N=20$). Середні результати по кожній серії наведені в табл. 3.29.

Середні значення міцності f_{cm} та значення відскоку $H_{m(N)}$ обчислюємо за формулами:

$$f_{cm} = \frac{18,7 + 26,7 + \dots + 21}{20} = 24,5 \text{ МПа};$$

$$\bar{H} = \frac{17,7 + 18,6 + \dots + 17,3}{20} = 18,2.$$



За формулами (3.48) та (3.49) визначаємо значення коефіцієнтів a_1 і a_0 :

$$a_1 = \frac{(17,7 - 18,2) \cdot (18,7 - 24,5) + (18,6 - 18,2) \cdot (26,7 - 24,5) + \dots}{\frac{(17,7 - 18,2)^2 + (18,6 - 18,2)^2 + \dots}{+ (17,3 - 18,2) \cdot (21 - 24,5)} + (17,3 - 18,2)^2} = 3,5;$$

$$a_0 = 24,5 - 3,5 \cdot 18,2 = -39,2.$$

Градувальну залежність представляємо у вигляді рівняння:

$$f_H = 3,5 \cdot H - 39,2.$$

Значення міцності f_{iH} , які обчислені за градувальною залежністю, наведені в табл. 3.29.

Залишкове середнє квадратичне відхилення визначено за формулою (3.53):

$$S = \sqrt{\frac{(18,7 - 22,75)^2 + (26,7 - 25,9)^2 + \dots + (21 - 21,35)^2}{20 - 2}} = 2,36 \text{ МПа}.$$

Порівнюючи значення фактичної міцності f_i у серіях зразків із міцністю f_{iH} , яка визначена за градувальною залежністю, встановлюємо, що умова формули (3.52) не виконується для серії 19, яка підлягає відбракуванню.

За 19 серіями зразків, що залишилися, визначаємо нові значення f_{cm} та \bar{H} та коефіцієнтів a_0 , a_1 :

$$f_{cm} = 24,5 \text{ МПа}, \bar{H} = 18,2; a_1 = 3,6; a_0 = -41.$$

Визначаємо значення f_{iH} (див. табл. 3.29) та обчислюємо середнє квадратичне відхилення $S=2,1$ МПа.



Таблиця 3.29

Середні результати досліджень

Но- мер серії	Значен- ня непря- мої ха- рактери- стики, Н	Міцність бетону, МПа			$\frac{ f_{iH} - f_i }{S}$	
		за ре- зульта- тами на стиск f_i	за градуєвальною залежністю f_{iH}		до від- брако- вування	після відбра- ковування
			до відбра- ковування	після відбра- ковування		
1	17,7	18,7	22,75	22,72	1,72	1,91
2	18,6	26,7	25,90	25,96	0,34	0,35
3	17,8	24,0	23,10	23,08	0,38	0,44
4	18,1	23,6	24,15	24,16	0,23	0,27
5	16,0	16,0	16,80	16,60	0,34	0,29
6	19,2	27,6	28,00	28,12	0,17	0,25
7	17,8	25,3	23,10	23,08	0,93	1,06
8	19,6	32,2	29,40	29,56	1,19	1,26
9	18,8	26,5	26,60	26,68	0,04	0,09
10	17,8	22,2	23,10	23,08	0,38	0,42
11	16,4	18,4	18,20	18,04	0,08	0,17
12	19,2	31,8	28,00	28,12	1,61	1,75
13	18,5	23,5	25,55	25,60	0,87	1,00
14	19,1	24,4	27,65	27,76	1,38	1,60
15	17,6	20,4	22,40	22,36	0,85	0,93
16	19,2	31,3	28,00	28,12	1,40	1,51
17	18,4	24,9	25,20	25,24	0,13	0,17
18	18,8	26,2	26,60	26,68	0,17	0,23
19	17,2	25,8	21,00	-	2,03	-
20	17,3	21,0	21,35	21,28	0,15	0,13

Для скоректованої градуєвальної залежності за всіма серіями зразків умова формули ($\frac{|f_i - f_{iH}|}{S} \leq 2$) тепер задовольняється. Таким чином, подальше корегування проводити не потрібно. Градуєвальну залежність, яку шукаємо, представляємо у вигляді рівняння:

$$f_H = 3,6H - 41.$$



За формулою $\frac{S}{f_{cm}} \times 100\%$ визначимо похибку отриманої

залежності. Оскільки $\frac{2,1}{24,5} \cdot 100\% = 8,57 < 12\%$, то визначення

міцності бетону за встановленою градуовальною залежністю може проводитися за стандартом.

3.20. Розрахувати градуовальну залежність між швидкістю ультразвуку та міцністю. Міцність бетону класу C20/25 контролювали у конструкції методом наскрізного прозвучування. Для встановлення градуовальної залежності між швидкістю ультразвуку та міцністю було випробувано протягом 5 днів 20 серій зразків-кубів розміром $100 \times 100 \times 100$ мм у віці від 4 до 8 год. після теплової обробки.

Результати випробувань наведені в табл.3.30.

Таблиця 3.30

Результати випробувань бетону для встановлення градуовальної залежності при ультразвуковому контролі міцності бетону

Номер серії	Швидкість ультразвуку, v_p , м/с	Міцність бетону, МПа			$\frac{f_{jH} - f_j}{S}$	
		за результатами на стиск, f_{jf}	за градуовальною залежністю f_{jH}		до відбракування	після відбракування
			до відбракування	після відбракування		
1	4029	20,6	21,35	21,26	0,27	0,27
2	4371	26,0	31,65	-	2,02	-
3	4080	22,0	22,89	22,92	0,32	0,37
4	4097	26,3	23,40	23,47	-1,04	-1,14
5	4116	21,1	23,97	23,09	1,03	1,21
6	4137	23,4	24,60	24,77	0,43	0,55
7	4136	26,0	24,57	24,74	-0,51	-0,51
8	4187	26,4	26,11	26,40	-0,10	0
9	4195	29,2	26,35	26,66	-1,02	-1,03



Номер серії	Швидкість ультразвуку, v_j , м/с	Міцність бетону, МПа			$\frac{f_{jH} - f_j}{S}$	
		за результатами на стиск, f_{jf}	за градууювальною залежністю f_{jH}		до відбракування	після відбракування
			до відбракування	після відбракування		
10	4248	25,5	27,94	28,38	0,87	1,16
11	4232	28,5	27,46	27,86	-0,37	-0,26
12	4285	25,0	29,06	29,58	1,45	1,85
13	4267	31,6	28,52	29,00	-1,10	-1,05
14	4037	21,7	21,59	21,52	-0,04	-0,07
15	4316	34,3	30,00	30,59	-1,54	-1,50
16	4352	30,5	31,08	31,76	0,21	0,51
17	4398	36,9	32,46	33,26	-1,59	-1,47
18	4393	34,5	32,31	33,09	-0,78	-0,57
19	4475	33,0	34,78	35,76	0,64	1,11
20	4436	33,3	33,60	34,49	0,11	0,48

Середнє значення міцності (f_{cm}) у МПа та швидкості ультразвуку (\bar{v}) у м/с становить:

$$f_{cm} = \frac{20,6 + 26,0 + \dots + 33,3}{20} = 27,79 ;$$

$$\bar{v} = \frac{4029 + 4371 + \dots + 4436}{20} = 4239,4 .$$

Рівняння градууювальної залежності приймаємо лінійним:

$$f_x = a_0 + a_1 x .$$



Визначаємо коефіцієнти a_0 і a_1 за формулами (3.48) та (3.49):

$$a_1 = \frac{(27,79 - 20,6)(4239,4 - 4029) + (27,79 - 26,0)(4239,4 - 4371) + \dots}{(4239,4 - 4029)^2 + (4239,4 - 4371)^2 + \dots + (4239,4 - 4436)^2} = 0,0301;$$

$$a_0 = 27,79 - 0,0301 \cdot 4239,4 = -99,92 .$$

Таким чином, градувальна залежність має вигляд $f_n = 0,0301v - 99,92$. Значення міцності f_{jn} , розраховані за градувальною залежністю, наведені в табл. 3.30.

Залишкове середнє квадратичне відхилення, яке визначене за формулою (3.53), складає:

$$S = \sqrt{\frac{(20,6 - 21,35)^2 + (26,0 - 31,65)^2 + \dots + (33,3 - 33,6)^2}{18}} = 2,8 \text{ МПа}.$$

Порівнюючи значення фактичної міцності f_j у серіях зразків із міцністю f_{jn} , яка визначена за градувальною залежністю, встановлюємо, що умова не виконується для серії 2, яка підлягає відбракуванню.

За 19 серіями зразків, які залишилися, розраховуємо нові значення f_j , \bar{v} і коефіцієнти скоректованої залежності a_0 і a_1 :

$$f_j = \frac{20,6 + 22,0 + \dots + 33,3}{19} = 27,88 \text{ МПа};$$

$$\bar{v} = \frac{4029 + 4080 + \dots + 4436}{19} = 4232,4 \text{ м / с};$$

$$a_1 = \frac{(27,88 - 20,6)(4232 - 4029) + (27,88 - 22,0)(4232,4 - 4080) + \dots}{(4232,4 - 4029)^2 + \dots + (4232,4 - 4436)^2} = 0,0325 ;$$

$$a_0 = 27,88 - 0,0325 \cdot 4232,4 = -109,68.$$



Визначивши значення f_{jH} , розраховуємо середнє квадратичне відхилення:

$$S = \sqrt{\frac{(20,6 - 21,26)^2 + (22,0 - 22,92)^2 + \dots + (33,3 - 34,49^2)}{17}} = 2,48 \text{ МПа}$$

Для скоригованої градуовальної залежності $\frac{|f_{j,x} - f_j|}{S} \leq 2\%$ за усіма серіями зразків. Таким чином, подальше коригування проводити не потрібно і градуовальна залежність, має вигляд:

$$f_n = 0,0325v - 109,68.$$

Графіки градуовальних залежностей до і після коригування наведені на рис. 3.22.

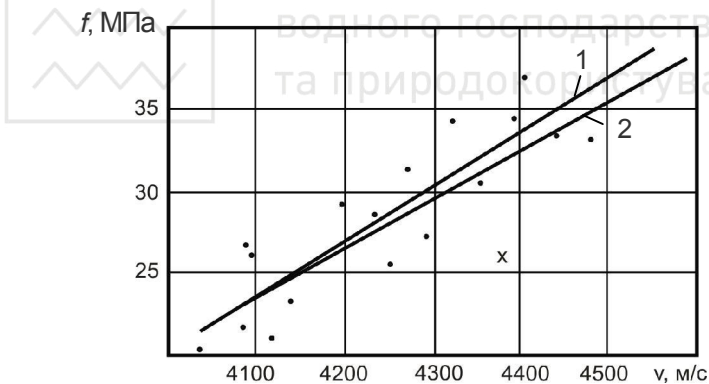


Рис. 3.22. Графіки градуовальних залежностей:
1 – градуовальна залежність до відбракування;
2 – скорегована градуовальна залежність;
x – відбраковані результати випробувань



Вправи

3.24. Знайти необхідну середню міцність бетону на стиск f_{cm} для бетону класу C20/25 за даними статистичного контролю. За аналізований період було виготовлено 5 партій бетону. Для кожної партії отримано за результатами контролю 7 одиничних значень міцності. Вихідні дані для розрахунків наведені нижче:

Партія	Міцність бетону на стиск, МПа
1	36,2; 34,3; 37,4; 32,5; 35,5; 33,1; 34,8
2	34,2; 32,2; 35,4; 36,1; 35,3; 32,2; 34,5
3	34,2; 32,5; 31,8; 36,3; 33,7; 35,5; 35,8
4	35,1; 32,8; 31,9; 36,1; 33,5; 32,4; 35,9
5	34,8; 33,1; 32,5; 36,2; 33,9; 35,1; 32,6

3.25. Річний випуск бетону C20/25 на заводі склав 20 тис.м³. За результатами статистичного контролю середній груповий коефіцієнт варіації міцності бетону на стиск у першому кварталі року склав 14%, другому – 12%, третьому – 9%, четвертому – 8%. Об'єм бетону, що був вироблений поквартально склав: 1–3; 2–7; 3–5; 4–5 тис.м³. Відповідно до досягнутих значень коефіцієнта варіації змінювали значення необхідної міцності для забезпечення проектного класу бетону. За даними лабораторії перехід від міцності бетону 30 МПа до 40 МПа призводить до необхідності пропорційного збільшення витрат цементу в середньому на 90 кг/м³. Яка економія цементу досягнута заводом за рахунок зниження коефіцієнта варіації міцності бетону.

3.26. При випробуванні на стиск партії зразків ніздрюватого бетону кубічної форми не враховані їх вологість та розміри. Випробування здійснювали до накопичення необхідних даних для введення статистичного контролю. Середня густина бетону в сухому стані 550 кг/м³.

Знайти середню міцність і клас бетону кожної серії в партії з урахуванням вологості та розмірів зразків.

Середні значення міцності бетону 5 серій зразків однакового складу наведені нижче:



Серія	Розміри зразків, мм	Вологість бетону, W_o , %	Середня міцність на стиск без урахування розмірів та вологості, МПа
1	100x100x100	0	3,5
2	100x100x100	10,3	5,7
3	150x150x150	7,8	5,4
4	150x150x150	12,4	6,1
5	150x150x150	13,5	5,9

Значення масштабних коефіцієнтів для кубічних зразків з розміром ребра 100 мм прийняти 0,95, 150 мм – 1,0. Значення коефіцієнтів залежно від вологості бетону: $W_o=0$, $K_w=0.8$; $W_o=10\%$, $K_w=1$; $W_o=20\%$, $K_w=1,10$.

3.27. Для важкого бетону проводили паралельно випробування міцності на стиск (f_{cm}), осьовий розтяг (f_{ct}) і розтяг при згині (f_{ctf}). Отримані результати в МПа наведені нижче:

f_{cm}	21,5	25,1	29,8	35,4	41,2	46,3	51,4	61,2
f_{ct}	1,8	2,05	2,2	2,45	2,8	2,95	3,05	3,1
f_{ctf}	2,9	3,3	3,9	4,4	4,7	4,9	5,2	6,1

Розрахувати коефіцієнти кореляції між міцнісними параметрами та рівняння регресії, що зв'язує міцність на стиск з міцністю на осьовий розтяг і розтяг при згині.

3.28. Для прискореного визначення проектної міцності бетону на стиск проведені паралельно випробування міцності бетону у віці 28 діб при нормальних умовах тверднення і при пропарюванні за двома режимами (табл. 3.31).

Таблиця 3.31

Результати випробувань бетону при нормальному твердненні і при тепловій обробці

№ проб	Міцність бетону, МПа			№ проб	Міцність бетону, МПа		
	при нормаль- ному твердінні	при тепловій обробці			при нормаль- ному твердінні	при тепловій обробці	
		режим 1	режим 2			режим 1	режим 2
1	21,2	13,7	10,8	6	51,6	40,2	30,9
2	27,5	19,8	15,4	7	54,8	42,1	31,7
3	33,4	21,7	18,7	8	59,5	46,4	34,5
4	39,1	29,3	22,6	9	63,4	47,5	36,1
5	45,5	35,4	25,4	10	68,8	48,1	39,5



Розрахувати рівняння регресії для прискореної оцінки проектної міцності бетону і зробити їх статистичний аналіз з визначенням середнього відхилення експериментальних і розрахункових значень і показників точності отриманих рівнянь.

3.29. Для контролю відпускну міцності бетону партії збірних конструкцій неруйнівним методом було відібрано 3 конструкції. На кожній конструкції вибрано по 2 ділянки, бетон на яких піддавався випробуванню. Знайти середнє квадратичне відхилення міцності бетону в партії конструкцій, використавши отримані дані:

Конст-рукція	Ділян-ки	Міц-ність, МПа	Конст-рукція	Ділян-ки	Міц-ність, МПа	Конст-рукція	Ділян-ки	Міц-ність, МПа
1	1	23,5	2	1	25,6	3	1	24,8
	2	27,4		2	21,4		2	27,9

Середнє квадратичне відхилення градуовальної залежності 2,4 МПа.

3.30. Для молотка конструкції К.П.Кашкарова градуовальну криву необхідно побудувати з двох ліній регресії. Першу вирішено побудувати за даними залежності відбитків на бетоні (d_6) і на еталонному сталевому стержні (d_e) у діапазоні міцності бетону 5...20 МПа, другу – 20...60 МПа.

Отримані дані:

$f_{cm} = 5 \dots 20$ МПа		$f_{cm} = 20 \dots 60$ МПа	
d_6/d_e	f_{cm_1}	d_6/d_e	f_{cm_2}
2,85	5,1	1,75	20,5
2,63	8,2	1,54	24,2
2,47	10,1	1,45	29,3
2,25	12,3	1,35	33,4
2,07	14,9	1,29	38,2
1,92	16,8	1,25	43,4
1,85	18,4	1,21	51,1
1,73	20,5	1,05	59,5



3.31. Міцність бетону в конструкціях вимірювали методом сколювання ребра і обчислювали за формулою:

$$f_{cm} = 0.058m(30p + p^2), \quad (3.55)$$

де m – коефіцієнт, що враховує крупність заповнювача;
 p – зусилля сколювання, кН. При крупності зерен заповнювача в бетоні до 20 мм $m=1$, до 40 мм $m=1,1$.

Побудувати графік зміни необхідного зусилля в кН при застосуванні методу сколювання ребра залежно від міцності бетону з максимальною крупністю заповнювача 40 мм у діапазоні 5...60 МПа.

3.32. При визначенні міцності бетону молотком Шмідта залежно від його поверхневої твердості змінюється величина відскоку бойка, яка фіксується на шкалі приладу. При постійній міцності величина відскоку змінюється від положення молотка до горизонталі в момент удару. За результатами випробувань отримані наступні усереднені дані:

Значення на шкалі приладу	Міцність при положенні молотка до горизонту, МПа	
	+90°	+30°
33	20,8	24,3
35	24,1	27,8
38	29,6	33,5
40	33,6	37,5
42	37,7	41,8
44	42,0	46,3
46	46,5	51,0
48	51,3	56,0
49	53,6	58,5
50	56,8	60,0

Розрахувати відповідні рівняння регресії.

3.33. Відкоригувати градуовальну залежність для визначення міцності бетону неруйнівним способом для бетону класу C12/15 за результатами випробувань 15 серій зразків кубів. Середні результати по кожній серії наведені в табл. 3.32.



Таблиця 3.32

Значення міцності бетону в МПа за результатами
випробувань і по градувальній залежності

Міцність бетону, МПа за результатами випробувань				Міцність бетону, МПа по градувальній залежності			
№ серії	f_{cm}^{ϕ}	№ серії	f_{cm}^{ϕ}	№ серії	f_{cm}^z	№ серії	f_{cm}^z
1	15,0	9	19,5	1	13,2	9	17,5
2	14,1	10	19,1	2	14,1	10	19,2
3	13,8	11	14,7	3	10,8	11	10,4
4	13,7	12	15,3	4	12,8	12	9,7
5	17,0	13	19,1	5	14,7	13	17,2
6	17,6	14	18,9	6	18,1	14	19,0
7	17,2	15	20,4	7	15,6	15	18,7
8	17,1			8	15,7		
			$\bar{f}_{cm}^{\phi} = 16,83$				$\bar{f}_{cm}^z = 15,13$

Для відбракування результатів випробувань використати умову (3.52).

3.4. Деформативні властивості бетону

Деформативні властивості характеризують здатність матеріалу змінювати свою форму та розміри під дією зовнішніх навантажень або під впливом температури та вологості оточуючого середовища, різних фізико-хімічних процесів. До першого виду деформацій належать силові деформації, що виникають при короткочасному або тривалому навантаженні (пружність, повзучість), до другого виду – температурно-усадочні (власні) деформації.

Пружні властивості бетону характеризуються *модулем пружності* – відношенням нормального напруження (σ) до відповідної відносної деформації (ϵ).

Для бетону характерні пружно-пластичні властивості, тому модуль пружності визначають при рівні навантаження, який відповідає ділянці діаграми σ - ϵ , що наближається до лінійної (рис. 3.23). Відповідно до ДСТУ Б В.2.7-217:2009



модуль пружності бетону знаходять при рівні навантаження 30% від руйнівного.

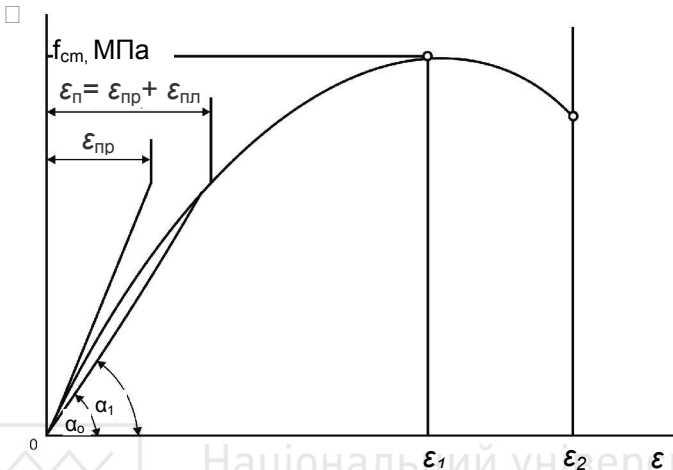


Рис. 3.23. Залежність "напруження-деформація" при стиску бетону:

$\epsilon_{пр}$ – пружна деформація; $\epsilon_{пл}$ – пластична деформація;
 ϵ_n – повна деформація

Пружні властивості бетону можуть характеризуватися як *статичним*, так і *динамічним модулем пружності*. Останній враховує напруження, котрі виникають при коливаннях зразка.

Поряд з модулем пружності пружні властивості бетону характеризують *коефіцієнтом Пуассона* – відношенням поперечних та повздовжніх деформацій зразків.

При тривалій дії постійного навантаження в бетоні розвиваються деформації повзучості. Згідно ДСТУ БВ.2.7-216:2009 визначається *лінійна відносна деформація повзучості* ϵ_{cc} – відносне зменшення лінійних розмірів навантаженого зразка в часі, викликане дією постійного зовнішнього навантаження.

До власних деформацій бетону, обумовлених зміною вологості бетону, належать *деформації усадки* або *набрякання*. Так, як і деформації повзучості, деформації усадки бетону визначають за ДСТУ БВ.2.7-216:2009 на трьох зразках-призмах, для яких співвідношення розмірів перерізу і висоти становить 4.

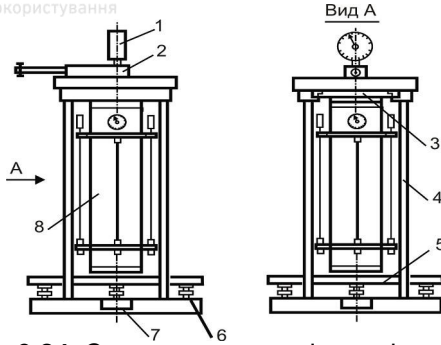


Рис.3.24. Схема пружинно-гідралічного пристрою для визначення деформацій повзучості:

1 – зразковий манометр; 2 – гідралічний домкрат плунжерного типу із гнучкою діафрагмою; 3 – поршень домкрата; 4 – стояки; 5 – опорна плита; 6 – регулювальні гвинти; 7 – тарілчасті пружини; 8 – зразок

За базовий зразок приймають призму з розмірами $150 \times 150 \times 600$ мм. Після розпалублення і до початку випробувань зразки зберігають в однакових, як правило, нормальних температурно-вологісних умовах.

Для визначення деформацій повзучості та усадки застосовують пристрої, схеми яких показані на рис. 3.24, 3.25 і 3.26.

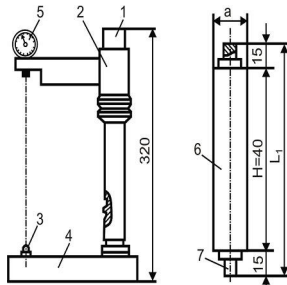


Рис.3.25 Схема пристрою для визначення деформацій усадки зразків з розмірами поперечного перерізу 40×40 мм:

1 – стояк; 2 – кронштейн; 3 – конусоподібний виступ;
4 – нижня опора; 5 – індикатор; 6 – зразок; 7 – репер;
а – розмір сторони поперечного перерізу зразка;
H – висота зразка; L_1 – база вимірів

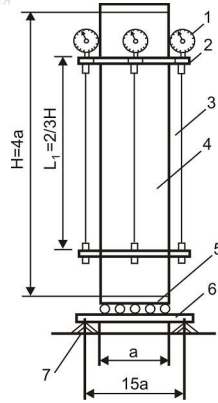


Рис. 3.26. Схема пристрою для визначення деформацій усадки зразків з розмірами поперечного перерізу більше 40x40 мм:

1 – індикатор годинкового типу; 2 – рамка для кріплення індикаторів; 3 – рухома штанга; 4 – зразок; 5 – металеві пластинки по торцях зразка; 6 – плоска зварена сітка; 7 – опора

Розрахункові формули для визначення основних деформативних властивостей за результатами випробувань наведені в табл. 3.33.

Таблиця 3.33

Розрахункові формули для визначення деформативних властивостей бетону

№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.56	Модуль пружності, МПа	$E_{\sigma} = \frac{\sum \Delta \sigma}{\sum \Delta \varepsilon_{np}}$ <p>де $\sum \sigma$ – сумарний приріст навантаження від умовного нуля до навантаження, що дорівнює 30% від руйнівного; $\sum \varepsilon$ – сумарний приріст відносної пружної повздовжньої деформації зразка.</p>



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.57	Динамічний модуль пружності, МПа	$E_{\delta} = 0,4l^2 f_n^2 \rho,$ де f_n – частота власних поздовжніх коливань; l – довжина; ρ – густина бетону.
3.58	Динамічний модуль пружності, МПа	$E_{\delta} = \frac{\rho v^2 (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu},$ де ρ – середня густина бетону; μ – коефіцієнт Пуассона; v – швидкість поширення ультразвукового імпульсу.
3.59	Динамічний модуль пружності	$E_{\delta} = \frac{E_{\delta}}{K},$ де $K=0,805...0,837$
3.60	Коефіцієнт Пуассона	$\mu = \frac{\sum \varepsilon_{2np}}{\sum \varepsilon_{1np}},$ де $\sum \varepsilon_{1np}$ і $\sum \varepsilon_{2np}$ – сумарний приріст відносно відповідно пружної поздовжньої та поперечної деформації зразка.
3.61	Відносні деформації повзучості	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_n - \varepsilon_{np} + \varepsilon(t) - \varepsilon_{cs},$ де ε_n і ε_{np} – середні значення повних і пружних деформацій, визначених при ступінчатому завантаженні; $\varepsilon(t)$ – середнє значення відносної деформації навантаженого зразка; ε_{cs} – середнє значення відносної деформації усадки.
3.62	Міра повзучості, МПа ⁻¹	$C_m = \varepsilon_{cc} / \sigma_0,$ де σ_0 – постійно діюче напруження; ε_{cc} – відносні деформації повзучості.



№ формули	Параметр	Розрахункова формула
3.63	Міра повзучості, МПа ⁻¹	$C_m(\tau) = C_m(28)\xi_r\xi_\theta\xi_\tau,$ <p>де $\xi_r, \xi_\theta, \xi_\tau$ – коефіцієнти, що враховують вплив розмірів перерізу елемента, вологості навколишнього середовища та віку бетону в момент прикладання навантаження.</p> $\varepsilon_{\bar{r}} = 0,9(0,7 + \frac{1}{\bar{r}});$ $\varepsilon_\theta = 1,54(\frac{1,35\bar{r}\theta}{100});$ $\varepsilon_\tau = 0,45 + \frac{30}{27 + \tau}.$ <p>де \bar{r} – приведений радіус перерізу елемента – $\bar{r} = F / p$, F – площа поперечного перерізу, p – периметр); θ – відносна вологість повітря, %; τ – тривалість тверднення, діб.</p>
3.64	Міра повзучості залежно від часу прикладеного навантаження, МПа ⁻¹	$C_m(\tau) = C_m(\frac{\tau}{a + \tau}),$ <p>де a – час прикладання навантаження; τ – вік бетону; C_m – гранична міра повзучості.</p>
3.65	Деформація усадки для окремого зразка	$\varepsilon_{cs}(\tau) = \frac{\Delta l(\tau)}{l},$ <p>де l – база вимірювання деформацій, мм; $\Delta l(\tau)$ – абсолютні деформації зразка, мм.</p>
3.66	Деформація усадки для серії зразків	$\varepsilon_{cs.m} = \varepsilon_{cs}\xi_r\xi_\theta$ <p>де $\xi_r = 0,1035(31 - \bar{r})$;</p> $\xi_\theta = 1,52[1 - (\frac{\theta}{100})^3],$ <p>де \bar{r} – розмір елемента; θ – відносна вологість повітря.</p>



Приклади

3.21. *Визначити деформації та модуль пружності бетону.* Для визначення модуля пружності бетону серію 3-х зразків призм розмірами 150x150x600 мм, які тверднули у нормальних температурно-вологісних умовах піддавали випробуванню навантаженням на гідравлічному пресі. Для вимірювання деформацій на бокових поверхнях зразків встановлювали тензometri, які дозволяли визначити відносні деформації з точністю не нижче $1 \cdot 10^{-5}$. База вимірювань була прийнята 100 мм і розташована на однаковій відстані від торців зразків. Очікуване руйнівне навантаження зразків було 60 МПа. Три зразки навантажували у три ступені, кожний з яких складав 6 МПа (10% очікуваного руйнівного навантаження). Початкове навантаження («умовний нуль») складало 1,8 МПа, швидкість навантаження – 0,6 МПа/с, тривалість витримки – 4...5 хв.

Отримані експериментальні дані наведені в табл. 3.34.

Таблиця 3.34

Результати визначення деформацій пружності бетону

Ступені навантаження	Напруження, МПа, $\Delta\sigma$	Відносна повздовжня деформація $\varepsilon_{пр} \cdot 10^5$			Середнє значення $\varepsilon_{пр} \cdot 10^5$
		Зразки бетону			
		1	2	3	
1	6	15,5	16,1	15,9	15,83
2	12	31,4	30,8	32,5	31,57
3	18	47,2	48,5	48,2	47,97
	$\Sigma\sigma=36$ МПа				$\Sigma\varepsilon_{пр}=95,37 \cdot 10^{-5}$

Розрахунок модуля пружності E_0 здійснюємо за формулою (3.56):

$$E_0 = \frac{\sum \sigma}{\sum \varepsilon_{пр}} = \frac{36}{95,37 \cdot 10^{-5}} = 0,3775 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 37750 \text{ МПа}.$$

3.22. *Обробити результати випробувань і визначити граничні значення деформацій повзучості бетону.*

У результаті випробувань базових зразків обчислені середні значення відносних деформацій повзучості бетону, які наведені в табл. 3.35.



Таблиця 3.35

Експериментальні та розрахункові дані для визначення
граничних значень деформацій повзучості бетону

Тривалість спостереження, діб	50	60	75	100	125	150	175	180
Відносна деформація повзучості, $\varepsilon_{cc} \cdot 10^5$	81,5	89	8,5	112	124	134	141	145
$Y_i = \frac{\Delta\tau}{\varepsilon_{cc}} \cdot 10^{-5}$, діб	0,614	0,674	0,761	0,889	1,008	1,119	1,241	1,241

Для обчислення умовно граничного значення відносних деформацій повзучості слід побудувати лінію регресії в координатах $[\frac{\Delta\tau}{\varepsilon_{cc}}; \Delta\tau]$, яка має вид: $\frac{\Delta\tau}{\varepsilon_{cc}} = A + B\Delta\tau$.

З цією метою вводимо позначки:

$$Y_i = \frac{\Delta\tau}{\varepsilon_{cc}}; X_i = \Delta\tau.$$

Обчислюємо значення $\frac{\Delta\tau}{\varepsilon_{cc}}$, (табл. 3.35) і наносимо їх на координатну сітку, як це показано на рис. 3.27.

За даними табл. 3.35 обчислюємо середні значення:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i; \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i;$$

їх дисперсії:

$$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2; S_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2;$$



кореляційний момент:

$$m_{1,2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y});$$

коефіцієнт кореляції:

$$r = \frac{m_{1,2}}{S_1 S_2},$$

де n – число точок вимірювань.

У результаті підстановки в ці формули значень із табл. 3.35 отримуємо:

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= 0,943 \cdot 10^5 \text{ дліб}; \bar{X} = 114,4 \text{ дліб}; S_1^2 = 2603,1; \\ S_1 &= 51,01 \text{ дліб}; S_2^2 = 0,0613 \cdot 10^{10} \text{ дліб}^2; S_2 = 0,2476 \cdot 10^5; \\ m_{1,2} &= 12,614 \cdot 10^5 \end{aligned}$$

Коефіцієнт кореляції:

$$r = \frac{12,614 \cdot 10^5}{51,01 \cdot 0,2476 \cdot 10^5} = 0,999.$$

Чисельні значення коефіцієнтів A і B у рівнянні регресії визначають за формулами:

$$A = \bar{Y} - B\bar{X}; B = \frac{m_{1,2}}{S_1^2};$$

Після підстановки одержимо: $B = 485; A = 0,389 \cdot 10^5$.

Рівняння регресії має вигляд:

$$\frac{\Delta \tau}{\varepsilon_{cc}} = (0,389 + 0,00485 \cdot \Delta \tau) \cdot 10^5 \text{ дліб}.$$



Значення котангенса кута нахилу прямої дає граничне значення відносної деформації повзучості за середніми точками вимірювання:

$$\operatorname{ctg}\beta = \varepsilon_{cc}(\infty) = \frac{1}{0,00485 \cdot 10^5} = 206,2 \cdot 10^{-5}.$$

Значення коефіцієнта α_τ визначається з рівняння регресії, де значення $\frac{\Delta\tau}{\varepsilon_{cc}}$ дорівнює нулю.

$$\alpha_\tau = \frac{A}{B} = \frac{0,389 \cdot 10^5}{0,00485 \cdot 10^5} = 80 \text{ діб}.$$

Результати обчислень наведені на рис. 3.26.

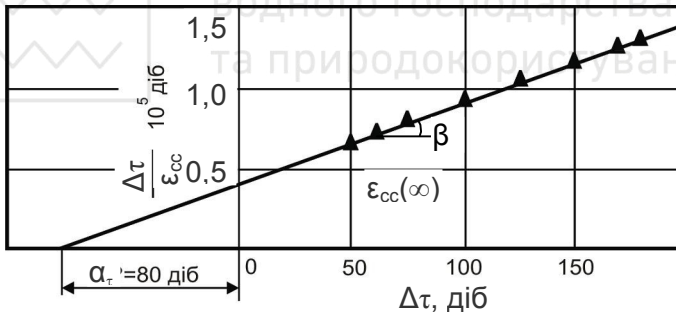


Рис. 3.26. Лінії регресії для визначення граничних значень відносних деформацій повзучості

3.23. *Визначити граничне значення усадки бетону за результатами випробувань 4^х зразків призми розміром поперечного перерізу 70 мм, що тверділи протягом 180 діб. Випробування проводились у кліматичній камері, в якій постійно підтримували температуру $(20 \pm 2)^\circ \text{C}$ та відносну вологість повітря $(60 \pm 5)\%$. Базу вимірювань деформацій прийняли 1000 мм.*



Абсолютні значення деформацій бетону знаходили за формулою:

$$\varepsilon_{cs} = L - L_1, \quad (3.67)$$

де L – розмір зразка, що змінюється в результаті усадки, мм;

L_1 – база вимірювання деформацій.

Для кожного зразка знаходили значення абсолютних деформацій як середній арифметичний приріст показань приладів по чотирьом граням. Значення відносних деформацій усадки зразків (табл. 3.36) знаходили за формулою (3.65).

Таблиця 3.36

Експериментальні та розрахункові дані для визначення граничних значень деформацій усадки

Тривалість спостережень, діб	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Середні арифметичні значення відносних деформацій усадки, $\varepsilon_{cs} \cdot 10^4$	3,7	4,1	4,5	4,8	5,1	5,3	5,5	5,6	5,62	5,64	5,65
$y_1 = \frac{\Delta\tau}{\varepsilon_{cs}} \cdot 10^4$	8,108	10,975	13,333	15,625	17,647	19,811	21,818	24,107	26,690	29,255	31,858

Для знаходження граничного значення деформацій усадки за середніми значеннями відносних деформацій усадки побудували діаграму в координатах $\Delta\tau/\varepsilon_{cs}(\tau) - \tau$, де $\Delta\tau$ – тривалість проведення випробувань від моменту початкового відліку. Початкове значення $\Delta\tau$ прийнято 30 діб.

Котангенс кута отриманої прямої регресії (рис.3.27) приймали як граничне значення деформацій усадки $\varepsilon_{cs}(\infty)$, а відрізок, що відтинається лінією регресії на продовженні осі абсцис, як параметр швидкості наростання деформацій α_{cs} .

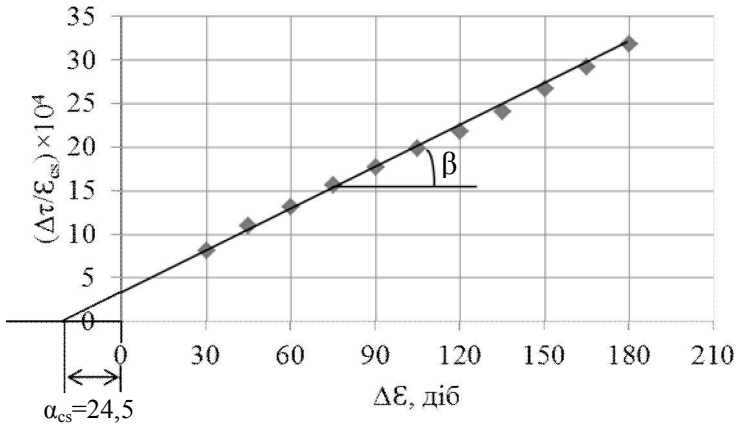


Рис. 3.27. Лінії регресії для визначення граничних значень відносних деформацій усадки

Враховуючи, що випробування виконані на зразках, які відрізняються від базових, граничні значення деформацій усадки множили на коефіцієнт $K=0,90$.

Знаходимо за формулами (1.13...1.14) чисельні значення коефіцієнтів у рівнянні регресії:

$$\frac{\Delta\tau}{\epsilon_{cs}} = (a + b\Delta\tau) \cdot 10^4 \text{ діб.}$$
$$b = 0,1537 \cdot 10^4. \quad a = 3,7685 \cdot 10^4.$$

Значення котангенса кута нахилу прямої дає граничне значення відносної деформації усадки:

$$\text{ctg}\beta = \epsilon_{cs}(\infty) = \frac{1}{b} = 6,5 \cdot 10^{-4}.$$



Значення коефіцієнта α_{cs} визначається з рівняння регресії при відношенні $\frac{\Delta\tau}{\varepsilon_{cs}} = 0$.

$$\frac{\Delta\tau}{\varepsilon_{cs}} = (a + b\Delta\tau) \cdot 10^4 \text{ діб.}$$

$$\alpha_{cs} = \frac{a}{b} = 24,5 \text{ діб.}$$

Вправи

3.34. Оцінити однорідність значень модуля пружності бетону. Експериментальні дані, що наведені нижче, отримані відповідно до ДСТУ БВ.2.7-217:2009.

Ступені навантаження, режим	Напруження, МПа $\Delta\sigma$	Середні значення відносної поздовжньої деформації $\varepsilon_{пр} \cdot 10^5$ серії зразків				
		1	2	3	4	5
		1	8	19,4	17,8	20,2
2	15	37,8	36,2	39,3	36,9	36,3
3	22	56,4	55,4	58,2	57,5	56,8

3.35. Для бетонів однакового складу з різним вмістом пластифікуючої добавки проведені випробування з метою визначення модуля пружності.

Отримані експериментальні дані наведені нижче

Вміст добавки, % маси цементу	$\sum\sigma/\sum\varepsilon_{пр} \cdot 10^5$			Вміст добавки, % маси цементу	$\sum\sigma/\sum\varepsilon_{пр} \cdot 10^5$		
	зразки				зразки		
	1	2	3		1	2	3
0	98,4	99,3	100,1	0,3	95,8	94,9	94,3
0,1	96,8	98,1	97,5	0,4	93,7	93,1	93,4
0,2	96,1	96,8	96,8	0,5	91,3	91,7	91,1

Розрахувати рівняння регресії модуля пружності бетону залежно від вмісту добавки.



3.36. За будівельними нормами коефіцієнт Пуассона для бетону масивних конструкцій приймається рівним 0.15. Визначити за експериментальними даними, наведеними нижче, фактичне значення коефіцієнта Пуассона і виконати статистичний аналіз отриманих результатів.

Сумарний приріст відносної пружної поздовжньої деформації $\sum \varepsilon_{2np} \cdot 10^5$					Сумарний приріст відносної поперечної деформації $\sum \varepsilon_{1np} \cdot 10^5$				
зразки					зразки				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
81,2	79,5	78,3	80,4	82,5	507,5	565,3	489,4	536,0	634,6

3.37. Визначити в якому діапазоні змінювалась частота власних поздовжніх коливань зразків бетонних призм при експериментальному визначенні динамічного модуля пружності бетону.

Вихідні дані для розрахунків приведені нижче.

Динамічний модуль пружності $E_d \cdot 10^3$, МПа	Довжина зразка, l , см	Густина бетону, ρ , кг/м ³
41	40	2350
45	40	2380
49	40	2390
52	40	2370
56	40	2385

3.38. Для визначення модуля пружності бетону за нормами США запропонована формула:

$$E_{\sigma} = 4540 \sqrt{f_{cm}}. \quad (3.68)$$

Розрахувати які відхилення у % мають значення модуля пружності при зміні міцності бетону, що розраховані за даною формулою та фомулою:



$$E_{\sigma} = \frac{52000 f_{cm}}{23 + f_{cm}}, \quad (3.69)$$

де f_{cm} – кубикова міцність бетону на стиск, МПа.

3.39. При випробуваннях зразків важкого бетону з різною міцністю (f_{cm} , МПа), визначені значення міри повзучості – питомі деформації зразків-призм у 28 добовому віці на одиницю постійно діючого напруження ($C_m \cdot 10^{-5}$, 1/МПа). Вони наведені нижче:

f_{cm} , МПа	11,5	20,3	25,5	32,2	39,1	51,5	60,3	79
$C_m \cdot 10^5$ 1/МПа	28,6	14,2	10,8	8,4	6,8	5,2	4,3	3,5

Побудувати графік у координатах f_{cm} – C_m та апроксимувати його функцією $C_m = K/f_{cm}$. Знайти значення K . Порівняти точність прогнозування міри повзучості при знайденому значенні K і $K = 25 \cdot 10^{-5}$, що рекомендується відомою формулою C_m .

3.40. Розрахувати очікувані значення міри повзучості бетону в конструкціях з класом бетону за міцністю на стиск С20/25 з різними значеннями приведенного радіуса перерізу, \bar{r} , см ($\bar{r} = F/p$, F – площа поперечного перерізу, p – периметр), відносної вологості навколишнього середовища θ , % та тривалості тверднення τ – діб. Міра повзучості бетону при завантаженні його у 28 діб

$$C_{m(28)} = 8,5 \cdot 10^5 \text{ 1/МПа}$$

Для розрахунків використати формули (3.63).

3.41. Розрахувати граничну усадку бетону за середніми значеннями відповідних усадочних деформацій зразків призм розмірами 100x100x400 мм (ϵ_{cs-10}^4), що наведені нижче:



Тривалість тверднення, днів $\epsilon_{cs,10}^4$	30	45	60	75	90	105	135	180
	2,9	3,4	3,8	4,2	4,6	4,9	5,1	5,2

Розрахувати вплив на граничну деформацію усадки бетону різних розмірів залізобетонних елементів, їх вологості. З цією метою використати формулу (3.66).

3.5. Стійкість бетону до дії фізико-механічних та хімічних впливів

Стиранисть. Стираність бетонів визначається згідно ДСТУ БВ.2.7-212:2009. Для бетонів, що застосовуються для покриттів доріг, підлог, сходів та інших конструкцій, випробування виконуються за допомогою круга стирання (рис. 3.28), для бетонів конструкцій, що використовуються для транспортування рідин, у складі яких присутні зважені абразивні речовини, за допомогою барабана стирання (рис. 3.29).

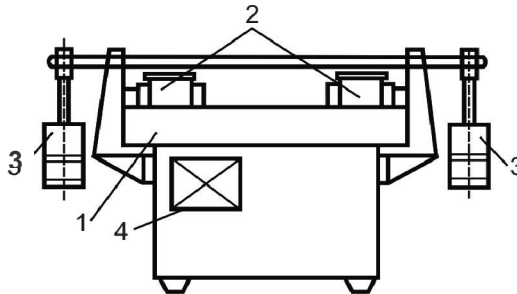


Рис.3.28. Круг стирання типу ЛКІ – 3
1 – диск; 2 – зразки, що випробовуються;
3 – навантажувальний пристрій; 4 – лічильник

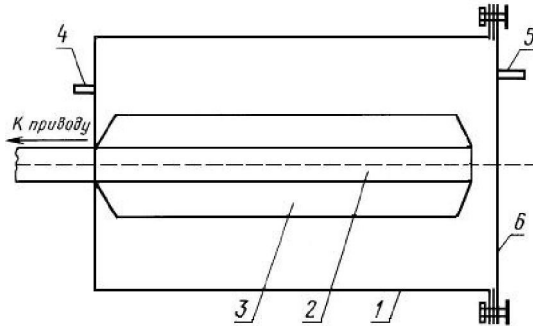


Рис. 3.29. Схема барабана стирання
1 – барабан; 2 – вал; 3 – крильчатка; 4 – патрубок
подачі води; 5 – патрубок зливу; 6 – з’ємна кришка

Стираність зразка на крузі стирання визначають як середнє арифметичне значення втрати маси на одиницю його площі, що піддається стиранню, з похибкою до $0,1 \text{ г/см}^2$:

$$\sigma_i = \frac{m_1 - m_2}{F}, \quad (3.70)$$

де m_1 і m_2 – відповідно маса зразка до і після випробувань;

F – площа стирання внутрішньої поверхні зразка, м^2 ;

Стираність бетону для серії зразків визначають за формулою:

$$\bar{\sigma}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}, \quad (3.71)$$

де n – число зразків у серії.

Стираність бетону при випробуванні у барабані стирання характеризують коефіцієнтом стирання K_{σ_i} . Для окремого зразка його обчислюють з похибкою до $0,1 \text{ кг/м}^2$ за формулою:



$$K_{\sigma_i} = \frac{m_1 - m_2}{\tau F}, \quad (3.72)$$

де τ – тривалість стирання зразків у барабані, год.

Для визначення стирання бетону серії зразків у барабані застосовують формулу:

$$\bar{K}_{\sigma_i} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{\sigma_i}}{n} \quad (3.73)$$

Витривалість. Витривалість бетону характеризує його здатність зберігати міцність при багаторазовому повторюванні навантаження. Випробування бетону на витривалість виконують згідно ДСТУ БВ.2.7-218:2009 на зразках-призмах стандартних розмірів (150x150x600 мм та ін.) за допомогою спеціальних машин (рис. 3.30) при багатократно повторюваних стискаючих навантаженнях.

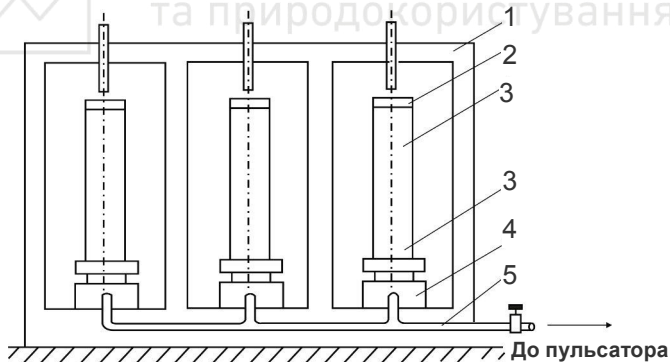


Рис. 3.30. Схема машини для випробування бетону на витривалість: 1 – рама машини; 2 – верхня гвинтова опора; 3 – зразок; 4 – гідродомкрат; 5 – маслопровід

Базові умови випробування передбачають 4 рівні навантаження – 0,9; 0,8; 0,7 і 0,6 від руйнівного з коефіцієнтом асиметрії циклу напружень (відношення мінімального



напруження до максимального) рівним 0,1 та частотою повторного навантаження 5...10 Гц.

За результатами випробувань обчислюють середнє значення числа циклів повторного навантаження за формулою:

$$\bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i}{n}, \quad (3.74)$$

де n_i – значення числа циклів окремого зразка;

n – число зразків у серії.

Якщо середнє значення числа циклів менше, ніж задане, бетон не відповідає встановленим вимогам до витривалості і склад бетону необхідно змінити.

За результатами випробувань встановлюють за допомогою рівняння регресії лінійну залежність:

$$\frac{\sigma_{max}}{f_{cm,prizm}} = A + B \lg \bar{n}, \quad (3.75)$$

де σ_{max} – максимальне напруження;

$f_{cm,prizm}$ – призмova міцність;

\bar{n} – число циклів, що відповідає руйнуванню зразка.

Гранична температура застосування. Граничну температуру застосування встановлюють для жаростійких бетонів. Для звичайних важких бетонів на портландцементі вона становить 200° С. У відповідності до ДСТУ БВ.2.7-249:2011 залежно від граничної температури застосування встановлюють класи жаростійких бетонів, які для портландцементних бетонів знаходяться в діапазоні ІЗ...І12 (відповідно граничні температури 300...1200° С). Для бетонів на інших видах в'язучих можливі також класи І13...І18. Граничну температуру застосування бетонів встановлюють, визначаючи їх залишкову міцність, яка характеризується процентним відношенням міцності бетону після нагрівання до гранично допустимої температури для бетонів класів ІЗ...І17 і



температури 800°C для бетонів більш високих класів до міцності бетону у проектному віці.

Для встановлення залишкової міцності зразки нагрівають після теплової обробки (витримка 7 год. при $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості 90...100%, підвищення температури 2 год зі швидкістю $50^{\circ}\text{C}/\text{год.}$, 48 год. при $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ та охолодження 4 год). Після теплової обробки зразки витримують у ванні з водою 7 діб.

Для бетонів класів И9 і вище нормують, крім залишкової міцності, температури, що відповідають деформаціям 4 та 40% або руйнуванню, (табл. 3.37).

Температури, що відповідають 4...40% деформаціям під навантаженням, визначають на зразках-циліндрах діаметром 36 ± 1 мм і висотою 50 ± 1 мм. Результати визначення деформацій під навантаженням оформляють у вигляді діаграми «температура-деформація».

Таблиця 3.37

Нормовані властивості жаростійких бетонів на портландцементі

Клас бетону	Залишкова міцність, %, не менше	Температура, що відповідає деформації під навантаженням, $^{\circ}\text{C}$, не менше	
		4%	40% або руйнуванню
И3	80	-	-
И6	50	-	-
И7	40	-	-
И8	30	-	-
И9	30	900	950
И10	30	1000	1050
И11	30	1080	1150
И12	30	1180	1250

Термостійкість. Термостійкість – здатність бетону витримувати різкі зміни температур від гранично допустимої до нормальної (20°C).

Випробування бетону на термостійкість виконують згідно ДСТУ БВ.2.7-249:2011.



Для бетонів із середньою густиною не менше 1500 кг/м^3 термостійкість T_1 визначають у водних теплозінах. Зразки поміщають у піч, попередньо розігріту до розрахункової температури, і витримують 40 хв. Коливання температури у печі допускаються в межах $\pm 20^\circ \text{C}$. Після 40 хв. витримки в печі зразки занурюють у ванну з водою кімнатної температури, ємністю 10 л. Зразки охолоджують у воді 5 хв., після виймання з води витримують 10 хв. при температурі $(20 \pm 5)^\circ \text{C}$. Потім нагрівання повторюють. Після кожної теплозміни воду у ванні змінюють.

Для бетонів із середньою густиною менше 1500 кг/м^3 і ніздрюватою структурою термічну стійкість T_2 визначають у повітряних теплозінах.

Кількість теплозмін, що викликала руйнування зразків або втрату бетоном 20% початкової маси, приймають за термічну стійкість у водних або повітряних теплозінах.

Для жаростійких бетонів встановлені марки за термостійкістю у водних теплозінах (T_1) та повітряних теплозінах (T_2):

T_1 – 5, 10, 15, 20, 30, 40;

T_2 – 10, 15, 20, 25.

Термічна стійкість бетону лінійно пов'язана з його коефіцієнтом термічного розширення. Він коливається в інтервалі $4 \dots 11 \cdot 10^{-6}$.

Морозостійкість. Морозостійкість бетону – це його здатність зберігати міцність та інші фізико-механічні властивості при багатократному заморожуванні та відтаванні у насиченому водою стані. Вона оцінюється *марками за морозостійкістю* (F) – встановленими нормами мінімальним числом циклів заморожування та відтавання зразків, що випробувані за базовими методами, при якому зберігаються у визначених межах початкові фізико-механічні властивості бетону. За ДСТУ Б В.2.7-47-96 встановлено два базових методи визначення морозостійкості та два прискорених (табл. 3.38).



Методи визначення морозостійкості бетону при
заморожуванні та відтаванні

Номер методу	Середовище насичення	Умови випробування		
		Середовище і температура заморожування, °С	Середовище відтавання	Вид бетону
Базові				
Перший	Вода	Повітряне -(18±2)	Вода	Всі види бетонів, крім бетонів дорожніх, аеродромних покриттів і бетонів конструкцій, що експлуатуються при дії мінералізованої води
Другий	5%-й водний розчин хлористого натрію	Повітряне -(18±2)	5%-й водний розчин хлористого натрію	Бетони дорожніх і аеродромних покриттів і бетонів конструкцій, що експлуатуються при дії мінералізованої води
Прискорені при багаторазовому заморожуванні та відтаванні				
Другий	5%-й водний розчин хлористого натрію	Повітряне -(18±2)	5%-й водний розчин хлористого натрію	Всі види бетонів, крім бетонів дорожніх і аеродромних покриттів і легких із середньою густиною, менше 1500 кг/м ³ , а також бетонів конструкцій, що експлуатуються при дії мінералізованої води



Номер методу	Середовище насичення	Умови випробування		
		Середовище і температура заморожування, °С	Середовище відтавання	Вид бетону
Третій	5%-й водний розчин хлористого натрію	5%-й водний розчин хлористого натрію, $-(50\pm 5)$	5%-й водний розчин хлористого натрію	Всі види бетонів, крім легких із середньою густиною менше 1500 кг/м^3
Прискорені при одноразовому заморожуванні				
Четвертий	Вода	Газ, $-(18\pm 2)$	-	Всі види бетонів, крім бетонів дорожніх і аеродромних покриттів
П'ятий	Вода	Повітряне $-(18\pm 2)$	Повітряне	Всі види бетонів, крім бетонів дорожніх і аеродромних покриттів

Показник марки бетону за морозостійкістю відповідає числу циклів заморожування та відтаювання зразків, визначеному при випробуванні базовими методами, при яких характеристики бетону зберігаються в нормованих межах та відсутні зовнішні ознаки руйнування.

Число циклів заморожування та відтавання, що відповідає певним маркам за морозостійкістю при різних методах випробування, наведено в табл. 3.39.



Таблиця 3.39

Число циклів заморожування-відтавання для бетону різних марок за морозостійкістю

Число циклів заморожування та відтавання для бетону марок	Методи випробувань			
	Перший (базовий)	Другий (базовий)	Другий (прискорений)	Третій (прискорений)
25	$\frac{15^*}{25}$	-	-	-
35	$\frac{25}{35}$	-	-	-
50	$\frac{35}{50}$	-	$\frac{8}{8}$	-
75	$\frac{50}{75}$	$\frac{50}{75}$	$\frac{13}{13}$	2
100	$\frac{75}{100}$	$\frac{75}{100}$	$\frac{20}{20}$	3
150	$\frac{100}{150}$	$\frac{100}{150}$	$\frac{20}{30}$	4
200	$\frac{150}{200}$	$\frac{150}{200}$	$\frac{30}{45}$	5
300	$\frac{200}{300}$	$\frac{200}{300}$	$\frac{45}{75}$	8
400	$\frac{300}{400}$	$\frac{300}{400}$	$\frac{75}{100}$	12
500	$\frac{400}{500}$	$\frac{400}{500}$	$\frac{100}{150}$	15
600	$\frac{500}{600}$	$\frac{500}{600}$	$\frac{150}{200}$	19
800	$\frac{600}{800}$	$\frac{600}{800}$	$\frac{200}{300}$	27
1000	$\frac{800}{1000}$	$\frac{800}{1000}$	$\frac{300}{450}$	35

Примітка: Над рискою зазначено число циклів, після якого проводиться проміжне випробування, під рискою – число циклів, що відповідає марці бетону за морозостійкістю.



Четвертий (дилатометричний) метод визначення морозостійкості бетону (ДСТУ Б В.2.7-50-96) реалізується за допомогою дилатометру. При застосуванні цього методу марку бетону за морозостійкістю встановлюють за максимальною відносною різницею об'ємної деформації бетонних і стандартного зразка. Стандартний зразок – зразок, що входить у комплект дилатометру, виготовлений з того ж матеріалу, що і дилатометр і має однакову з бетонними зразками форму і розміри.



Рис. 3.31. Диференційний дилатометр
ДОД –100К/З

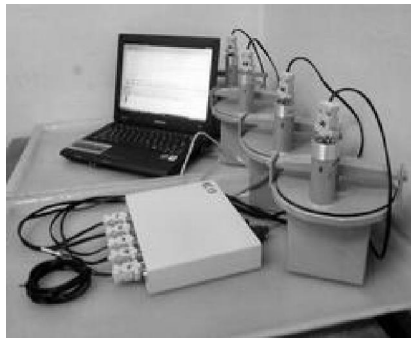


Рис. 3.32. Дилатометр ДОД –100К



Дилатометр зі зразками встановлюють у морозильну камеру, витримують 30 хв., а потім починають заморожування зі швидкістю $0,3^\circ \text{C/хв.}$ до досягнення температури $-(18 \pm 2)^\circ \text{C}$. На графіках фіксують криву різниці значень об'ємних деформацій бетонного та стандартного зразків під час заморожування (рис. 3.33).

Ділянка стрибкоподібної зміни об'ємних деформацій зумовлена переходом води в лід. Для серії із трьох бетонних зразків визначають максимальне відносне збільшення різниці об'ємних деформацій θ_i бетонних і стандартного зразків при заморожуванні.

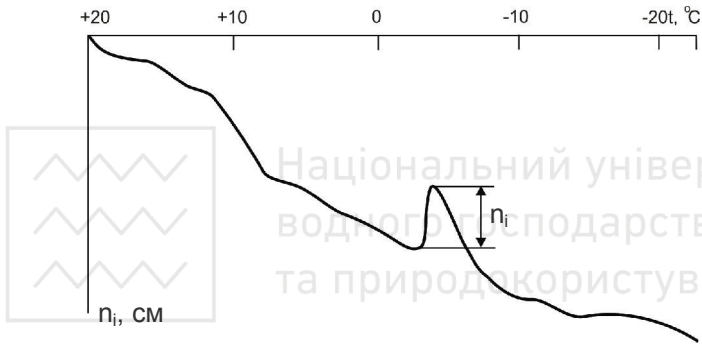


Рис. 3.33. Графік залежності різниці об'ємних деформацій бетонного і стандартного зразків від температури заморожування

При вимірюваннях на приладах ДОД-100 θ_i знаходять за формулою

$$\theta_i = \frac{n_i c}{V_0}, \quad (3.76)$$

де n_i – максимальна різниця значень деформацій бетонного та стандартного зразків при заморожуванні, см;

c – постійна дилатометра, $\text{см}^2/\text{см}$;

V_0 – початковий об'єм бетонного зразка, см^3 .

Марку бетону за морозостійкістю F за першим базовим методом визначають за табл. 3.40.



Таблиця 3.40

Максимальне значення $\theta \cdot 10^{-3}$ для бетону марок F
за морозостійкістю

Вид бетону (зразки-куби 100×100×100 мм)	Марки за морозостійкістю (F)							
	25	50	100	200	400	600	800	1000
Важкий	>3,80	3,60- 3,50	2,40- 1,70	1,0- 0,65	0,33- 0,20	0,18- 0,08	0,08- 0,05	<0,05
Легкий	>4,75	4,50- 4,00	3,30- 2,30	≤2,00	-	-	-	-

П'ятий (структурно-механічний) метод визначення морозостійкості (ДСТУ БВ.2.7-51-96) базується на її кореляційному зв'язку з капілярною пористістю бетону. Капілярну пористість визначають за формулами:

- для зразків важкого бетону з відомим складом:

$$\Pi_i = \frac{W_i - K_K \Delta V'_i \rho_i}{10}; \quad (3.77)$$

- для зразків бетону на пористих заповнювачах:

$$\Pi_i = \frac{W_i + V_n - K_K \Delta V'_i \rho_i}{10}; \quad (3.78)$$

- для зразків бетону невідомого складу:

$$\Pi_i \left(\frac{m_{ki} - m_{ci}}{d_w (m_{bi} / m_{bo}) V} - D \right) \cdot 100, \quad (3.79)$$

де W_i – об'єм води замішування в 1 л ущільненої бетонної суміші без урахування водопоглинання заповнювачами і водовідділення в процесі ущільнення, см³ (для заповнювачів на основі щільних порід водопоглинання приймають рівним 1% від їх маси);



$\Delta V'_i$ – питома контракція застосованого цементу на час

випробувань матеріалу на морозостійкість (величину $\Delta V'_i$ визначають за допомогою контрактометру згідно ДСТУ);

C_i – маса цементу в 1 л бетонної суміші, г;

V_n – об'єм відкритих пор пористих заповнювачів (об'єм води, що поглинається пористими заповнювачами за 1 год.), см³;

K_k – стехіометричний коефіцієнт контракції цементу (при густині цементу 3,1 г/см³); для портландцементу $K_k=5,1$; швидкотверднучого портландцементу $K_k=4,7$; пуцоланового портландцементу $K_k=6$; шлакопортландцементу $K_k=5,9$;

d_w – густина води ($d_w=1$ г/см³);

m_{b0} , m_{bi} , m_{ki} , m_{ci} – відповідно маси зразка (керн) після його насичення водою; розколювання на куски об'ємом 20-30 см³, кип'ятіння протягом 5 год; висушування до постійної маси;

D – коефіцієнт, що враховує об'єм пор у зразку, в яких вода не переходить у лід при заморожуванні до $-(18\pm 2)^\circ$ С. Цей коефіцієнт залежить від міцності бетону. При мінімально допустимій міцності у проектному віці кубічних зразків 10 МПа $D=0,02$; 22,5 МПа – $D=0,04$; 40 МПа – $D=0,06$, 45 МПа – $D=0,07$.

Для визначення морозостійкості бетону структурно-механічним методом поряд із величиною капілярної пористості знаходять величину т.зв. коефіцієнта підвищення міцності K_i :

$$K_i = f_{cm}^0 / f_{cm}^k, \quad (3.80)$$

де f_{cm}^0 і f_{cm}^k – середні значення міцності бетону основних і контрольних зразків відповідно.

Міцність на стиск контрольних зразків визначають у насиченому водою стані через 2 год. після витягування з ванни, основних зразків – після однократного заморожування протягом 5 год.

Морозостійкість бетону розраховують за формулою:

$$M_i = M_{min} + \frac{(M_{max} - M_{min})(K_{max} - K_i)}{K_{max} - K_{min}}, \quad (3.81)$$



де M_{max} і M_{min} – максимальна та мінімальна морозостійкість бетону, циклів, при розрахунковому значенні Π_i ;
 K_{max} і K_{min} – максимальне та мінімальне значення коефіцієнта K_i (табл. 3.41).

У табл. 3.41 наведені узагальнені дані для показників морозостійкості важких бетонів, що необхідні для розрахункового визначення морозостійкості структурно-механічним методом.

Таблиця 3.41

Показники для визначення морозостійкості важкого бетону структурно-механічним методом

Відкрита капілярна пористість, Π_b , %	Морозостійкість, цикл		Коефіцієнт K_i	
	M_{max}	M_{min}	K_{max}	K_{min}
0,5	863	863	1,00	1,00
1,5	573	558	1,04	1,02
2,5	503	465	1,13	1,03
3,5	453	403	1,21	1,04
4,5	413	353	1,30	1,06
5,5	380	309	1,39	1,07
6,5	351	290	1,48	1,09
8,0	315	215	1,61	1,11
10,0	280	158	1,78	1,12
12,0	253	108	1,89	1,14
15,0	220	59	2,03	1,16
17,0	208	41	2,06	1,18
20,0	201	23	2,11	1,19
23,0	200	16	2,14	1,21
25,0	200	15	2,14	1,21

Уточнене значення морозостійкості розраховують за формулами:

$$M = M_i(I - \Delta_0), \quad (3.82)$$

$$\text{де } \Delta_0 = \sqrt{\left(\frac{S_{f_{cm}^0}}{f_{cm}^0}\right)^2 + \left(\frac{S_{f_{cm}^K}}{f_{cm}^K}\right)^2} + K_m, \quad (3.83)$$



де $S_{f_{cm}^0}$ і $S_{f_{cm}^k}$ – середні квадратичні відхилення міцності бетону

для серії (6 зразків) основних і контрольних зразків;

K_m – коефіцієнт, який приймають для важких бетонів – 0,04, цементно-піщаних розчинів – 0,05, легких бетонів – 0,06.

Марку бетону за морозостійкістю приймають рівною меншому значенню F , яке є найближчим до значення M .

До неруйнівних методів визначення морозостійкості бетону можна віднести *ультразвуковий метод* (ГОСТ 26134-84). За цим методом морозостійкість контролюють за результатами вимірювання часу розповсюдження ультразвуку в зразках у процесі їх поперемінного заморожування та відтавання. З цією метою застосовують спеціальні стенди і прилади, що призначені для вимірювання часу розповсюдження ультразвуку в бетоні.

За результатами вимірювань для кожного зразка знаходять найменше значення часу розповсюдження ультразвуку t_m і відповідне значення числа циклів N_m .

Марку бетону за морозостійкістю встановлюють за критичним числом циклів заморожування та відтавання, починаючи з якого відбувається різке збільшення часу розповсюдження ультразвуку в зразку, що відповідає початку інтенсивного руйнування матеріалу.

Порівнюючи знайдене критичне число циклів заморожування та відтавання з встановленим у стандарті його контрольним значенням, визначають марку бетону за морозостійкістю (табл. 3.42).

Таблиця 3.42

Значення критичного числа циклів заморожування та відтавання для різних марок бетону за морозостійкістю

Метод визначення морозостійкості	Марки бетону за морозостійкістю, F							
	50	100	150	200	300	400	500	1000
Перший базовий	31	63	95	125	190	250	310	625
Другий базовий	-	63	95	125	190	250	310	625
Другий прискорений	-	13	19	28	47	70	95	280

Результати ультразвукових вимірювань по кожному зразку при числі циклів N більшому, ніж N_m наносять на графік у координатах $lg(N-N_m) - lg(t - t_m)$. На побудованому



графіку визначають абсцису K точки перелому. Критичне число циклів заморожування та відтавання для кожного зразка M визначають за формулою:

$$M = N_m + K. \quad (3.84)$$

Для контрольованого складу критичне число заморожувань та відтавань приймають рівним меншому зі значень, які отримані для двох зразків.

Приклади

3.24. *Необхідно розрахувати середнє значення стираності дослідженої серії зразків, використавши отримані експериментальні дані (табл. 3.43).*

У серію зразків входило 6 зразків, які випробовували на крузі стирання, який має з'ємний стираючий диск, що обертається у горизонтальній площині. Абразивом слугувало шліфзерно 16.

До кожного зразка по центру прикладали вертикальне навантаження 60 кПа. Через кожні 28 обертів круга використовували нову порцію абразиву. За один цикл випробувань вказану операцію повторювали 5 разів. Після кожного циклу зразок повертали на 90° С. Всього для кожного зразка проводили 4 цикли випробувань, після чого зразок зважували.

Таблиця 3.43

Результати випробувань та розрахунків стираності бетону

Зразок	Площа зразка, що піддавалася стиранню, $F, \text{см}^2$	Маса зразка, г		Втрата маси $\Delta m, \text{г}$	$\sigma_i, \text{г/см}^2$	T_i
		до випробувань m_1	після випробувань m_2			
1	48,86	787,5	759,0	28,5	0,58	0,24
2	48,79	789,2	760,1	29,1	0,60	0,24
3	48,72	790,2	761,9	28,3	0,58	0,24
4	48,86	790,6	763,2	27,4	0,56	0,73
5	49,70	788,8	762,0	26,8	0,54	1,22
6	47,60	791,5	760,0	31,5	0,66	1,70

$$\bar{\sigma}_i = 0,59$$



При обчисленні середнього арифметичного значення стираності окремих зразків проводили перевірку на наявність випадючих результатів. З цією метою розраховували параметр T_i :

$$T_i = \frac{\overline{\sigma_i} - \sigma_i}{S}, \quad (3.85)$$

де S – середнє квадратичне відхилення стираності зразків у серії.

Згідно ДСТУ результат вважається випадючим і таким, що виключається при обрахуванні середнього значення стираності, якщо він перевищує критичне значення ($T_{кр}$), що залежить від числа зразків у серії. Для $n=6$ $T_{кр}=1,89$. Розрахункові значення T_i для всіх шести випробуваних зразків, що входять у серію, знаходяться в допустимих межах.

3.25. *Необхідно знайти рівняння і побудувати лінію регресії за результатами випробувань витривалості бетону.*

Результати випробувань наведені в табл. 3.44

Таблиця 3.44

Результати випробувань витривалості бетону

Номер випробування	$\eta = \frac{\sigma_{max}}{f_{cm}}$	\overline{n}_i	$\overline{lg n}_i$
1	0,9	1000	3,000
2	0,9	1500	3,176
3	0,9	1800	3,255
4	0,8	5000	3,699
5	0,8	2000	3,301
6	0,8	7079	3,850
7	0,7	31620	4,500
8	0,7	20000	4,300
9	0,7	100000	5,000
10	0,6	450000	5,653
11	0,6	580000	5,763
12	0,6	860000	5,934

За результатами підрахунків отримаємо значення коефіцієнтів рівняння регресії: $\alpha=1,197$; $\beta = -0,104$.



Рівняння регресії для розрахунків витривалості:

$$\sigma_{max} / f_{cm} = 1,197 - 0,104 \lg \bar{n} \quad (3.86)$$

Лінія регресії, що відображає результати випробувань наведена на рис.3.34.

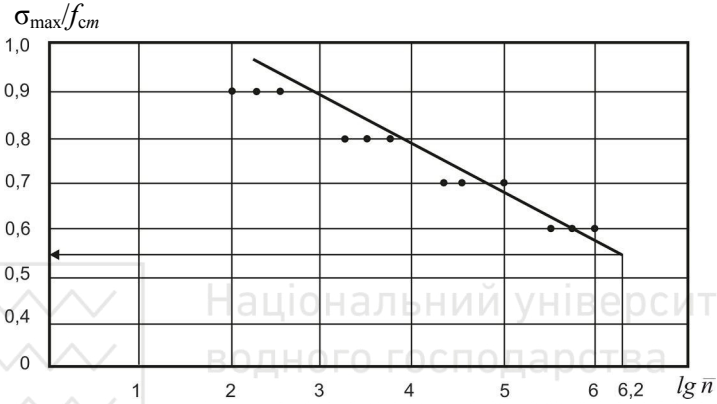


Рис.3.34. Лінія регресії за результатами випробувань

3.26. *Визначити склад бетону, що задовольняє вимогам для легких жаростійких бетонів класу ІІ9 з маркою за густиною D900, за залишковою міцністю та температурою нормованих деформацій.*

При розробці складів легких жаростійких бетонів отримані наступні експериментальні дані (табл. 3.45).

Таблиця 3.45

Експериментальні дані для вибору складу жаростійкого бетону

№ складу	Середня густина бетону у висушеному стані, кг/м ³	Витрата матеріалів, кг/м ³			Залишкова міцність при нагріванні до 800° С, %	Температура деформації під навантаженням, °С	
		портландцемент	тонко мелена добавка	заповнювач,		4%	руйнування
1	1200	200	зола-виносу 100	Керамзит $\gamma=550 \dots 840$	40	960	1100



продовження табл. 3.45

№ складу	Середня густина бетону у висушеному стані, кг/м ³	Витрата матеріалів, кг/м ³			Залишкова міцність при нагріванні до 800° С, %	Температура деформації під навантаженням, °С	
		портланд цемент	тонко мелена добавка	заповнювач,		4%	руйнування
2	850	220	шамотний порошок 80	керамзит $\gamma=350...500$	32	950	1150
3	900	240	подрібнена діатомітова цегла 60	керамзит $\gamma=450...550$	25	900	1050
4	870	230	мелена пемза 70	керамзит $\gamma=350...500$	33	870	1030

Аналіз приведених даних свідчить, що склад №1 не задовольняє поставленим вимогам до бетону за густиною, склад №3 – за залишковою міцністю, склад №4 – за температурою, необхідною для 4% деформації бетону, склад бетону №2 задовольняє зазначеним вимогам.

3.27. Визначити можливість підвищення термостійкості дрібнозернистих золошлакобетонів хімічними добавками.

Для визначення термостійкості дрібнозернистих золошлакобетонів виготовляли зразки-балочки розміром 40x40x160 мм, які після 7 діб нормального твердіння піддавали висушуванню за рекомендованим режимом (температура 150° С, швидкість підняття температури 50°/год., витримування – 48 год.). Висушені зразки розміщували у печі, попередньо розігрітій до 800° С, і витримували при цій температурі 40 хвилин. Коливання температури в печі допускалися в межах $\pm 20^{\circ}$ С. По закінченню 40 хвилин зразки виймали з печі і занурювали у ванну з водою кімнатної температури. Зразки охолоджували у воді протягом 5 хвилин, після чого їх виймали з води і витримували при температурі $20 \pm 5^{\circ}$ С 10 хвилин. Потім нагрівання повторювали. Після кожної теплозміни воду у ванні



змінювали. Термічну стійкість бетону оцінювали кількістю тепломін, яка викликала руйнування зразків або втрату бетоном 20% і більше початкової маси. Через кожні дві тепломіни для зразків визначали втрату маси і водопоглинання. Результати дослідів наведені в табл. 3.46.

Аналіз отриманих даних показує, що в області переходу до критичного числа тепломін спостерігається певний стрибок величини водопоглинання, зумовлений значним тріщиноутворенням. Підвищення щільності бетону за рахунок збільшення Ц/В і введення суперпластифікатора дозволяє збільшити термостійкість золошлакобетонів на 1...2 марки. Додатковий ефект дає введення у комплексі з суперпластифікатором добавки фтористого активатора.

Таблиця 3.46

Результати дослідження термостійкості дрібнозернистих
золошлакобетонів

№ з/п	Ц/В	Вміст добавок, % маси цементу	Число тепломін							
			4	6	8	10	12	15	17	
			Втрати маси і водопоглинання, %							
1	1,8	-	$\frac{-}{8,8}$	$\frac{2,4}{10,5}$	$\frac{21,5}{14,4}$	-	-	-	-	
2	2,2	-	$\frac{-}{7,3}$	$\frac{1,3}{9,1}$	$\frac{5,9}{11,5}$	$\frac{22,4}{15,1}$	-	-	-	
3	1,8	C-3-1%	$\frac{-}{6,9}$	$\frac{0,8}{8,5}$	$\frac{3,4}{10,6}$	$\frac{20,5}{14,4}$	-	-	-	
4	1,8	Na ₂ SiF ₆ -1%	$\frac{-}{6,5}$	$\frac{0,5}{8,7}$	$\frac{2,5}{10,9}$	$\frac{20,8}{14,8}$	-	-	-	
5	1,8	C-3-1%+Na ₂ SiF ₆ -1%	$\frac{-}{6,8}$	$\frac{0,2}{8,3}$	$\frac{1,7}{9,2}$	$\frac{17,4}{11,4}$	$\frac{22,1}{15,8}$	-	-	
6	2,6	C-3-1%	$\frac{-}{6,1}$	$\frac{0,6}{7,2}$	$\frac{1,5}{8,8}$	$\frac{7,7}{12,5}$	$\frac{21,4}{16,3}$	-	-	
7	2,6	Na ₂ SiF ₆ -1%	$\frac{-}{6,2}$	$\frac{-}{7,8}$	$\frac{11,2}{10,6}$	$\frac{8,2}{11,9}$	$\frac{23,4}{15,5}$	-	-	
8	2,6	C-3-1%+Na ₂ SiF ₆ -1%	$\frac{-}{6,3}$	$\frac{-}{7,5}$	$\frac{11,4}{10,5}$	$\frac{5,3}{11,5}$	$\frac{8,1}{13,1}$	$\frac{24,4}{16,2}$	-	

Примітка. Над рискою втрати маси, %; під рискою – водопоглинання, %.



3.28. *Визначити морозостійкість бетону за прискореним третім методом згідно ДСТУ Б В.2.7-47-96.*

Серія зразків бетону була випробувана на морозостійкість за прискореним третім методом згідно ДСТУ Б В.2.7-47-96. Заморожування та відтавання зразків за цим методом здійснюються у 5%-у водному розчині хлориду натрію. Температура заморожування мінус $(50 \pm 2)^\circ \text{C}$.

Після 15 циклів заморожування та відтавання контрольні та основні зразки мали наступні значення міцності.

Номер зразку в серії	Міцність бетону, МПа	
	контрольні зразки	основні зразки
1	38,3	38,5
2	40,8	40,3
3	41,5	42,2
4	40,9	41,5
5	42,3	40,8
6	42,8	39,6

Середні значення міцності:

– контрольних зразків:

$$-\overline{f_{cm}^k} = \frac{38,3 + 40,8 + 41,5 + 40,9 + 42,3 + 42,8}{6} = 41,1 \text{ МПа}$$

– основних зразків:

$$-\overline{f_{cm}^o} = \frac{38,5 + 40,3 + 42,2 + 41,5 + 40,8 + 39,6}{6} = 40,4 \text{ МПа}$$

Середнє квадратичне відхилення для міцності знаходили за формулою:

$$S = \frac{W_m}{\alpha},$$

де W – розмах одиничних значень міцності в серії як різниця між максимальними і мінімальними одиничними значеннями, МПа;



α – коефіцієнт, який залежить від числа одиничних значень міцності в серії (для $n=6$, $\alpha=2,5$).

Для контрольних зразків $S^k=1,80$ МПа, основних – $S^o=1,48$ МПа.

Коефіцієнт варіації міцності:

$$V_c = \frac{S}{\bar{f}_{cm}} \cdot 100\%$$

для контрольних зразків:

$$V_m^k = \frac{1,8}{41,1} \cdot 100 = 4,38\%$$



основних зразків:

$$V_m^o = \frac{1,48}{40,4} \cdot 100 = 3,67\%$$

Визначаємо нижню границю довірчого інтервалу X_{min}

$$X_{min} = \bar{f}_{cm} - tS$$

де t – значення критерію Стюдента. Для 6 зразків при довірчій імовірності 95% $t=2,57$.

Для контрольних зразків:

$$X'_{min} = 41,1 - 2,57 \cdot 1,8 = 36,48 \text{ МПа}$$

Для основних зразків:

$$X''_{min} = 40,4 - 2,57 \cdot 1,8 = 36,6 \text{ МПа}$$

Нижня границя довірчого інтервалу міцності контрольних зразків з урахуванням коефіцієнта 0,9 дорівнює 32,83 МПа.



Враховуючи, що $X''_{min} > 0,9X'_{min}$, зразки бетону можна вважати такими, що витримали випробування на морозостійкість.

Згідно з рекомендованими ДСТУ співвідношеннями між числом циклів заморожування та відтавання при різних методах випробування (табл. 3.39) можна вважати, що для заданих умов марка бетону за морозостійкістю становить F500.

3.29. *Визначити морозостійкість бетону дилатометричним методом.*

Випробовується бетон складу (кг/м³): портландцемент – 332, щебінь – 1310, пісок – 590, вода – 177.

На графіку показника різниці об'ємних деформацій бетонних і стандартного зразків після заморожування (рис.3.33) знаходимо стрибкоподібну зміну n_i для кожного зразка із серії:

$$n_1=2,4 \text{ см}; n_2=2,5 \text{ см}; n_3=2,6 \text{ см}.$$

Визначаємо значення максимального відносного збільшення різниці об'ємних деформацій бетонних та стандартного зразків θ_i за формулою (3.76).

Постійна дилатометра $c=0,258 \text{ см}^3/\text{см}$.

$$\theta_1 = \frac{2,4 \cdot 0,258}{1000} = 0,62 \cdot 10^{-3};$$

$$\theta_2 = \frac{2,5 \cdot 0,258}{1000} = 0,65 \cdot 10^{-3};$$

$$\theta_3 = \frac{2,6 \cdot 0,258}{1000} = 0,67 \cdot 10^{-3}.$$

Обчислюємо середнє арифметичне значення максимального відносного збільшення різниці об'ємних деформацій бетонних та стандартного зразків при заморожуванні для серії з трьох зразків:

$$\bar{\theta}_i = \frac{0,62 \cdot 10^{-3} + 0,65 \cdot 10^{-3} + 0,67 \cdot 10^{-3}}{3} = 0,65 \cdot 10^{-3}.$$

За табл. 3.40 визначаємо марку бетону за морозостійкістю, яка складає F200.



3.30. Визначити морозостійкість бетону структурно-механічним методом.

Випробовують бетон складу (кг/м³): цемент – 400, пісок – 691, щебінь – 1089, вода – 172. Для виготовлення бетону використані такі матеріали: портландцемент М400, густина – 3,1 т/м³; щебінь гранітний, фракції 5-25 мм; пісок $M_{кр}=2$. Виготовлено 6 зразків кубів бетону розміром 100×100×100 мм. Сумарне водопоглинання заповнювачів прийнято рівним 1% від їх маси.

Для розрахунку відкритої капілярної пористості за формулою (3.77) приймаємо: питому контракцію ($\Delta V_i'$) 0,037л/кг; $K_k=5,1$; об'єм води замішування без урахування води, поглинутої заповнювачами, л/м³ $W_i=172-1780 \cdot 0,01=154,2$ л.

Обчислюємо відкриту капілярну пористість бетону у віці 28 діб за формулою (3.77):

$$P_i = (154,2 - 5,1 \cdot 0,037 \cdot 400) / 10 = 7,8\%$$

Визначаємо міцність бетону на стиск після його водонасичення за ДСТУ БВ.2.7-47 і однократного заморожування контрольних f_{cm}^k і основних f_{cm}^0 зразків, МПа:

$$f_{c_1}^k = 28,3; f_{c_2}^k = 30,7; f_{c_3}^k = 32,5;$$
$$f_{c_1}^0 = 40,2; f_{c_2}^0 = 45,1; f_{c_3}^0 = 48,1.$$

Обчислюємо середні значення границі міцності бетону контрольних і основних зразків:

$$f_{cm}^k = (28,3 + 30,7 + 32,5) / 3 = 30,5 \text{ МПа};$$
$$f_{cm}^0 = (40,2 + 45,1 + 48,1) / 3 = 44,5 \text{ МПа}.$$

Обчислюємо значення коефіцієнта підвищення міцності бетону при однократному заморожуванні за формулою (3.80):

$$K_i = 44,5 / 30,5 = 1,46.$$



Із табл.3.41 для $P_i=7,8\%$ методом інтерполяції знаходимо: $M_{max}=320$, $M_{min}=223$, $K_{max}=1,59$, $K_{min}=1,11$ і з урахуванням $K_i=1,46$ розраховуємо морозостійкість бетону, який випробовується за формулою (3.81):

$$M_i = 223 + (320 - 223) \times (1,59 - 1,46) / (1,59 - 1,46) = 249 \text{ циклів}$$

Встановлюємо марку бетону за морозостійкістю F200 (найближче до M менше значення F з таблиці ДСТУ Б В.2.7-47-96).

3.31. *Визначити ультразвуковим методом морозостійкість бетону. Режими заморожування і відтавання 3 зразків розмірами $100 \times 100 \times 100$ мм відповідають першому методу випробувань на морозостійкість за ДСТУ БВ.2.7-47-96.*

Ультразвукові вимірювання виконують з інтервалом 5 циклів заморожування і відтавання по 4 каналам. Результати ультразвукових вимірювань (зразок №1) наведені в табл. 3.47.

Таблиця 3.47
Результати ультразвукових вимірювань

Число циклів заморожування і відтавання N	N-N _m	Час розповсюдження ультразвуку τ по каналам вимірювання, мкс				Сумарний час розповсюдження ультразвуку t, мкс	τ - τ_m , мкс
		1	2	3	4		
0	-	28,9	29,1	29,0	29,3	110,3	-
5	-	28,8	29,0	28,9	29,0	115,7	-
10	-	28,8	28,9	28,8	29,0	115,5	-
15	-	28,7	28,9	28,8	29,1	115,5	-
20	5	28,8	29,0	29,0	29,0	115,9	0,4
25	10	28,9	29,0	29,0	29,2	116,1	0,8
30	15	28,9	29,0	29,1	29,3	116,3	0,6
35	20	28,9	29,1	29,1	29,4	116,5	1,0
40	25	29,0	29,1	29,2	29,3	116,6	1,1
45	30	29,0	29,2	29,1	29,4	116,7	1,2
50	35	29,1	29,1	29,2	29,5	116,9	1,4
55	40	29,3	29,2	29,3	29,8	117,6	2,1
60	45	29,5	29,3	29,4	30,2	118,4	2,9
65	50	29,7	29,6	29,7	30,5	119,5	4,0

1. Сумарний час розповсюдження ультразвуку по каналам вимірювання, наприклад після 5 циклів (N=5):



$$\tau = 28,8 + 29,0 + 28,9 + 29,0 = 115,7 \text{ мкс.}$$

Найменше значення часу розповсюдження ультразвуку ($\tau_m = 115,5$ мкс) зафіксовано після 10 і 15 циклів заморожування і відтавання ($N_m = 15$).

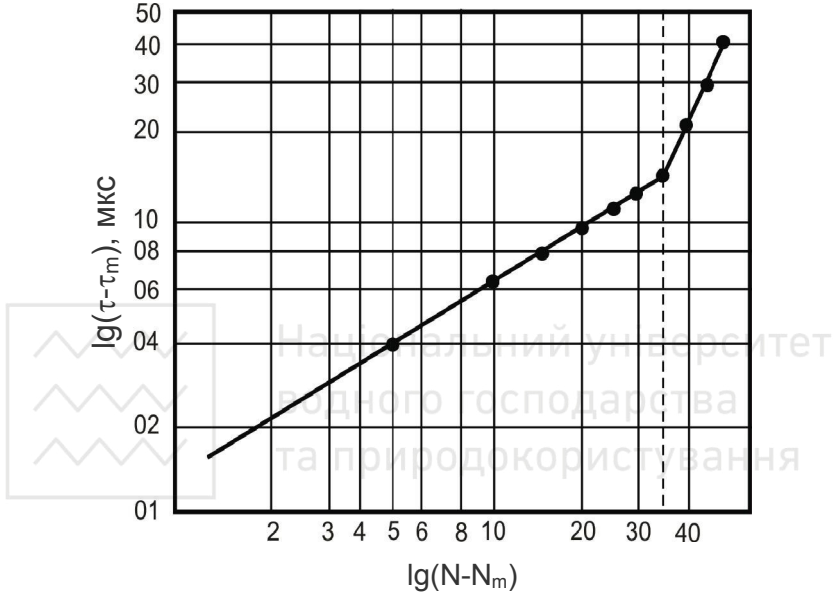


Рис. 3.35. Залежність $\lg(\tau-\tau_m)$ від $\lg(N-N_m)$

За результатами наступних вимірювань обчислюємо значення $(N-N_m)$ та $(\tau-\tau_m)$ і будуємо графік у логарифмічних координатах (рис. 3.35). На побудованому графіку орієнтовно вибираємо точку, яка відповідає початку різкого збільшення часу розповсюдження ультразвуку. Для цієї точки $N-N_m=35$. оскільки $N_m=5$, критичне число циклів $M=35+15=50$ циклів. (Більш точна методика пошуку значення M передбачає побудову графіків лінійних залежностей точок, для яких $N \leq N_m$ і $N \geq N_m$. Абсцису точки перелому знаходять як проекцію точки перетину побудованих прямих на вісь абсцис).



Вправи

3.42. Визначити стираність бетону для серії зразків. Були проведені випробування 6 зразків на «крузі стирання» і отримані наступні результати:

№ зразка	Середнє значення площі зразка, $F \text{ см}^2$	Втрата маси, Δm , г
1	49,5	29,4
2	47,5	32,8
3	48,3	27,5
4	49,7	26,9
5	47,8	33,4
6	48,8	28,8

3.43. Знайти коефіцієнт кореляції та рівняння регресії між стираністю бетону та його міцністю на стиск за результатами випробувань, що наведені нижче:

стираність, г/см^2	0,62	0,59	0,56	0,54	0,51	0,49	0,43
міцність на стиск, МПа	21,5	25,6	32,3	35,4	38,5	42,4	48,2

3.44. Відповідно до ДСТУ БВ.2.7– 218:2009 побудувати лінію регресії за результатами випробувань бетону на витривалість:

$\eta = \frac{\sigma_{max}}{f_{cm}}$	n_i	$\eta = \frac{\sigma_{max}}{f_{cm}}$	n_i
0,9	1000	0,7	25000
0,9	1300	0,7	50000
0,9	1700	0,7	100000
0,8	3000	0,6	350000
0,8	5000	0,6	550000
0,8	7500	0,6	750000

3.45. Були проведені випробування портландцементних бетонів з різними видами тонкомелених добавок та заповнювачів. Результати випробувань наведені в табл. 3.48. Визначити граничні температури застосування та відповідні класи бетону.



Таблиця 3.48

Результати випробувань жаростійких бетонів

№ бетону	Тонкомелена добавка	Дрібний та крупний заповнювач	Температура нагрівання, °С	Залишкова міцність, %	Температура, що відповідає деформації під навантаженням	
					4%	40% або руйнуванню
1	Зола-винесення	Базальт	800	25	-	-
			700	43	-	-
2	Доменний гранульований шлак	Діабаз	800	21	-	-
			700	45	-	-
3	Паливний шлак	Паливний шлак	700	47	-	-
			800	33	-	-
4	Цем'янка	Бій глиняної цегли	900	38	-	-
			800	31	950	1030
5	Шамот	Шамот	800	35	1100	1170
6	Лесовидний суглинок	Шамот	800	27	1050	1100

3.46. Визначити коефіцієнт кореляції та рівняння регресії між термостійкістю різних видів жаростійких бетонів та їх коефіцієнтом лінійного термічного розширення. Останній змінювався при зміні складу бетонів. Експериментальні дані наведені нижче:

Бетон	Число водних теплозмін (T_1) до руйнування	Коефіцієнт лінійного термічного розширення ($\alpha \cdot 10^6$) бетону
1	50	5,5
2	41	6,1
3	35	6,8
4	30	7,3
5	26	7,7
6	21	8,2
7	15	8,6

3.47. Серію зразків бетону випробовували на морозостійкість за допомогою першого базового методу. Проектна марка бетону за морозостійкістю F300.



У серію входило 6 контрольних та 12 основних зразків, розмірами 10x10x10 см. Зразки випробовували згідно ДСТУ БВ.2.7-47-96 через 200 та 300 циклів заморожування протягом 2.5 год. при $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$ та відтавання при $18\pm 2^{\circ}\text{C}$ протягом 2 ± 0.5 год.

Результати випробувань міцності на стиск контрольних та основних зразків наведені нижче:

Число циклів	Міцність на стиск, МПа	
	200	контрольних зразків
основних зразків		35,5; 34,8; 35,9; 34,3; 36,1; 34,2; 35,9; 33,7; 34,8; 33,9; 35,5; 33,1
300	контрольних зразків	37,8; 39,9; 39,8; 37,1; 40,2; 40,5
	основних зразків	33,1; 32,2; 34,5; 35,1; 32,2; 31,3; 30,9; 31,5; 30,8; 31,2; 30,5; 33,6

Визначити відповідність фактичної морозостійкості бетону проектній марці за морозостійкістю.

3.48. Серію зразків випробували на морозостійкість за прискореним третім методом згідно ДСТУ БВ.2.7-47-96. Після 30 циклів заморожування та відтавання отримали наступні результати:

Номер зразка в серії	Міцність бетону, МПа	
	контрольних зразків	основних зразків
1	39,8	39,1
2	41,5	40,2
3	40,1	39,1
4	42,3	43,1
5	38,7	41,5
6	39,2	38,5

Зменшення маси зразків після випробувань не перевищило 2%. Тріщини, відколи та лушення ребер зразків були відсутні.

Зробити висновок якій марці за морозостійкістю відповідає бетон.



3.49. Визначити морозостійкість бетону дилатометричним (четвертим) методом за ДСТУ БВ.2.7-47-96, якщо на відповідному графіку 3.33 стрибкоподібна зміна об'ємних деформацій бетонних і стандартних зразків 10x10x10 см при їх заморожуванні становить для кожного зразка із серії: $n_1=2,2$ см; $n_2=2,7$ см; $n_3=2,8$ см.

Постійна дилатометра $C=0.259$ см³/см.

3.6. Корозійна стійкість бетону

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.2.6-145:2010) вибирати для оцінювання корозійної стійкості бетону, наведені в табл. 3.49

Таблиця 3.49

Показники, що визначаються при випробуваннях бетону на корозійну стійкість

Показники зразків	Основні показники агресивних середовищ					
	Жорст- кість, ммоль	pH	Вугле- кислий 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	+	+	+	+	+	+



продовження табл. 3.49

Показники зразків	Основні показники агресивних середовищ					
	Жорст- кість, ммоль	рН	Вугле- кислий газ CO ₂	агресивний іон		
				Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻
Міцність на розтяг при згині, МПа	+	+	+	+	+	+
Водонепроникність або коефіцієнт 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.3.50, рекомендована концентрація агресивних розчинів – у табл. 3.51.

Таблиця 3.50

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. 3.51.

Таблиця 3.51

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
Магnezіальна, 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 см³ до 1 см² 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:

$$G_p = \frac{\sum P_{CaO}}{C\beta}, \quad (3.86)$$

де C – маса цементу в 1 см³ зразка, г/см³;

β – вміст CaO в цементі за результатами хімічного аналізу;

$\sum P_{CaO}$ – кількість прореагувавшего цементного каменю у перерахунку на CaO, віднесена до площі реагуючої поверхні зразків, г/см³.

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

$$\sum P_{CaO} = \pm a + K\sqrt{\tau}, \quad (3.87)$$



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

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

$$\Gamma_p = \frac{K\sqrt{\tau}}{C\beta}, \quad (3.88)$$

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

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

$$\tau = \left(\frac{\Gamma_p C\beta}{K} \right)^2 \cdot \frac{1}{365}. \quad (3.89)$$

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

$$\Gamma_p = \frac{v\tau}{C\beta}, \quad (3.90)$$

де v – швидкість корозії в дифузійно-кінетичній області.

Розрахунок довговічності бетону в сульфатних середовищах може бути виконаний, виходячи з теоретичних закономірностей кінетики гетерогенних процесів. (рис. 3.36, 3.37) 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:

$$\sqrt{\frac{\tau_o}{\tau}} = \frac{Q}{\sum P_{SO_3}}, \quad (3.91)$$



$$\tau_o = \left(\frac{Q}{\sum P_{SO_3}} \right)^2 \cdot \tau, \quad (3.92)$$

де τ_o – можливий строк експлуатації бетону конструкцій, років;
 τ – тривалість досліджень, років;
 Q – руйнівна кількість сульфатів SO_3 , % від маси цементу;
 $\sum P_{SO_3}$ – 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. 3.52.

Таблиця 3.52

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

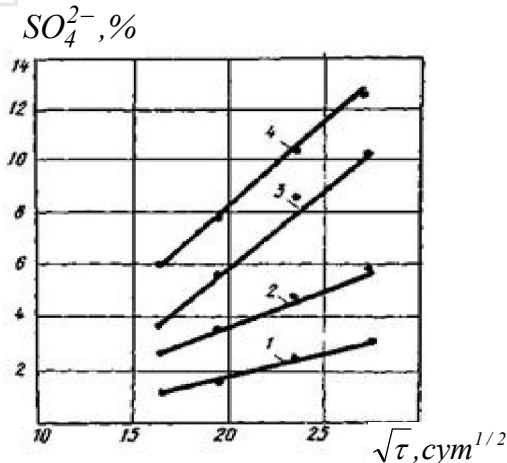


Рис.3.36. Кінетична залежність процесів корозії зразків цементного розчину 1:2.5 при $B/C=0,5$ в розчинах сульфату натрія з концентрацією за іоном SO_4^{2-}
 1 – 1,5 г/л; 2 – 5,0 г/л; 3 – 12,0 г/л; 4 – 20,0 г/л.

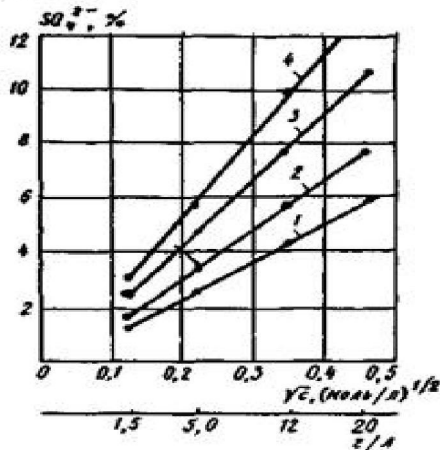


Рис.3.37. Інтенсивність поглинання SO_4^{2-} з розчинів сульфату натрію зразками цементного розчину складу 1:2,5 при $V/C=0,5$
1-4 – відповідно через 274, 365, 554, 738 діб

За прискореними випробуваннями у сульфатному середовищі високої концентрації можна розрахувати кількість сульфатів $\sum P_{\text{SO}_3}$, що накопичилися у зразках для даної концентрації агресивного середовища:

$$\sum P_{\text{SO}_3} = \sqrt{\frac{C}{C_0}} \cdot P_{\text{SO}_3}^0 \quad (3.93)$$

де $\sum P_{\text{SO}_3}^0$ – кількість сульфатів, що накопичилися у зразках за час випробувань у сульфатному середовищі заданої концентрації, % маси цементу;

C_0 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 сталеві арматури в залізобетонних конструкціях, а також призначати склади бетону для експлуатації в атмосфері із заданим вмістом вуглекислого газу.

Для проведення випробувань застосовують установку з автоматичним забезпеченням заданої концентрації вуглекислого газу (рис. 3.38).

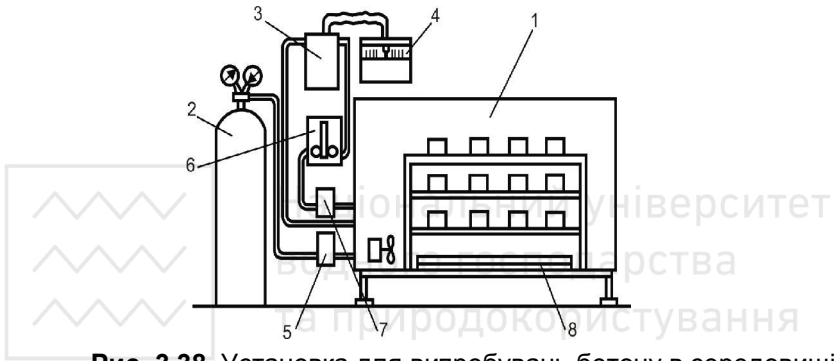


Рис. 3.38. Установа для випробувань бетону в середовищі вуглекислого газу:

- 1 – камера; 2 – балон із CO_2 ; 3 – автоматичний газоаналізатор;
- 4 – показуючий командний прилад; 5 – електромагнітний клапан; 6 – блок регулювання; 7 – збуджувач витрати газу;
- 8 – ванна з розчином хлориду натрію

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

$$D = \frac{m_0 x^2}{2c\tau}, \quad (3.94)$$

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:

$$m_0 = 0,4ЦPC_n, \quad (3.95)$$

де $Ц$ – витрата цементу, г в 1 см³ бетону;

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

C_n – 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:

$$X = \sqrt{\frac{2DC}{m_0}}, \quad (3.96)$$

де C – концентрація вуглекислого газу.

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

Електрична схема при застосуванні потенціодинамічного методу наведена на рис. 3.39, а.

Вимірювання гальванодинамічним методом (рис. 3.39, б) виконують на зразку шляхом реєстрації значень потенціалу в мілівольтах за допомогою вольтметра.

Гальванодинамічні характеристики на зразках отримують при зміні сили струму ступенями 1; 2; 4; 8; 16; 30; 60; 120; 250; 500; 1000; 2000 мкА. Після кожного збільшення значення струму роблять витримку до стабілізації потенціалу E .



Після електрохімічних випробувань сталеві стержні виймають з бетону і визначають наявність на них корозійних пошкоджень.

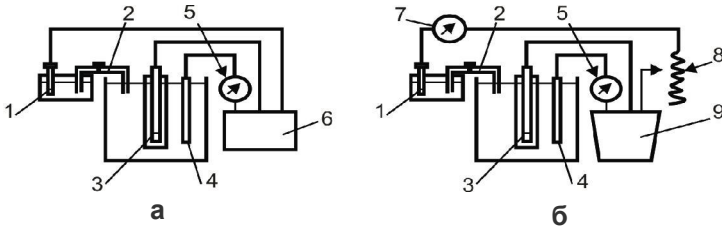


Рис. 3.39. Вкритичні схеми зняття потенціодинамічних і гальванодинамічних поляризаційних кривих:

- а) потенціодинамічний метод;
- б) гальванодинамічний метод:

1 – електрод порівняння; 2 – електролітичний ключ; 3 – зразок;
4 – додатковий електрод; 5 – мікроамперметр; 6 – потенціостат;
7 – вольтметр; 8 – резистор; 9 – джерело струму

Площу робочої поверхні сталевого стержня, яка контактує з бетоном S , см^2 , розраховують за формулою:

$$S = \pi D l + \pi D^2 / 4, \quad (3.97)$$

де D – діаметр стержня, см;
 l – довжина стержня в бетоні, см.

Розраховують густину струму i , мкА/см^2 , при кожному фіксованому значенні потенціалу за формулою:

$$i = \frac{I}{S}, \quad (3.98)$$

де I – сила струму, мкА ;
 S – площа робочої поверхні, см^2 .

За отриманими результатами будують графік (поляризаційну криву) в координатах: по осі абсцис – густина струму, мкА/см^2 , по осі ординат – потенціал робочого електроду E , мВ .



Корозійний стан сталльної арматури у бетоні оцінюють за показниками, наведеними в табл. 3.53.

Таблиця 3.53

Показники корозійного стану сталльної арматури в бетоні

Показник	Корозійний стан сталльної арматури на момент електрохімічних випробувань
Густина струму при потенціалі 300 мВ - до 10 мкА/см ² включно - від 10 до 25 мкА/см ² - більше 25 мкА/см ²	Пасивний стан Нестійкий пасивний стан Інтенсивна корозія
Потенціал через (60±5) с після відключення струму - більше 5 мВ - менше 5 мВ	Пасивний стан Активний стан, корозія

Додатковими критеріями є наявність або відсутність корозійного ураження арматури, значення струму корозії. Зразки, які знаходяться в пасивному стані протягом усього часу випробувань, не мають корозійного ураження.

Приклади

3.32. *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 вилугування цементного каменю в перерахунку на ΣP_{CaO} : у зразках з цементу №1 – 0,036 г/см², у зразках з цементу №2 – 0,021 г/см². Вміст цементу у зразках 0,581 г/см³. Цемент №1 з вмістом СаО – 61,5%, цемент №2 – 62,5%.

Глибину руйнування розчину визначаємо за формулою (3.86):



$$\Gamma_p = \frac{0,036}{0,581 \cdot 0,615} = 0,10 \text{ см} - \text{цемент №1,}$$

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

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

Склад бетону: В/Ц=0,5, витрата цементу 450 кг/м³, вміст СаО у цементі 65%. За результатами випробувань зразків бетону вказаного складу в 0,1 м соляної кислоти протягом 180 діб визначаємо константу корозійного процесу $K=2,27 \cdot 10^{-2} \text{ г}/(\text{см}^2 \text{ діб}^{1/2})$.

Розрахунок проводимо за формулою (3.88):



$$\Gamma_p = \frac{2,27 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{7300}}{0,45 \cdot 0,65} = 6,6 \text{ см.}$$

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

Витрата цементу в бетоні 400 кг/м³, В/Ц=0,4. Вміст СаО у портландцементі – 63%.

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

Розрахунок проводимо за формулою (3.89):

$$\tau = \left(\frac{3 \cdot 0,40 \cdot 0,63}{7,3 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot \frac{1}{365} = 29,3 \text{ років.}$$

3.35. 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 $\text{C}_3\text{A}=8\%$ протягом року випробовувалися у розчині сульфату натрію з концентрацією іону SO_4^{2-} – 10000 мг/л; кількість накопичених у зразках



сульфатів $\sum P_{SO_4^{2-}}^o$ 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 (3.93) 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 (3.92) з урахуванням даних табл. 3.52 визначаємо строк руйнування бетону.



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

3.36. Розрахувати глибину карбонізації бетону з коефіцієнтом дифузії вуглекислого газу $1 \cdot 10^{-4}$ см²/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 (3.96) визначаємо:

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

3.37. Знайти ефективний коефіцієнт дифузії вуглекислого газу у бетоні.

Зразок бетону за 14 днів 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 см³ бетону поглинув 47 см³ вуглекислого газу.

Ефективний коефіцієнт дифузії вуглекислого газу в карбонізованому бетоні дорівнював за формулою (3.94):



$$D = \frac{47 \cdot (1,7)^2}{2 \cdot 0,12 \cdot 14 \cdot 24 \cdot 3600} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 / \text{с.}$$

Вправи

3.50. Визначити за глибиною руйнування зразків який з двох цементів більш стійкий до корозії вилугування.

У зразках розчину на основі цементу №1 з вмістом CaO – 62,1% відбулося вилугування $\sum P_{\text{CaO}} = 0,052 \text{ г/см}^3$, на основі цементу №2 з вмістом CaO – 65,5% $\sum P_{\text{CaO}} = 0,054 \text{ г/см}^3$. Вміст цементу №1 у зразках розчину 550 кг/м^3 , №2 – 590 кг/м^3 .

3.51. Розрахувати глибину руйнування бетону за 15 років розчином 0,1 м H_2SO_4 . Витрата цементу з вмістом CaO 63% у бетоні становить 350 кг/м^3 . Константа корозійного процесу $K=2,15 \cdot 10^{-2} \text{ г/(см}^2 \cdot \text{діб}^{1/2})$.

3.52. Розрахувати час руйнування шару бетону 5 см при дії на нього розчину 0,1 м H_2SO_4 .

Витрата цементу 350 кг/м^3 ; вміст CaO у цементі 65%. Константа корозійного процесу $K=5,5 \cdot 10^{-3} \text{ г/(см}^2 \cdot \text{діб}^{1/2})$.

3.53. Розрахувати тривалість руйнування бетону в розчині сульфату натрію з концентрацією $\text{SO}_4^{2-} = 5000 \text{ мл/л}$.

Зразки бетону на середньоалюмінатному портландцементі випробовували протягом 180 діб в розчині Na_2SO_4 з концентрацією $\text{SO}_4^{2-} = 8000 \text{ мл/л}$; кількість накопичених у зразках сульфатів склала 1,9% від маси цементу. Концентрація розчину з вмістом $\text{SO}_4^{2-} 8000 \text{ мл/л}$ склала 0,095 моль/л, з вмістом $\text{SO}_4^{2-} 5000 \text{ мл/л} = 0,068 \text{ моль/л}$.

3.54. Розрахувати ефективний коефіцієнт дифузії вуглекислого газу в бетоні з витратою цементу 550 кг/м^3 . Вміст CaO в цементі 63%. Бетон випробовувався в камері з концентрацією $\text{CO}_2 = 15\%$. Середнє значення товщини нейтралізованого шару склало 11 см при тривалості випробування 12 діб та ступеню нейтралізації бетону 0,6.

3.55. Розрахувати глибину карбонізації бетону з коефіцієнтом дифузії, що розрахований за даними попередньої вправи і реакційною ємністю 45,5 за 50 років при концентрації вуглекислого газу у повітрі 0,03% (відносна величина $3 \cdot 10^{-4}$).



4. РОЗРАХУНКОВО – ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ

Поряд з прямими методами визначення властивостей бетонів за результатами експериментальних випробувань, що розглянуті у попередньому розділі, в технології бетону застосовуються розрахунково-експериментальні методи, що базуються на узагальненні результатів експериментальних досліджень і отриманні відповідних розрахункових залежностей. Такі залежності дозволяють визначати як параметри, що характеризують властивості бетону при заданих значеннях певних факторів, так і значення впливаючих факторів, що забезпечують необхідні властивості.

Розрахункові залежності для прогнозування основних властивостей бетону можна поділити на дві групи:

1. отримані при використанні традиційних методів постановки та обробки експериментів на базі теоретичних уявлень про взаємозв'язки властивостей, структури та складу бетону (*структурно-фізичний метод*);
2. отримані при використанні методів планування експериментів і статистичної обробки експериментальних даних з побудовою експериментально-статистичних (математичних) моделей у вигляді рівнянь регресії (*кібернетичний метод*).

Розрахункові залежності кожної з цих груп мають свої переваги та недоліки.

Перевагою розрахункових залежностей першої групи є їх більш загальний характер, недоліком, зазвичай, більші похибки при порівнянні розрахункових даних з експериментальними для конкретних технологічних умов. Перевагою розрахункових залежностей другої групи є їх адекватність у конкретній області варіювання факторів. Крім того, ці залежності відкривають широкі можливості, як показано в розділі 1, для розв'язування оптимізаційних задач, задач управління та ін.. Недоліком є певна локальність, що зумовлена особливостями матеріалів і областю варіювання факторів в експериментах, які були виконані для отримання математичної моделі.



4.1. Розрахункові залежності для прогнозування властивостей бетонних сумішей

Водопотреба та *легкоукладальність* – найважливіші взаємопов'язані між собою технологічні властивості бетонних сумішей, які визначають як здатність їх до ущільнення, так і, значною мірою, властивості затверділого бетону.

Не враховуючи кількість гідратної води, яка до затвердіння бетону є незначною, можна записати рівняння водного балансу бетонної суміші:

$$B = XK_{н.г}Ц + K_{з.п}П + K_{з.щ}Щ + B_{нозл} + B_{зв}, \quad (4.1)$$

де B – водовміст, зумовлений необхідною легкоукладальністю суміші, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$Ц$, $П$ і $Щ$ – витрати відповідно цементу, піску та щебеню (гравію), $\text{кг}/\text{м}^3$;

$K_{н.г}$, $K_{з.п}$, $K_{з.щ}$ – нормальна густина (у долях одиниці) і коефіцієнти змочування дрібного і крупного заповнювачів;

$X = (B/Ц)_m / K_{н.г}$ – відносний показник зволоження цементного тіста в бетонній суміші;

$(B/Ц)_m$ – водоцементне відношення цементного тіста;

$B_{нозл}$ – вода, поглинена порами заповнювачів, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$B_{зв}$ – вода, що механічно утримується в поровому просторі між зернами заповнювачів, покритими цементним тістом, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Залежно від прийнятого способу формування і ступеня зволоження бетонна суміш може мати незв'язний (пухко-землистий) або зв'язний стан, що характеризується різним ступенем пластичності. Для цементного тіста критерії зв'язності $K_{м.б} = 0,876K_{н.г}$ і $K_{сп} = 1,65K_{н.г}$, що характеризують відповідно *максимальну вологосемність і водоутримуючу здатність*, були запропоновані Й.М. Ахвердовим і підтверджені багатьма дослідниками.

Мінімально необхідна для сумішей, що формуються, кількість води орієнтовно дорівнює:

$$B_{min} = X_{м.б}K_{н.г}Ц + K_{з.п}П + K_{з.щ}Щ + B_{нозл}, \quad (4.2)$$



де $X_{м.в.}$ – відносний вологовміст цементного тіста, що відповідає максимальній вологоємності цементу, при якій він практично не містить в комірках між обводненими зернами капілярну вологу ($X_{м.в.} \leq 0,876$);

Π , Π , і Π – питомі витрати цементу, дрібного та крупного заповнювача;

$V_{погл.}$ – вода, поглинена порами заповнювачів.

Коефіцієнти змочування $K_{з.н}$ і $K_{з.ц}$ характеризують питому кількість води, що утримується відповідно дрібним і крупним заповнювачами в плівковому стані на своїй поверхні. Вони залежать від величини поверхневої енергії, крупності і рельєфу поверхні зерен заповнювачів. Запропоновані різні методики визначення коефіцієнтів змочування – випробуванням безпосередньо зволжених піску і щебеню (гравію) або цементного розчину (бетону) з визначеною консистенцією цементного тіста. При деякій вологості заповнювача стрибкоподібно змінюється електричний опір, що може свідчити про зменшення енергії його зв'язку з після його повного змочування.

За даними М.Г. Елбакідзе та Й.М. Ахвердова коефіцієнт змочування кварцового піску з урахуванням водопоглинання залежно від крупності фракції коливається від 0,72 (5-2,5 мм) до 5,04% (0,3-0,15 мм), гранітного щебеню від 1,21 (5-10 мм) до 0,75% (40-60 мм). Змочування завершується рівновагою, при якій бетонна суміш набуває пухко-землистого стану. При цьому розрахункове В/Ц такої суміші (при $V_{погл.}=0$) дорівнює:

$$(B / \Pi)_o^0 = 0,876 K_{н.з} + \frac{K_{з.н} \Pi + K_{з.ц} \Pi}{\Pi}. \quad (4.3)$$

При інтенсивних механічних впливах, наприклад, пресуванні або вібропресуванні, частина води змочування відтискається і $(B / \Pi)_o^0$ зменшується. Величина $X_{м.в.}$ при тиску 50 МПа знижується майже до 0,1. В гарячепресованих зразках цементного каменю Рой і Гоуда досягли В/Ц=0,093. За даними Й.М. Ахвердова об'єм води змочування на поверхні



заповнювача при підвищенні тиску пресування може наближатися до адсорбційного. Істотне зменшення $K_{м.в}$ можна досягти і за рахунок застосування ефективних ПАР – суперпластифікаторів.

Приблизно одночасно (на початку 30-х років минулого сторіччя) і незалежно один від одного В.І. Сорокером у СРСР та Ф.Р. Мак-Мілланом у США було встановлене *правило сталості водопотреби* (ПСВ). Ними було встановлено, що при незмінному водовмісті витрата цементу в межах 200...400 кг/м³ не впливає істотно на легкоукладальність бетонних сумішей.

Істотна стабілізація верхньої межі області ПСВ, і врахування особливостей застосовуваних цементів досягається при вираженні його через критичне В/Ц ($(В/Ц)_{кр}$), яке дорівнює в середньому $1,68K_{н.г}$, де $K_{н.г}$ – В/Ц, що відповідає нормальній густоті цементного тіста.

З фізичних позицій правило сталості водопотреби полягає в тому, що зі збільшенням Ц/В до деякого критичного значення зростання структурної в'язкості цементного тіста в бетонній суміші компенсується збільшенням його кількості і, відповідно, товщини шару цементного тіста на зернах заповнювача. За межами критичного Ц/В збільшення кількості цементного "мастила" вже не компенсує прогресивно зростаючу водопотребу бетонної суміші (рис. 4.1).

Близькість $(В/Ц)_{кр}$ бетонних сумішей до В/Ц, яке характеризує граничну водоутримуючу здатність цементного тіста ($K_{гр} \approx 1,65K_{н.г}$), не випадкова. Як показано Й.М.Ахвердовим, граничне напруження зсуву і в'язкість цементного тіста при $(В/Ц)_{ц.г} = 1,65K_{н.г}$ досягають мінімальних значень, при $(В/Ц)_{ц.г} < 1,65K_{н.г}$ вони різко зростають. Верхню межу ПСВ можна орієнтовно знайти за формулою:

$$(В / Ц)_{кр} = (1,35...1,65)K_{н.г} + \frac{K_{з.п}П + K_{з.щ}Щ}{Ц}. \quad (4.4)$$

У формулі (4.4) не враховується для спрощення вода, поглинута порами заповнювачів і така, що вступила в хімічну



взаємодію з цементом. Приймаючи для кварцового піску $K_{з,п}=0,015...0,025$, гранітного щебеню $K_{з,щ}=0,005...0,01$ можна розрахувати, що для бетонів з витратою цементу $\rho=300...500\text{кг/м}^3$ $(В/Ц)_{кр}$ коливається від 0,37 до 0,45. Для спрощення розрахунків приймають $(В/Ц)_{кр}\approx 1,68 K_{н.г.}$

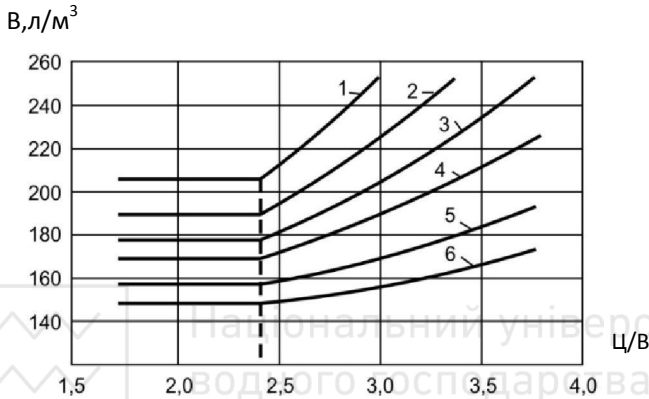


Рис. 4.1. Вплив Ц/В на водопотребу бетонної суміші:
1...3 – суміші з осадкою конуса 10, 5, 2 см;
4...6 – суміші з жорсткістю 10, 20, 30 с ; щебінь 5...20 мм,
пісок середньої крупності, цемент з нормальною густиною
26-27%

На водопотребу бетонних сумішей суттєво впливає *водопотреба заповнювачів*. Вона визначається їх крупністю, формою, видом і вмістом домішок.

Б.Г. Скрамтасвим і Ю.М. Баженовим були запропоновані інтегральні кількісні показники водопотреби заповнювачів, визначені шляхом порівняльних випробувань цементного тіста, розчинової та бетонної суміші. Ці показники визначають кількість води, яку необхідно додати в цементне тісто на одиницю маси відповідно піску або щебеню (гравію), щоб одержати розчинову суміш складу 1:2 або бетонну суміш складу



1:2:3,5 з такою самою рухомістю через 30 хв. після замішування як тісто нормальної густоти.

Урахування показників водопотреби дрібного (B_n) і крупного ($B_{щ}$) заповнювачів є зручним для порівняльної їх оцінки, оскільки на відміну від модуля крупності і питомої поверхні дозволяє узагальнено оцінити особливості піску або щебеню (гравію), що впливають на водовміст бетонних сумішей.

У загальному вигляді B_n і $B_{щ}$ можна знайти за рівняннями:

$$B_n = K_n^6 B_n^0, \quad B_{щ} = K_{щ}^6 B_{щ}^0, \quad (4.5)$$

де K_n^6 і $K_{щ}^6$ – коефіцієнти, значення яких, як показали наші досліді, залежать від параметра $X = (B / Ц)_{ум} / K_{н.г}$.

При $X=0,876$ показник B_n практично дорівнює коефіцієнту змочування, $X=1$ – показнику водопотреби, який визначається за методикою Б.Г. Скрамтаєва – Ю.М. Баженова. При $X=1,65$ цементне тісто досягає водоутримуючої здатності і водопотреба заповнювача набуває практично максимального значення.

Бетонні суміші повинні зберігати однорідність при транспортуванні, укладанні та ущільненні, не розшаровуватися.

Спробу розрахунку загальної кількості води, що утримується бетонною сумішшю ($B_{ум}$) без істотного водовідділення, зробив І.М. Грушко. Ним запропоноване рівняння:

$$B_{ум} = 1,35K_{н.г}Ц + B_n\Pi + 0,07S_{щ}, \quad (4.6)$$

де $S_{щ}$ – питома поверхня крупного заповнювача, m^2/m^3 .

Питому поверхню в m^2 на $1 m^3$ крупного заповнювача, ущільненого на стандартному вібростолі ($S_{щ}$), пропонується обчислювати за формулою:

$$S_{щ} = K \frac{\rho_{н.щ}}{\rho_{щ}} (a_{40} + 2a_{20} + 4a_{10} + 8a_5), \quad (4.7)$$



де K – коефіцієнт, який характеризує вплив форми зерен щебеню або гравію. При вмісті зерен лещадної форми в щебені менше 15% $K=1,5$, менше 30% $K=1,6$, більше 30% $K=1,7$. Для гравію $K=1,0 \dots 1,25$;

$\rho_{н.щ}$ і $\rho_{щ}$ – відповідно насипна і дійсна густина крупного заповнювача;

$a_{40}, a_{20}, a_{10}, a_5$ – часткові залишки на ситах 40, 20, 10 і 5 мм.

Максимально можливу кількість утримуваної бетонною сумішшю води можна представити також у вигляді виразу:

$$B_{ym} = 1,35 \cdot K_{н.г} \cdot \Pi + B_{щ} \cdot \Pi + B_{щ} \cdot \Pi, \quad (4.8)$$

де B_n і $B_{щ}$ – значення водопотреби дрібного і крупного заповнювачів бетону при $X=1,35 \dots 1,65$ і використанні цементу з визначеним значенням $K_{н.г}$.

Аналіз численних експериментальних даних показує, що водопотреба бетонної суміші (B_0) пов'язана з показниками легкоукладальності (осадкою конуса або жорсткістю) і розміром крупного заповнювача квадратичною поліноміальною залежністю.

При зміні осадки конуса в межах $OK=0 \dots 20$ см, жорсткості ($Ж$) від 4 до 30 с і максимальної крупності заповнювача від 5 до 80 мм водопотреба бетонної суміші може бути обчислена за рівняннями:

$$B_0 = 176 - 0,8D_{щ} + 6,1OK + 0,0029D_{щ}^2 - 0,14OK^2, \quad (4.9)$$

$$B_0 = 197 - 0,91D_{щ} - 1,12Ж + 0,0026D_{щ}^2 - 0,0047Ж^2, \quad (4.10)$$

де $D_{щ}$ – найбільша крупність щебеню, мм.

Для врахування особливостей вихідних матеріалів, витрати цементу і температури бетонної суміші розрахункові значення B_0 можна коригувати за відомими рекомендаціями (табл. 4.1), що запропоновані В.П. Сизовим.



Таблиця 4.1

Поправки для коригування водопотреби бетонної суміші

№	Фактори, які враховуються	Поправки ΔB , л/м ³
I. Порода і вид крупного заповнювача		
1.	Щебінь із метаморфічних і осадових порід із межею міцності 40...80 МПа	$\Delta B_1 = B_0 + (4 \dots 13)$
2.	Гірський гравій	$\Delta B_2 = B_0 - (5 \dots 10)$
3.	Морський і річковий гравій	$\Delta B_3 = B_0 - (9 \dots 15)$
4.	Щебінь із порід каменю з гладкою поверхнею зламу (діабаз, базальт і ін.)	$\Delta B_4 = B_0 - 3$
5.	Промитий щебінь	$\Delta B_5 = B_0 - 6$
6.	Вміст у щебені мулу і пилу в % понад 1% (X_1) і часток менше 5 мм (X_2) понад 5%	$\Delta B_6' = B_0 + X_1$ $\Delta B_6'' = B_0 + 2X_2$
II. Крупність і забрудненість піску		
7.	Зміна модуля крупності піску на кожні 0,5 менше 3 (X_3)	$\Delta B_7 = B_0 + (3 \dots 5)X_3$
	більше 3 (X_4)	$\Delta B_7' = B_0 - (3 \dots 5)X_4$
8.	Пісок із гладкою добре окатаною поверхнею	$\Delta B_8 = B_0 - 4$
9.	Пісок промитий	$\Delta B_9 = B_0 - 7$
10.	Збільшення вмісту в піску мулу і пилу на кожний % понад 3% (X_5)	$\Delta B_{10} = B_0 + 2X_5$
11.	Зміна нормальної густоти цементного тіста у % більше 28% (X_6)	$\Delta B_{11} = B_0 + 4X_6$
	менше 28% (X_7)	$\Delta B_{11}' = B_0 - 4X_6$
12.	Зміна витрати цементу на кожні 10 кг понад 350 кг/м ³ (X_7)	$\Delta B_{12} = B_0 + X_7$
III. Температура бетонної суміші, °C		
	5	$\Delta B_{13} = B_0 - 5$
	10	$\Delta B_{13} = B_0 - 4$
	15	$\Delta B_{13} = B_0 - 2$
	25	$\Delta B_{13} = B_0 + 3$
	30	$\Delta B_{13} = B_0 + 7$
	35	$\Delta B_{13} = B_0 + 11$

Примітка: 1. B_0 – розрахункова витрата води без поправок.



Суттєво знижують витрату води добавки пластифікатори (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Класифікація пластифікаторів бетонних сумішей

Категорія	Найменування	Збільшення ОК із 2...4 см	Зменшення кількості води, %
I	Суперпластифікатори	До 20 і більше	не менше 20
II	Пластифікатори	14...19	не менше 10
III	Пластифікатори	9...13	не менше 5
IV	Пластифікатори	8 і менше	менше 5

Для визначення зміни водопотреби бетонних сумішей за межами правила сталості водопотреби можна збільшення водопотреби ΔB знаходити за емпіричною формулою:

$$\Delta B = \left(\frac{C}{B} - \left(\frac{C}{B} \right)_{кр} \left(\frac{B_0}{100} \right)^{5,5} \right) \quad (4.11)$$

У табл. 4.3 наведені значення водовмісту бетонної суміші при $\frac{C}{B} \leq \left(\frac{C}{B} \right)_{кр}$ та різних показниках осадки конуса і жорсткості бетонної суміші, а також значення ΔB , обчислені за формулою (4.11) і знайдені за методикою В.П. Сизова відповідно залежно від $\frac{C}{B}$ і витрати цементу. Водовміст бетонних сумішей знаходили за умови використання портландцементу ($K_{н.г}=0,27$), кварцового піску ($M_k=3$) і гранітного щебеню ($D=20$ мм).

Таблиця 4.3

Розрахункові значення B_0 і ΔB

ОК, см	Ж, с	B_0 при $\left(\frac{C}{B} \right)_{кр} \leq 2,20$	ΔB за (4.11)		$\frac{C}{B} = B_0 \cdot \frac{C}{B}$		ΔB за В.П. СИЗОВИМ	
			$\frac{C}{B} = 2,5$	$\frac{C}{B} = 3,0$	$\frac{C}{B} = 2,5$	$\frac{C}{B} = 3,0$	$\frac{C}{B} = 2,5$	$\frac{C}{B} = 3,0$
5	-	190	10,2	27,3	475	570	12,5	22,0
10	-	207	16,4	-	517	-	16,7	-
15	-	220	22,9	-	550	-	20,0	-
	7	167	5,0	13,4	417	501	6,7	15,1
	17	155	1,6	4,2	337	405	0	5,5



Таблиця 4.4

Експериментально-статистичні моделі властивостей литих
цементно-зольних бетонних сумішей

Параметр	Рівняння регресії
Діаметр розпливу стандартного конусу, см	$y_1 = 45,05 + 3,39x_1 + 1,39x_2 - 2,84x_3 - 0,5x_4 + 2,78x_5 - 3,07x_1^2 - 3,08x_2^2 + 1,9x_3^2 - 1,07x_4^2 + 0,43x_5^2 + 2,25x_1x_4 + 1,13x_2x_5 + 1,12x_3x_4 - 2,25x_3x_5$ (4.12)
Витрата добавки суперпластифікатора, кг/м ³	$y_2 = 3,28 - 0,07x_1 - 0,94x_2 - 1,06x_3 + 0,37x_4 + 0,7x_5^2 + 0,25x_3^2 + 0,14x_4^2 - 0,23x_5^2 - 0,24x_1x_2 - 0,25x_1x_4 - 0,32x_1x_5 - 0,17x_3x_5$ (4.13)
Об'єм втягнутого повітря, %	$y_3 = 0,86 - 0,24x_1x_2 + 1,03x_3 - 0,6x_4 + 1,4x_5 - 0,2x_1^2 + 0,91x_2^2 + 0,79x_4^2 + 0,05x_5^2 + 0,53x_1x_3 - 0,54x_1x_5 - 0,656x_2x_5 - 0,34x_3x_4 + 0,41x_3x_5 - 0,59x_4x_5$ (4.14)
Водовідділення, г/л	$y_4 = 0,37 - 0,35x_1 + 0,51x_2 + 0,75x_3 - 0,56x_4 - 0,45x_5 - 0,15x_1^2 + 0,57x_3^2 - 0,15x_4^2 + 0,23x_5^2 - 0,09x_1x_2 - 0,09x_1x_3 - 0,22x_1x_5 + 0,41x_2x_3 - 0,33x_2x_4 - 0,28x_2x_5 - 0,32x_3x_4 - 0,32x_3x_5 + 0,2x_4x_5$ (4.15)
Розчинівідділення, %	$y_5 = 5,65 + 0,94x_1 - 2,48x_3 - 0,63x_4 + 1,28x_5 - 0,43x_1^2 - 0,43x_2^2 + 1,37x_3^2 - 1,23x_4^2 - 1,56x_5^2 - 0,48x_1x_2 + 0,46x_1x_4 + 0,7x_1x_5 + 0,56x_2x_3 - 0,56x_2x_4 + 0,81x_3x_4 - 0,53x_3x_5$ (4.16)
tg φ	$y_6 = 0,23 - 0,08x_1 - 0,04x_2 + 0,06x_3 - 0,07x_5 + 0,12x_1^2 + 0,05x_2^2 - 0,05x_3^2 + 0,02x_4^2 + 0,01x_5^2 - 0,07x_1x_4 - 0,02x_3x_4$ (4.17)



Таблиця 4.5

Умови планування експериментів

Фактори		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
натуральні	кодовані	-1	0	+1	
Водоцементне відношення	X_1	0,5	0,6	0,7	0,1
Витрата води, $\text{кг}/\text{м}^3$	X_2	180	190	200	10
Доля піску в об'ємі піску та щебеню, r_n	X_3	0,34	0,41	0,48	0,07
Витрата золи D_3 , $\text{кг}/\text{м}^3$	X_4	50	150	250	100
Питома поверхня золи S_3 , $\text{см}^2/\text{г}$	X_5	2900	3900	4900	1000

У розрахунок водопотреби при наявності відповідного експериментального матеріалу можна ввести крім зазначених в табл. 4.1 й інші поправки, однак прагнення врахувати вплив усіх факторів на водопотребу непродуктивне. Остаточна корекція дійсно необхідної витрати води для досягнення заданого показника легкоукладальності повинна виконуватися в процесі виробничої адаптації складів.

Експериментально-статистичні моделі властивостей бетонної суміші, що отримують, зазвичай, за допомогою математичних методів планування експериментів, використовують, як було зазначено, з урахуванням конкретних умов і варійованих у певній області технологічних факторів. Для прикладу, в табл. 4.4 наведені експериментально-статистичні моделі для литих цементно-зольних бетонних сумішей, що характеризують діаметр розпливу стандартного конусу, см (y_1), витрату добавки суперпластифікатора, $\text{кг}/\text{м}^3$ (y_2), об'єм втягнутого повітря, % (y_3), а також параметрів, що характеризують однорідність та стійкість бетонних сумішей до розшарування: водовідділення, г/л (y_4), розчинівідділення, % (y_5), $\text{tg}\phi$ (y_6). Умови планування експериментів при отриманні моделей (табл. 4.4.) наведені в табл. 4.5.



Приклади

4.1. Розрахувати орієнтовну водопотребу бетонної суміші для пресованих виробів. Склад бетонної суміші: цемент 320 кг/м^3 , пісок – 680 кг/м^3 , щебінь фракції $5...10 \text{ мм}$ – 1250 кг/м^3 . Водопоглинання зерен піску за масою $0,3\%$, щебеню $0,5\%$. Коефіцієнти змочування: пісок – $0,021$ ($2,1\%$), щебінь – $0,012$ ($1,2\%$). Нормальна густина цементу – $0,25$ (25%). Допустимий коефіцієнт ущільнення бетону $K_{\text{ущ}}=0,98$.

Для розрахунку водопотреби бетонної суміші скористуємось формулою (4.1).

Прийmemo $X=0,876$.

Знайдемо об'єм води, що буде поглинатись заповнювачами

$$V_{\text{погл.зап.}} = \frac{0,3 \cdot 680}{100} + \frac{0,5 \cdot 1250}{100} = 2,04 + 6,25 = 8,29 \text{ л/м}^3.$$

Об'єм води, що заповнить міжзернові порожнини після ущільнення бетону при $K_{\text{ущ}}=0,98$

$$1000 - 980 = 20 \text{ л/м}^3.$$

Розрахункова витрата води, л :

$$V = 0,876 \cdot 0,25 \cdot 320 + 0,021 \cdot 680 + 0,012 \cdot 1250 + 8,29 + 20 = 70,08 + 14,2 + 15 + 8,29 + 20 = 127,5 \text{ л/м}^3.$$

4.2. Бетонна суміш мала наступний склад: $\text{Ц}=360 \text{ кг/м}^3$, $\text{В}=180 \text{ кг/м}^3$, $\text{П}=710 \text{ кг/м}^3$, $\text{Щ}=1280 \text{ кг/м}^3$. Коефіцієнт змочування піску склав $K_{\text{з.п.}}=0,018$, щебеню $K_{\text{з.щ.}}=0,008$, нормальна густина цементу $K_{\text{н.ц.}}=0,24$. Для досягнення необхідної міцності В/Ц бетонної суміші довелося зменшити до $\text{В/Ц}=0,35$, за рахунок збільшення витрати цементу. Яким є очікуване підвищення витрати води при збереженні постійної легкоукладальності суміші?

Знайдемо за формулою (4.4) для заданого складу бетонної суміші діапазон, в якому знаходиться критичне В/Ц , нижче якого порушується правило постійної водопотреби:



$$\begin{aligned}(V/C)_{кр} &= (1,35 \dots 1,65) 0,24 + \frac{0,018 \cdot 710 + 0,008 \cdot 1280}{360} = \\ &= (0,32 \dots 0,4) + \frac{12,78 + 10,24}{360} = (0,32 \dots 0,4) + 0,064 = 0,38 \dots 0,46\end{aligned}$$

Приймаємо $(V/C)_{кр} = (0,38 + 0,46) / 2 = 0,42$

Орієнтовне підвищення витрати води (ΔV) знайдемо за емпіричною формулою (4.11) при $V/C = 0,35$ ($C/V = 2,86$):

$$\Delta V = (2,86 - 1 / 0,42) \left(\frac{180}{100} \right)^{5,5} = 25,35 \text{ л / м}^3$$

4.3. Розрахувати водопотребу бетонної суміші, необхідну для досягнення нею рухомості $OK=10$ см. Для отримання бетонної суміші використовують промитий гранітний щебінь з максимальною крупністю 20 мм, дрібний пісок з модулем крупності $M_k=1.5$, портландцемент з нормальною густиною $\rho_k=27\%$. У бетонну суміш вводиться пластифікуюча добавка III категорії.

Для розрахункового оцінювання водопотреби бетонної суміші використовуємо рівняння (4.9):

$$\begin{aligned}V_0 &= 176 - 0,8 \cdot 20 + 6,1 \cdot 10 + 0,0029 \cdot 202 - 0,14 \cdot 102 = \\ &= 176 - 16 + 61 + 1,16 - 14 = 208,2 \text{ л / м}^3\end{aligned}$$

Врахуємо поправки на якість вихідних матеріалів згідно табл. 4.11.

$$\begin{aligned}V &= 208,2 - 6 + (3 \dots 5) 3 - 4 - (5 \dots 10) / 100 \cdot 208,2 = \\ &= 197 \dots 192 \text{ л / м}^3.\end{aligned}$$

Розрахункова водопотреба бетонної суміші:

$$V = 192 \dots 197 \text{ л / м}^3.$$



4.4. Знайти як зміниться водоутримуюча здатність бетонної суміші, яка була виготовлена на портландцементі з нормальною густиною 24%, піску з водопотребою 7% і щебеню з водопотребою 3% при переході на цемент з НГ=28%, пісок з $V_n=9\%$ і щебінь з $V_{щ}=3,5\%$. Питомі витрати цементу, піску та щебеню відповідно 290 кг/м^3 , 750 кг/м^3 , 1250 кг/м^3 .

Для прогнозування водоутримуючої здатності бетонної суміші використовуємо рівняння (4.6).

Для заданих двох варіантів, що відрізняються якісними показниками вихідних компонентів, розрахункова водоутримуюча здатність бетонної суміші (B_{yt}) буде наступною:

$$1. B_{yt} = 1,35 \cdot 0,24 \cdot 290 + 0,07 \cdot 750 + 0,03 \cdot 1250 = 184,9 \text{ л/м}^3$$

$$2. B_{yt} = 1,35 \cdot 0,28 \cdot 290 + 0,09 \cdot 750 + 0,035 \cdot 1250 = 220,9 \text{ л/м}^3$$

4.5. Проаналізувати за допомогою експериментально-статистичних моделей (табл. 4.4) вплив питомої витрати золи-виносу та її дисперсності на легкоукладальність бетонних сумішей.

Для порівняльного оцінювання впливу технологічних чинників на легкоукладальність литих сумішей може служити модель діаметра розпливу конуса (y_1).

Вплив основних технологічних факторів на легкоукладальність можна простежити і з аналізу моделі необхідної витрати добавки суперпластифікатора (y_2). Відомо, що гранулометричний склад золи-виносу, що дозволяє заповнити в бетонних сумішах нестачу зерен, які мають проміжну крупність між цементом і піском, а також гладка куляста поверхня частинок золи, зумовлюють підвищення легкоукладальності жорстких і пластичних бетонних сумішей.

Отримані результати дозволили підтвердити це положення і для литих золомістких бетонних сумішей. Причому, збільшення водовмісту при незмінних інших факторах призводить до підвищення оптимальної витрати золи.



Як впливає з аналізу моделей, вплив витрати золи на легкоукладальність не може розглядатися без урахування її дисперсності. Аналіз моделей (4.12 і 4.13) показує, що вплив дисперсності золи на легкоукладальність литої суміші не може бути оцінено однозначно. Крім витрати золи на вплив питомої поверхні золи позначається В/Ц і доля піску в об'ємі заповнювачів (γ_n) бетонних сумішей.

Збільшення дисперсності золи, введеної в оптимальних кількостях при максимальній частці піску (в досліджуваних інтервалах), сприяє зменшенню в'язкості цементно-зольного тіста і, як наслідок, підвищенню легкоукладальності литих сумішей, при мінімальній частці піску – легкоукладальність погіршується. (рис. 4.2)

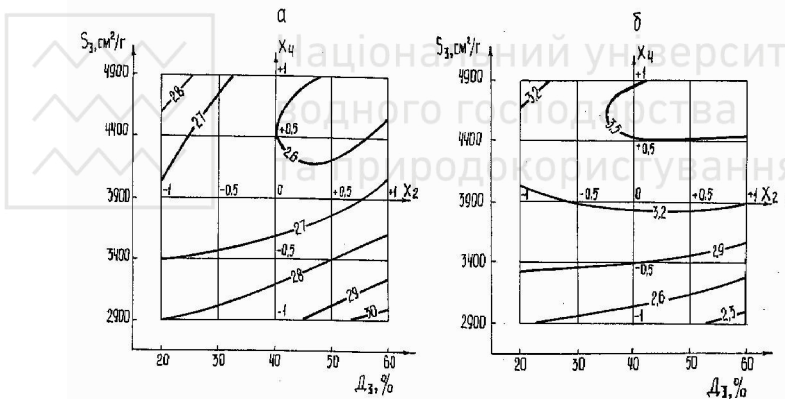


Рис. 4.2. Вплив витрати і дисперсності золи на діаметр розпливу (D_p) і логарифм величини ефективної в'язкості ($\ln \eta$) цементно-зольного тіста (при $V/(Ц+З)=0,28$ і витраті добавки суперпластифікатора 0,8%): а – ізолінії D_p , см; б – ізолінії $\ln \eta$, (Па·с).

Цей факт зумовлений зміною гранулометричного складу золи при її помелі. При підвищенні дисперсності золи в першу чергу різко скорочується вміст крупних зерен, що при зниженій частці піску несприятливо позначається на загальній



гранулометрії заповнювачів суміші, при підвищеній частці піску, навпаки, сприяє створенню найбільш сприятливої для досягнення максимальної легкоукладальності безперервної гранулометрії.

4.6. Проаналізувати за допомогою експериментально-статистичних моделей (табл. 4.4.) вплив питомої витрати золи-виносу та її дисперсності на водо- та розчинувідділення бетонної суміші.

Аналіз математичної моделі (4.15) показує, що ефективність добавки золи-виносу зростає зі збільшенням її кількості і зі зменшенням В/Ц. При цьому останнє є провідним фактором, що визначає водовідділення. Так, при витраті золи 90 кг і В/Ц=0,5 величина водовідділення становить 0,25 г/л, а зі збільшенням В/Ц до 0,7 воно зростає до 1,45 г/л, (рис. 4.3).

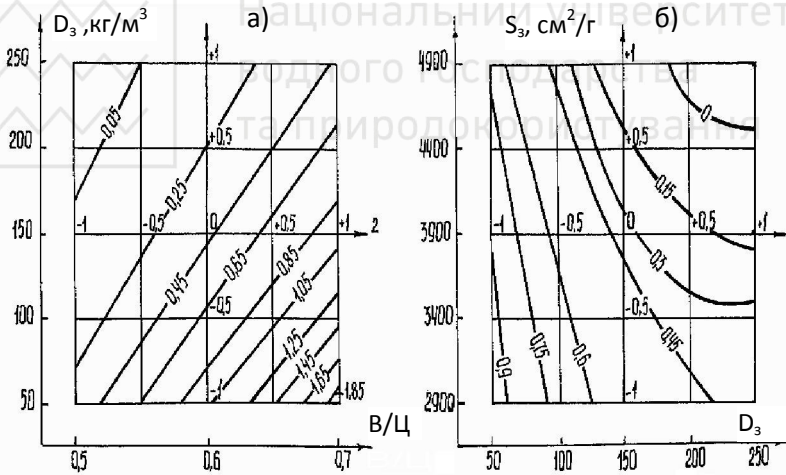


Рис. 4.3. Ізолінії водовідділення (г/л) литих золомістких сумішей:

а – В = 190 кг/м³; $r_{\Pi} = 0,41$; $S_3 = 4900 \text{ см}^2/\text{г}$;

б – В/Ц = 0,6; В = 190 кг/м³; $r_{\Pi} = 0,41$.



При $V/C=0,7$ збільшення витрати золи від 50 до 150 $\text{кг}/\text{м}^3$ призводить до зменшення водовідділення від 1,85 г/л до 1,05 г/л. Подальше збільшення витрати золи до 250 $\text{кг}/\text{м}^3$ дозволяє зменшити величину водовідділення до 0,45 г/л. Позитивний вплив на величину, як водовідділення, так і розчинівідділення литих золомістких бетонів має, поряд зі збільшенням витрати золи, і підвищення її дисперсності (рис. 4.3, 4.4). Наприклад, при витраті золи 250 кг з питомою поверхнею 2900 $\text{см}^2/\text{г}$ величина водовідділення становить 0,45 г/л, а при збільшенні питомої поверхні до 3900 $\text{см}^2/\text{г}$ вона знижується до 0,15 г/л.

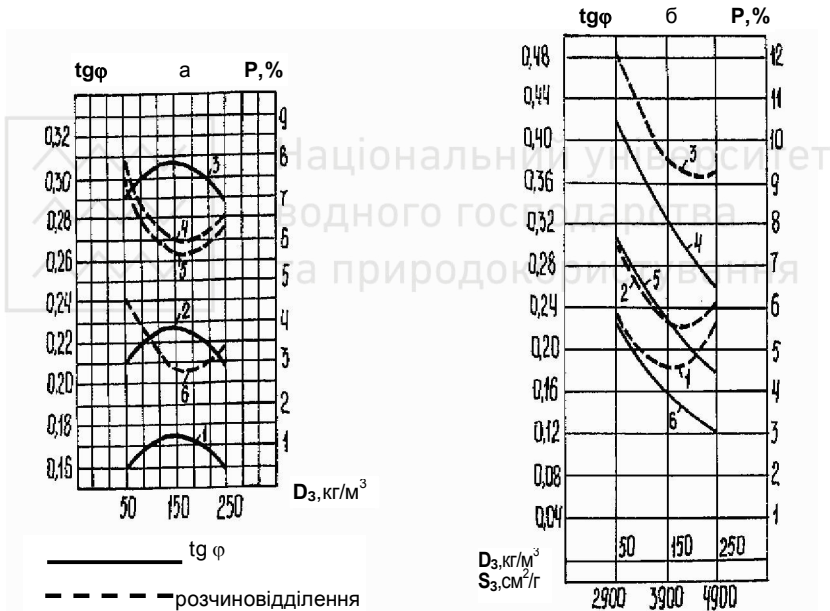


Рис. 4.4. Вплив витрати і дисперсності золи на $\text{tg } \phi$ і розчинівідділення (P) литих золомістких бетонних сумішей:

а – вплив витрати золи (D_3) на величину $\text{tg } \phi$ і розчинівідділення при $V/C=0,6$; $V=190 \text{ кг}/\text{м}^3$; $r_{II}=0,41$ і S_3 : 1, 4 - 4900; 2, 5 - 3900; 3, 6 - 2900 $\text{см}^2/\text{г}$;

б – вплив витрати золи (D_3) на розчинівідділення при $V/C=0,6$; $V=190 \text{ кг}/\text{м}^3$; $S_3=3900 \text{ см}^2/\text{г}$; r_{II} : 1 - 0,48; 2 - 0,41; 3 - 0,34;

вплив S_3 на величину $\text{tg } \phi$.

$V=190 \text{ кг}/\text{м}^3$; $r_{II}=0,41$; $D_3=150 \text{ кг}/\text{м}^3$ і V/C : 4 - 0,5; 5 - 0,6; 6 - 0,7.



Таким чином, чутливість водовідділення до витрати золи істотно зростає зі збільшенням її питомої поверхні, що зумовлює можливість при підвищеному В/Ц використовувати золу при раціональному дозуванні $150 \dots 200 \text{ кг/м}^3$ в якості водоутримуючої добавки в литих бетонних сумішах після її додаткового подрібнення.

З аналізу моделі (4.15) можна також зробити висновок, що на величину водовідділення позитивний вплив від збільшення витрати золи позначається більшою мірою при одночасному збільшенні частки піску в суміші заповнювачів.

Особливістю литих сумішей є можливість внутрішнього і зовнішнього розшарування. Перше зумовлено дією сили тяжіння і зменшується при збільшенні в'язкості розчинової частини і зменшенні крупності зерен заповнювача. Друге виникає в результаті недостатнього зчеплення щебеню і розчинової складової, що може бути зумовлено надмірно високою в'язкістю останньої або підвищеним вмістом щебеню.

На підставі аналізу математичних моделей (4.16) і (4.17) можна зробити висновок, що добавка золи-винесення чинить позитивний вплив на зниження розшарованості литої золомісткої — бетонної суміші. Поряд з показником розчинівідділення стійкість бетонної суміші до розшарування характеризує $\text{tg}\varphi = (30 - \text{OK}) / 0.5D_p$, де ОК — осадка конуса; D_p — діаметр розпливу конуса. При цьому слід зазначити екстремальний характер цього впливу (рис. 4.4), який можна пояснити тим, що оптимальній витраті золи відповідає деяка найкраща гранулометрія суміші.

Як видно з аналізу математичних моделей (4.16), (4.17), оптимальні значення витрати золи і її дисперсності різні для параметрів водовідділення та розшарування литого золомісткого бетону. Тому вибір оптимальних витрат золи і її дисперсності необхідно здійснювати в деякій компромісній зоні таким чином, щоб вона дозволяла отримати бетонні суміші, що задовольняють всім необхідним вимогам.

4.7. Проаналізувати за допомогою експериментально-статистичної моделі (табл. 4.4) вплив питомої витрати золи-



виносу та її дисперсності на повітрявтягування у бетонну суміш.

Аналіз експериментально-статистичної моделі (y_3) показує, що збільшення витрати золи в досліджуваних інтервалах призводить до зменшення величини повітрявтягування в литих бетонних сумішах. Збільшення дисперсності золи, навпаки, сприяє збільшенню кількості втягнутого повітря. Наприклад, при $V/C=0,5$; $V=180 \text{ кг/м}^3$; $r_n=0,41$; $S_3=3900 \text{ см}^2/\text{г}$ і витраті золи 50 кг/м^3 , об'єм втягнутого повітря становить 3,8% при витраті золи 150 кг – 2,6%, а при витраті золи 250 кг – 2,15%. При тих же значеннях V/C і V , $r_n=0,48$ і $D_3=250 \text{ кг/м}^3$ підвищення S_3 з 2900 до $4900 \text{ см}^2/\text{г}$ призводить до збільшення об'єму втягнутого повітря від 0,9% до 5,6%, що повинно забезпечувати досить високу морозостійкість бетону.

Позитивний вплив на повітрявтягування від підвищення S_3 позначається більшою мірою зі збільшенням r_n . Так, підвищення S_3 з 2900 до $4900 \text{ см}^2/\text{г}$ при $r_n=0,34$ дозволяє досягти повітрявтягування 1,77% в бетонну суміш, яка практично не містить повітря, а при $r_n=0,48$ повітрявтягування зростає від 0,71 до 4,42%.

Вправи

4.1. Для виготовлення вібропресованих виробів використана дрібнозерниста бетонна суміш на портландцементі з нормальною густиною 27%, кварцовому піску з коефіцієнтом змочування $K_{зм}=1,5\%$ і гранітному щебеню фракції 5...10 мм з $K_{зм}=1.11\%$. Водопоглинання заповнювачів наближається до нуля. Витрати на 1 м^3 бетонної суміші: цементу – 280 кг/м^3 , піску – 810 кг/м^3 , щебеню – 1200 кг/м^3 . Коефіцієнт ущільнення бетону має бути не менший 0,97. Розрахувати необхідний об'єм води і V/C бетонної суміші. Значення максимальної вологості цементу $X_{м.в.}=0,65$.

4.2. При незмінному складі бетонної суміші для вібропресованого бетону, вказаному у попередній вправі, як



зміниться його водоцементне відношення, якщо вихідні компоненти будуть мати наступні характеристики: $K_{н.г.}=29\%$, $K_{з.м}$ піску $2,1\%$, щебеню – $K_{з.м}=1,1$; водопоглинання – $0,8\%$. Коефіцієнт ущільнення бетону – $0,96$, $X_{м.в.}=0,72$.

4.3. Бетонна суміш мала вміст цементу з $НГ=27\%$ 290 кг/м^3 , вміст води був 190 л/м^3 . Як зміниться вміст води при незмінній рухомості бетонної суміші та витратах цементу 350 кг/м^3 , 430 кг/м^3 та 480 кг/м^3 . Побудувати графік водопотреби бетонної суміші залежно від цементно-водного відношення.

4.4. У бетонну суміш з вмістом цементу $Ц=390 \text{ кг/м}^3$, що мав $НГ=27\%$ для забезпечення необхідної легкоукладальності додавали 210 л/м^3 води. Для зменшення водопотреби бетонної суміші при забезпеченні постійної легкоукладальності вводили пластифікуючі добавки, які відносились за водоредукуючим ефектом до різних категорій. Добавка №1 зменшила водопотребу бетонної суміші на 20% , нормальну густоту цементу на 15% , добавка №2 відповідно на 10 і 8% , добавка №3 – на 7 і 5% . Зробити прогноз чи зміниться витрата води при введенні у бетонну суміш пластифікуючих добавок при зменшенні В/Ц до $0,5$, $0,45$ та $0,4$.

4.5. Розрахувати за формулою І.М.Грушко як зміниться водоутримуюча здатність бетонної суміші з витратою цементу ($K_{н.г.}=0,25$) 310 кг/м^3 при заміні крупного піску ($B_{п.}=5,5\%$) на дрібний ($B_{п.}=8,1$) при незмінній його витраті $П=750 \text{ кг/м}^3$, а також щебеню №1 на №2. Характеристика щебеню наведена нижче. Вміст зерен лещадної форми в обох видах щебеню був меншим 15% :

щебінь	$\rho_{н.щ.}$ кг/м^2	$\rho_{щ.}$ кг/м^2	a_{20} %	a_{10} %	a_5 %
№ 1	1600	2650	5	65	25
№ 2	1650	2700	3	35	56



4.6. Для важкого бетону з застосуванням гранітного відсіву як дрібного заповнювача була отримана при реалізації факторного плану B_3 у відповідності з умовами планування експериментів, наведеними у табл. 4.6, експериментально-статистична модель розчинівідділення (%).

$$P = 2,69 - 0,79x_1 + 0,56x_2 - 1,16x_3 + 0,68x_1^2 - 0,46x_2^2 + 0,22x_3^2 + 0,19x_1x_2 + 0,053x_1x_3 - 0,31x_2x_3 \quad (4.18)$$

Рухомість бетонної суміші підтримувалась в межах $OK=15\dots 18$ см і забезпечувалась додаванням суперпластифікатора СП-1.

Проаналізувати і співставити вплив досліджених факторів на розчинівідділення бетонної суміші. Побудувати відповідні графіки.

Таблиця 4.6

Умови планування експериментів при отриманні рівняння (4.18)

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральні	кодовані	-1	0	+1	
Водоцементне відношення	X_1	0,35	0,4	0,45	0,05
Частка відсіву % від маси дрібного заповнювача	X_2	0	50	100	50
Частка дрібного заповнювача в суміші заповнювачів	X_3	30	45	60	15

4.7. В результаті статистичної обробки експериментальних даних від реалізації факторного плану B_3 отримана поліноміальна модель водопотреби бетонних сумішей, які призначені для вібропресування:

$$B = 109 + 19x_1 + 23x_2 + 23x_3 + 7x_1^2 + 6x_2^2x_3^2 - x_3^2 - 3x_2x_3 \quad (4.19)$$



Умови планування експериментів наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Умови планування експериментів при отриманні рівняння (3.25)

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральні	кодовані	-1	0	+1	
Ц/В	X_1	1,4	2,2	3	0,8
Вміст частинок <0.16 мм, (%)	X_2	0	9	18	9
Вміст гранітних відсівів у суміші з кварцовим піском	X_3	50	75	100	25

Проаналізувати вплив окремих факторів та ефектів їх взаємодії. Побудувати відповідні графіки.

4.8. Для дослідження водопотреби та легкоукладальності бетонних сумішей на основі композиційних золівмісних цементів з добавками поліфункціонального модифікатора (ПФМ), який містив суперпластифікатор полікарбоксилатного типу і інтенсифікатор помелу пропіленгліколь, був реалізований тривірневий чотирифакторний план B_4 , умови якого наведені в табл.4.8.

Таблиця 4.8

Умови планування експериментів
при отриманні рівняння (4.20)

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральні	кодовані	-1	0	+1	
Вміст добавки ПФМ, %	X_1	0,4	0,7	1,0	0,3
Питома поверхня цементу, m^2/kg	X_2	350	450	550	100
Витрата цементу, kg/m^3	X_3	300	400	500	100
Рухомість суміші, ОК, см	X_4	2	13	24	11



Після обробки і статистичного аналізу отримана експериментально-статистична модель водопотреби бетонної суміші.

$$\begin{aligned} B_{б.с.} = & 142 - 24,92x_1 + 1,14x_2 + 3,92x_3 + 5,49x_4 - \\ & - 0,68x_1^2 + 1,82x_2^2 + 0,82x_3^2 - 1,18x_4^2 - 0,63x_1x_2 + \\ & + 0,63x_1x_3 + 1,25x_2x_4 + 0,38x_3x_4 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Виконати аналіз впливу окремих факторів на водопотребу бетонної суміші та ефектів їх взаємодії. Побудувати відповідні графіки.

4.2. Розрахункове прогнозування міцності бетону

Міцність бетону і правило В/Ц. На міцність бетону впливає комплекс параметрів, що характеризують властивості вихідних матеріалів, склад бетонної суміші, структуру бетону та умови його твердіння. Одним з найважливіших параметрів, що впливає на міцність бетону є водоцементне відношення.

Американський інженер Абрамс у 1920 р. узагальнив результати більш ніж 50 тисяч випробувань і сформулював т.зв. *правило (закон) водоцементного відношення*, згідно якому міцність бетону, приготовленого на однакових вихідних матеріалах визначається лише водоцементним відношенням (В/Ц) і запропонував емпіричну формулу:

$$f_{cm} = \frac{K}{A^x}, \quad (4.21)$$

де f_{cm} – міцність бетону на стиск;

K і A – коефіцієнти;

x – відношення об'єму води до об'єму цементу, насипна густина якого прийнята рівною 1500 кг/м^3 .

Пройшовши з розвитком бетонознавства певну еволюцію, правило водоцементного відношення в сучасній редакції не стверджує, що В/Ц є єдиним фактором, що впливає на міцність бетону при постійних вихідних матеріалах, але тим не менш є одним з визначальних.



Правило В/Ц доцільно розглядати як наслідок, що впливає з універсальної фізичної залежності міцності твердих матеріалів (R) від їх відносної густини або пористості. Аналіз розмаїття відомих емпіричних формул показує, що в найбільш загальному вигляді для твердих тіл цю залежність можна виразити ступеневою функцією:

$$R = R_0(1 - \Pi)^n, \quad (4.22)$$

де Π – пористість;

n – показник ступеня, що враховує особливості структури матеріалів;

R_0 – міцність безпорового матеріалу.

При заміні пористості на величину відносної густини $d=1-\Pi$ формула (4.22) набуває виду:

$$R = R_0 d^n. \quad (4.23)$$

Численними дослідженнями доведено, що залежності міцності бетону від водоцементного або оберненого йому цементноводного відношення дають задовільні результати (рис.4.5).

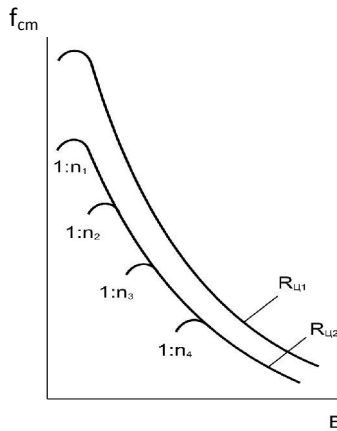


Рис. 4.5. Залежність міцності бетону від В/Ц та $R_{ц}$: $1:n_1$ – відношення маси цементу до маси заповнювача; $R_{ц}$ – міцність (активність) цементу; $R_{ц1} > R_{ц2}$



Багато досліджень показали вплив на міцність поряд із Ц/В легкоукладальності бетонної суміші, об'ємної концентрації цементного каменю і ряду інших факторів. За даними Ю.М.Баженова, фактична міцність бетону може відрізнятись від розрахункової в 1,3...1,5 рази. Склади з великою витратою цементу при однакових значеннях В/Ц характеризуються, як правило, меншою міцністю і навпаки, більш "пісні", але достатньо ущільнені бетони, мають підвищену міцність. Важливу роль відіграють також крупність, водопоглинання, характер поверхні заповнювачів, час з моменту їх подрібнення та інші фактори.

Правило водоцементного відношення справедливе для бетонів, у яких модуль пружності і, відповідно, міцність заповнювачів більше модуля пружності і міцності цементного каменю. Ця умова виконується для важких бетонів. У легких бетонах модуль пружності і міцності пористих заповнювачів можуть бути суттєво нижчі, ніж відповідні характеристики цементного каменю, якщо вони значною мірою визначають міцність бетонів

Важкі бетони. Основними для прогнозування міцності важкого бетону на стиск (f_{cm}) залежно від його складу, а також проектування складу бетону з заданою міцністю є формули виду:

$$f_{cm} = AR_u (C / B - \epsilon), \quad (4.24)$$

де C/B – цементно-водне відношення;

A і ϵ – коефіцієнти.

Ці формули обґрунтовані М. Болomes, А. Яшвилі, Б.Г. Скрамтаєвим, Ю.М. Баженовим, В.П. Сизовим та іншими дослідниками.

Для розрахунків найбільш широко застосовують формули, що запропоновані Б.Г. Скрамтаєвим і Ю.М. Баженовим.

Після обробки результатів широких експериментальних досліджень Б.Г. Скрамтаєв і Ю.М. Баженов запропонували залежності, які відображають у цілому нелінійний характер залежності міцності бетону від Ц/В:



$$\text{при } C/B \leq 2,5 \quad f_{cm} = A R_y (C / B - 0,5), \quad (4.25)$$

$$\text{при } C/B \geq 2,5 \quad f_{cm} = A_1 R_y (C / B + 0,5). \quad (4.26)$$

Значення коефіцієнтів A і A_1 залежать від якості вихідних матеріалів.

Матеріали для бетону:	A	A_1
високоякісні	0,65	0,43
рядові	0,6	0,4
зниженої якості	0,55	0,37

Для більш повного врахування факторів, що впливають на міцність бетону, коефіцієнт A (мультиплікативний коефіцієнт) можна виразити добутком:

$$pA = A \cdot A_1 A_2 \dots A_n \quad (4.27)$$

де $A_1 \dots A_n$ – додаткові коефіцієнти, що враховують вплив на міцність бетону температури, тривалості тверднення, добавок та ін.

Наведені формули справедливі для бетонів з помірно жорстких і рухомих бетонних сумішей, вкладених вібрацією, з коефіцієнтом ущільнення не нижче 0,98.

Шляхом узагальнення довідкових даних виведена єдина формула з усередненими коефіцієнтами:

$$f_{cm} = 0,56 R_y (C / B - 0,5). \quad (4.28)$$

Середнє відхилення значень $f_{cm}/R_{ц}$, визначене за формулами, отриманими в різних лабораторіях, і формулою (4.28) складає 12...13%.

В.П. Сизов у всьому діапазоні значень міцності бетону для проектування складів бетону пропонує застосовувати формулу (4.28), при цьому приймати значення коефіцієнта A згідно табл.4.9 і додатково уточнювати поправками ΔA_i .



Таблиця 4.9

Значення коефіцієнта А (за В.П. Сизовим)

Вид заповнювача	Вміст глини, пилу і мулу в щебені (гравії) і піску, %	Значення коефіцієнта А для бетону на		
		щебені	гравію гірському	гравію річковому і морському
Щебінь (гравій) пісок	0 0	0,64	0,6	0,57
Щебінь (гравій) пісок	0 3	0,61	0,56	0,53
Щебінь(гравій) пісок	1 3	0,58	0,53	0,5
Щебінь (гравій) пісок	2 3	0,55	0,5	0,47
Щебінь(гравій) пісок	2 5	0,52	0,47	0,44

Поправки ΔA_i враховують:

- показник рухомості ОК:
 $\Delta A_1 = -0,0033OK$ (при $OK \leq 2\text{см}$ $\Delta A_1 = 0$)
- показник жорсткості Ж:
 $\Delta A_1 = 0,0012Ж$ (при $Ж \leq 5$ сек. $\Delta A_1 = 0$)
- нормальну густоту цементу НГ:
при $НГ > 27\%$ $\Delta A_2 = -0,0075(НГ - 27)$
при $НГ < 27\%$ $\Delta A_2 = 0,01(27 - НГ)$ (4.29)
- модуль крупності піску M_k :
 $\Delta A_3 = 0,01(M_k - 3)$
- найбільшу крупність крупного заповнювача $D_{щ}$:
при $D_{щ} = 10$ мм - $\Delta A_4 = -0,03$,
 $D_{щ} = 20$ мм - $\Delta A_4 = -0,02$,
 $D_{щ} = 40$ мм - $\Delta A_4 = 0,01$



Таблиця 4.10

Розрахункові формули міцності бетону на стиск

Автор	Формула
М.М. Беляєв	$f_{cm} = \frac{R_u}{A(B / \Pi)^{1,5}}, \quad (4.30)$ <p>де R_u – активність цементу; A – постійна, що залежить від виду заповнювачів; $A = 3.5 \dots 4$.</p>
М.З. Сімонов	$f_{cm} = 0,49AR_u \left(\frac{3,1\Pi / B}{3,1 + \Pi / B} \right)^2, \quad (4.31)$ <p>де A – коефіцієнт якості заповнювачів, що знаходиться в інтервалі $0,8 \dots 1,1$.</p>
Л.А. Кайсер Р.С. Чехова	$f_{cm} = \frac{(2,3R_u + 100) \Pi / B - 80^*}{10} \quad (4.32)$
О.А. Гершберг Л.А. Левин	$f_{cm} = (1,72R_u + 84) \left(\frac{\Pi / B}{\Pi / B + \rho_u} - 0,17 \right), \quad (4.33)$ <p>де ρ_u – густина цементу.</p>
Й.М. Ахвердов	$f_{cm} = \frac{K_1 K_2 R_u \sqrt{1 - \eta_x}}{\frac{1 + 1,65 K_{н.г}}{K_{н.г}} (B / \Pi)_0 - 1,65 K_{н.г}}, \quad (4.34)$ <p>де K_1 – коефіцієнт, який залежить від розмірів; K_2 – коефіцієнт, що враховує вид заповнювача; η_x – коефіцієнт, який враховує вміст тонкодисперсних фракцій у цементі і заповнювачах; $K_{н.г}$ – нормальна густина цементу.</p>
В.Н. Шмигальський	$f_{cm} = R_u \frac{0,6 - 0,0014B}{(B / \Pi)^{1/3}}, \quad (4.35)$ <p>де B – водопотреба бетонної суміші.</p>



продовження табл.4.10

І.М. Грушко	$f_{cm} = A_1 A_2 A_3 R_y = A_1 A_2 K (C / B - C) R_y, \quad (4.36)$ <p>де A_1, A_2, A_3 – коефіцієнти, що враховують вплив макро-, мезо- і мікроструктури на міцність бетону (табл.4.11...4.13).</p>
І.О. Риб'єв	$f_{cm} = \frac{f_{ц.к}^*}{\left(\frac{B / C}{B^* / C}\right)^n}, \quad (4.37)$ <p>де $f_{ц.к}^*$ – міцність цементного каменю оптимальної структури, виготовленого за тією ж технологією і випробуваного в тому ж віці, що і бетон; B/C і B^*/C – водоцементне відношення в бетоні і цементному камені оптимальних структур; n – коефіцієнт, що враховує особливості структури бетону (табл. 4.14).</p>

* При $C/B > 2.5$ одержану за формулою (4.32) міцність бетону необхідно зменшити на величину $\Delta B = 0,23 R_y (C / B - 2,5)$.

Поряд з формулами (4.25, 4.26, 4.28) запропоновані і застосовуються в значно менших масштабах також формули, що рекомендовані іншими авторами. Деякі з них наведені в табл.4.10. Крім B/C або C/B зроблено ряд спроб ввести в розрахункові формули інші фактори, що впливають на міцність.

Формули, що наведені в табл.4.10 мають певні особливості, переваги та недоліки, бажані умови застосування.

Таблиця 4.11

Значення коефіцієнта A_1

Щебінь	Пластичні суміші	Помірно жорсткі суміші
Вапняковий, шлаковий	1,08	1,13
Гранітний, базальтовий	1,08	1,13
Фракціонований звичайний	1	1,05



Таблиця 4.12

Значення коефіцієнта A_2

Пісок	Водопотреба пісків, %		
	6...9	9...12	більш 12
Звичайний (пилувато-глинистих часток до 3%)	1,0	0,95	0,90
Чистий (пилувато-глинистих часток до 1%)	1,05	1,0	0,95
Штучний з міцних порід	-	1,05	-

Таблиця 4.13

Значення коефіцієнтів K і C

Водоцементне відношення в частках від нормальної густоти цементного тіста	Коефіцієнт	Міцність	
		на стиск куба розміром 15×15×15 см	на згин призми розміром 15×15×60 см
Більше 1,65	K	0,60	0,42
	C	0,50	0,30
Менше 1,65	K	0,43	0,40
	C	-0,5	-0,5

Таблиця 4.14

Значення коефіцієнта n у формулі (4.37)

Різновид великого заповнювача в суміші	Порфірова структура бетону	Контактна структура бетону
Вапняковий щебінь	0,72...0,53	0,64...0,48
Гранітний щебінь	0,79...0,57	0,69...0,58
Природний гравій	1,32...0,94	1,20...0,94
Керамзитовий гравій	2,50...2,46	2,46...2,16

Правило В/Ц в класичній інтерпретації враховує лише вплив на міцність бетону щільності цементного каменю через параметр, що характеризує ступінь розрідження цементного клею в бетонних сумішах. Модифікування правила В/Ц і збільшення числа врахованих факторів, що впливають на міцність бетону досягається можливістю часткової заміни



цементу активними добавками й умовно прирівнюючи до впливу води, як основного пороутворюючого фактора, вплив пор заповнювача і залученого повітря.

Для практичних розрахунків при проектуванні складів важких і легких бетонів може використовуватися "приведене C/B ", яке враховує можливість заміни частини цементу мінеральними добавками і вплив на міцність повітряних пор, що утворені залишковим та втягнутим повітрям, а також пористими заповнювачами :

$$(C/B)_{пр} = \frac{V_u + K_{ц.е}D}{B + \Pi_3 V_3 + V_{пв}}, \quad (4.38)$$

де $K_{ц.е}$ – коефіцієнт “цементуючої ефективності” або “цементний еквівалент” мінеральної добавки (наповнювача), що вводиться в бетонну суміш для економії цементу;

C і D – питомі витрати цементу і мінеральної добавки;

$V_{пв}$ – об’єм повітря в бетонній суміші.

Формула міцності бетону залежно від $(C/B)_{пр}$ має загальний вид:

$$f_{cm} = pA_i ((C/B)_{пр} + e), \quad (4.39)$$

де pA_i – мультиплікативний коефіцієнт ($pA_i = A_1, A_2, \dots, A_n$), який враховує ряд технологічних факторів, що впливають на міцність бетону при постійному $(C/B)_{пр}$.

Таблиця 4.15
Значення коефіцієнта “цементуючої ефективності”
золи Бурштинської ТЕС

Клас бетону за міцністю	Коефіцієнт $K_{ц.е}$ для бетону		
	пропареного	нормального твердіння при марці цементу	
		500	400
C8/10	0,5	0,38	0,31
C12/15	0,40	0,28	0,20
C16/20	0,37	0,25	0,18
C20/25	0,25	0,16	0,10
C25/30	0,20	0,13	0,08



Коефіцієнт “цементуючої ефективності” легко визначити за експериментальними даними для рівномісних бетонів за формулою:

$$K_{ц.е.} = \frac{Ц_1 - Ц_2}{Д}, \quad (4.40)$$

де $Ц_1$ – витрата цементу в бетоні без мінеральних добавок;
 $Ц_2$ – витрата цементу в бетоні з мінеральними добавками;
 $Д$ – витрата добавки.

Для прикладу значення рекомендованого коефіцієнта “цементуючої ефективності” для золи-виносу Бурштинської ТЕС наведені в табл. 4.15.

Для бетону з однаковою міцністю і легкоукладальністю економія цементу $\Delta Ц$ за рахунок введення активної мінеральної добавки (активного наповнювача) може бути знайдена з рівняння:

$$\Delta Ц = K_{ц.е.} Д - \left(\frac{Ц}{B} \right)_{пр} \cdot \Delta B, \quad (4.41)$$

де ΔB – зміна водопотреби бетонних сумішей при додаванні мінеральної добавки.

Застосування “приведеного $Ц/B$ ” є раціональним, особливо, для розрахунку складів бетонів з обмеженою витратою цементу при введенні дисперсних мінеральних добавок. При врахуванні об’єму пор заповнювачів воно є також ефективним для розрахунку складів легких бетонів, а об’єму залученого повітря – бетонів з повітрявтягуючими добавками.

Різка прискорення процесів твердіння бетонів настає при температурах 70...95° С і особливо при 170...200° С (рис. 4.6). Температура тепловологісної обробки вище 100° С (запарювання) досягається у автоклавах.



$f_{cm}, \%$

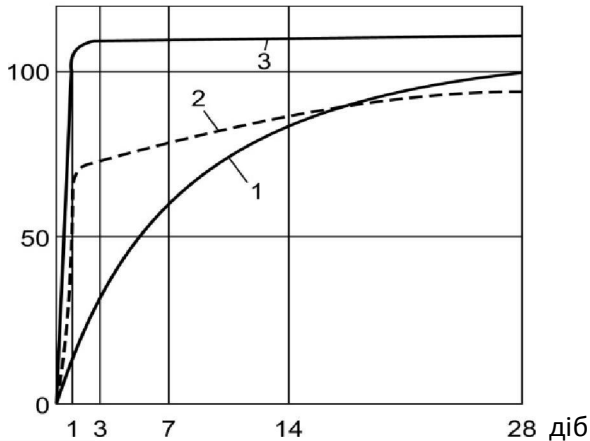


Рис. 4.6. Зростання міцності бетону в часі:

1 – нормальні умови твердіння;

2 – пропарювання при атмосферному тиску і температурі 80° С;

3 – запарювання в автоклаві при температурі 170° С

Оптимальна температура пропарювання бетонів на портландцементі 80...85 °С, більш висока температура в пропарювальних камерах призводить, зазвичай, до зниження кінцевої міцності, особливо відчутної для бетонів з рухомих сумішей з підвищеним В/Ц. Для бетонів на шлакопортландцементі і пуцолановому цементі оптимальна температура пропарювання має більш високі значення, ніж для бетонів на портландцементі.

Для бетонів, що піддаються тепловологісній обробці, запропоновано ряд спеціальних формул для розрахунку міцності.

У НДІ Залізобетону (Л.А. Касер, Р.С. Чехова) встановлена залежність міцності цементних розчинів і бетонів на цементах різного мінералогічного складу від часу теплової обробки (τ) у годинах при температурі ізотермічного витримування 80° С. Тепловій обробці піддавалися зразки за режимами 3+n+2 год.



(n – тривалість ізотермічного прогріву) з попередньою витримкою 2 год., випробували їх через 6 год. після витягування з камери. Встановлена залежність виражається формулою:

$$f_{cm} = A(\lg \tau - \lg \tau_0). \quad (4.42)$$

де A – параметр, який характеризує особливості впливу даного цементу при пропарюванні і умови випробування, МПа;

τ – час теплової обробки в год, що включає період ізотермічної витримки n і частину періодів розігріву і остигання, протягом яких температура зразків перевищує 60 °С, в середньому $\tau=n+3$;

τ_0 – індукційний період твердіння, тобто період початку утворення міцної структури.

Параметри рівняння (4.42) для цементів різного мінералогічного складу наведені в табл. 4.16.

Параметри рівняння (4.42)

Таблиця 4.16

Група цементів	Номер цементів	Мінералогічна характеристика цементу	A , МПа	τ_0 , год	Межа лінійності функції в год
I– низько-алюмінатні	1	$C_3A=2...3\%$; $C_3S=60\%$	12,5	0,6	20...25
	2	$C_3A=2...3\%$; $C_3S=50\%$	9,5	0,45	20
II– середньо-алюмінатні	3	$C_3A=8\%$; $C_3S=60...65\%$	10,0	0,15	9...10
	4	$C_3A=8\%$; $C_3S=50\%$	9,5	0,2	9...10
III – високо-алюмінатні	5	$C_3A=11...12\%$; $C_3S=55\%$	8,5	0,15	9
	6	$C_3A=11...12\%$; $C_3S=40...50\%$	7,0	0,18	7...8

Як впливає з табл. 4.16, при рівній кількості C_3A міцнісна характеристика цементів, що застосовуються в умовах пропарювання, підвищується зі збільшенням вмісту C_3S в клінкері. При рівній кількості аліту вона зростає при зниженні вмісту C_3A , чим більше C_3A , тим коротший індукційний період.



Максимальну швидкість твердіння і набору міцності в бетонах, що пропарюються, мають цементи I групи, мінімальну – III групи.

Міцність бетону після пропарювання (f_{cm}^{np}) змінюється в широкому діапазоні, при цьому основними факторами, що визначають її величину, є цементно-водне відношення (Ц/В) та активність цементу для даного режиму тепловологісної обробки (R_u^{np}).

Л.А. Кайсер та Р.С. Чехова досліджували зміну міцності бетонів після пропарювання більш ніж на 40 партіях цементів різного виду, хіміко-мінералогічного складу та марок. У результаті аналізу всієї сукупності експериментальних даних ними запропоноване рівняння:

$$f_{cm}^{np} = 0,41(R_u^{np} + 9)Ц / В - 0,83(Ц / В)^2 - 0,35R_u^{np} - 7, \quad (4.43)$$

де f_{cm}^{np} – міцність бетону в МПа через 4 год. після пропарювання за нормалізованим режимом (2)+3+6+2 при 80° С (для шлакопортландцементу 90° С) на цементі з активністю після пропарювання за тим же режимом R_u^{np} , МПа.

Аналіз експериментальних даних та формули (4.43) показує, що при Ц/В ≤ 3 практично дотримується лінійна залежність $f_{cm} = f(Ц/В)$. Лише при Ц/В > 3, що зустрічається на практиці дуже рідко, можна вводити усереднену поправку на нелінійність залежності (4.43):

$$\Delta f_{cm}^{np} = 5(Ц / В - 3). \quad (4.43 \text{ а})$$

Для проектування складів пропарених бетонів раціонально використовувати ряд наступних розрахункових залежностей:

- міцність бетону через 28 діб після пропарювання, МПа:



$$f_{cm}^{28} = pAR_u [(Ц / B)_I - 0,5] , \quad (4.44)$$

де $pA - A.A_1.A_2, A_3$; A – коефіцієнт якості вихідних матеріалів;

A_1 – коефіцієнт, що враховує міцність бетону: $A_1=0,85-0,95$
($f_{cm} < 30$ МПа);

$A_1=0,95-1,05$ ($f_{cm} > 30$ МПа);

A_2, A_3 – коефіцієнти впливу додаткових факторів.

– міцність бетону через 4 години після пропарювання, МПа:

$$f_{cm}^{np} = pKR_u^{np} [(Ц / B)_2 - 0,74] , \quad (4.45)$$

де $pK=KK_1K_2 K_3$; $K=0,66$ ($f_{cm}^{np}=20-25$ МПа); $K=0,53$;

($f_{cm}^{np}=30-40$ МПа); $K_1=1$ ($OK=1-4$ см); $K_1=0,9$ ($OK \geq 9$ см);

$K_1=1,1$ ($Ж=30-50$ с); $K_2=0,9-0,95$ (щебінь, гравій і пісок низької якості);

K_3 – коефіцієнт, що враховує вплив хімічних добавок (табл. 4.17).

– міцність бетону після пропарювання і подальшого тверднення до 1 доби, МПа(рис.4.7):

$$f_{cm_1}^{np} = f_{cm}^{np} + K_t I \lg(\tau_e / \tau_e^0) f_{cm}^{28} , \quad (4.46)$$

де $K_t=1$ ($t=20^\circ\text{C}$);

$K_t=1,1-1,2$ ($t=30-40^\circ\text{C}$);

$K_t=0,8-0,7$ ($t=10^\circ\text{C}$).

$$I = (0,000634 f_{cm}^{28} - 0,03254) \tau_{iz} - 0,01 f_{cm}^{28} + 0,5787 , \quad (4.47)$$

де τ_{iz} – тривалість ізотермічної витримки при пропарюванні, год.;

τ_e – тривалість витримування після пропарювання, год.;

τ_e^0 – початкова тривалість витримування бетону після пропарювання (4 год).



– міцність бетону після пропарювання і подальшого тверднення від 1 до 28 діб, МПа:

$$f_{cm_2}^{np} = f_{cm_1}^{np} + K_1 \frac{f_{cm}^{28} - f_{cm}^{np}}{\lg 28} \lg \tau_e \quad (4.48)$$

де $\tau = 1 \dots 28$ діб.

– активність цементу через 4 год після пропарювання, МПа:

$$R_y^{np} = R_y K_e \quad (4.49)$$

$$K_e = K_A K_D K_{R_y} K_e^0 \quad (4.50)$$

- для портландцементу (рис.4.8 а):

$$K_e^0 = (0,3877 - 0,0032T_{np}) \ln \tau_{iz} + 0,012T_{np} - 0,5096 \quad (4.51)$$

- для шлакопортландцементу (рис. 4.8 б):

$$K_e^0 = (0,369 - 0,002T_{np}) \ln \tau_{iz} + 0,001T_{np} - 0,56 \quad (4.52)$$

де T_{np} – температура пропарювання (60-95° С);

$K_A = 1$ ($C_3A = 6-8\%$); $K_A = 0,9$ ($C_3A > 8\%$); $K_A = 0,8$ ($C_3A < 6\%$);

$K_D = 0,85$ (до 20% пуцоланових добавок);

$K_D = 0,9$ (до 20% добавок золи або доменного шлаку);

$$K_{R_y} = 1 (R_y = 50 \text{ МПа}); K_{R_y} = 1,05 (R_y = 40 \text{ МПа});$$

$$K_{R_y} = 1,15 (R_y = 30 \text{ МПа}); K_{R_y} = 0,95$$

$$(R_y = 55-60 \text{ МПа}).$$



Таблиця 4.17

Коефіцієнти, що враховують вплив добавок-прискорювачів
тверднення на міцність бетону

Цемент, що застосовується	Добавки та їх композиції	Коефіцієнт K_3 у формулі міцності f_{cm}^{np} (4.45)	
		К ₃ пропарювання при	
		нормальних режимах	скорочених режимах
Швидкотверднучий портландцемент, високоалюмінатний портландцемент	сульфат натрію	1,17	1,2
	хлорид кальцію	1,17	1,2
	нітрит натрію	1,1	1,1
	нітрат кальцію	1,1	1,1
Середньоалюмінатний портландцемент	сульфат натрію	1,28	1,3
	хлорид кальцію	1,28	1,3
	нітрит натрію	1,17	1,2
	нітрат кальцію	1,1	1,2
Низькоалюмінатний портландцемент, шлакопортландцемент	сульфат натрію	1,35	1,4
	хлорид кальцію	1,35	1,4
	нітрит натрію	1,3	1,3
	нітрат кальцію	1,17	1,2

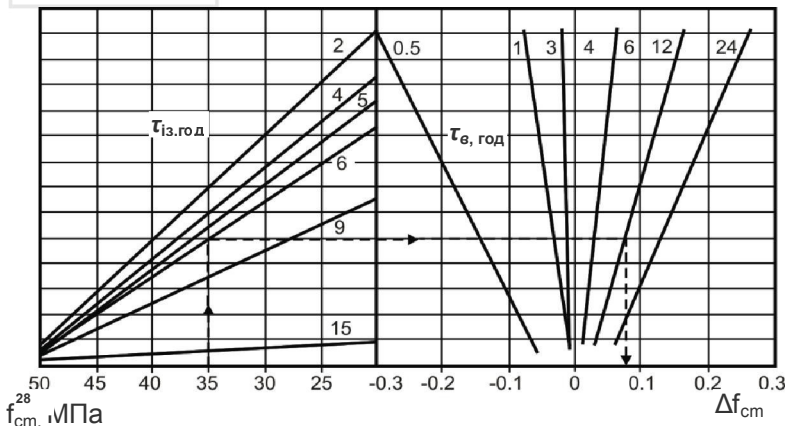


Рис. 4.7. Номограма для розрахунку приросту відносної міцності бетону Δf_{cm} після пропарювання при його витриманні до 1 доби



Суттєвим резервом зменшення необхідного Ц/В у пропарених бетонах може бути введення прискорювачів тверднення, що враховується коефіцієнтом K_3 у формулі (4.45).

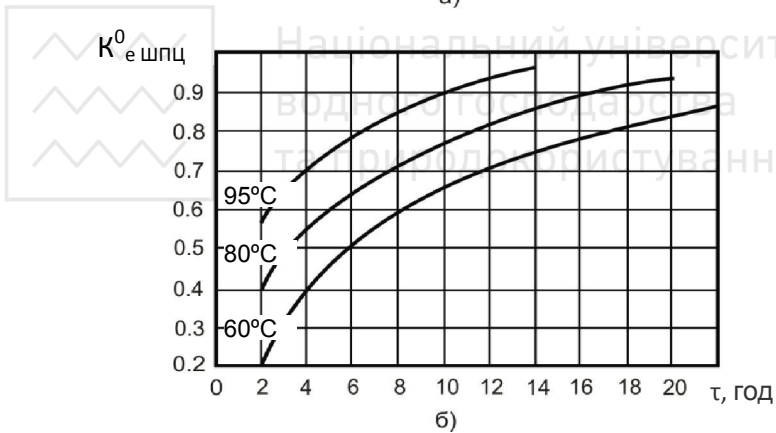
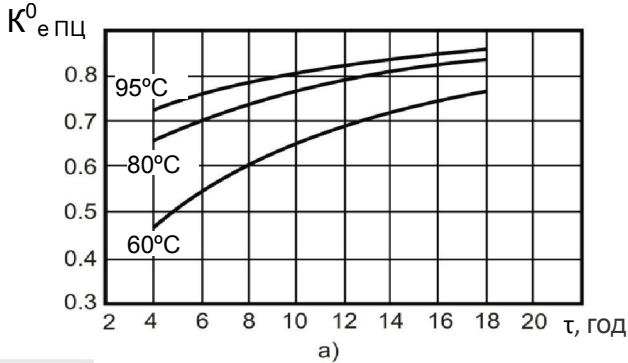


Рис. 4.8. Графіки для визначення K_e^0 :
а) – портландцемент; б) – шлакопортландцемент

Міцність бетону при стиску зв'язана кореляційними залежностями (табл. 4.18) з іншими міцнісними показниками, що дає можливість робити їх орієнтовний прогноз, який уточнюється експериментально.



Таблиця 4.18

Деякі розрахункові формули властивостей бетону, однозначно зв'язаних з міцністю при стиску

№	Нормована властивість бетону	Розрахункова формула
1	Міцність бетону на розтяг при згині, $f_{c.tf}$	$f_{c.tf} = 0,08(10 f_{cm})^{2/3}$
2	Міцність бетону на розтяг при розколюванні, $f_{c.t.sp}$	$f_{c.t.sp} = 0,055(10 f_{cm})^{2/3}$
3	Міцність бетону при осьовому розтягу, $f_{c.t}$	$f_{c.t} = 0,046(10 f_{cm})^{2/3}$

Примітки: 1. Міцнісні показники наведені в МПа.

2. Залежності, наведені в табл. 4.18, є усередненими.

За сприятливих температурно-вологісних умов міцність бетону зростає в часі. Інтенсивність зростання міцності бетону істотно залежить від хіміко-мінералогічного і речовинного складу цементів (табл. 4.19).

Таблиця 4.19

Коефіцієнти зростання міцності бетону на різних цементах

Вид цементу	Коефіцієнти міцності бетону у віці, днів			
	7	28	90	180
Портландцементи:				
Алітові	0,65-0,75	1,0	1,10-1,25	1,30-1,40
Звичайні	0,60-0,70	1,0	1,15-1,35	1,30-1,50
Белітові	0,55-0,65	1,0	1,30-1,40	1,45-1,60
Шлакопортландцементи на:				
кислих шлаках	0,40-0,50	1,0	1,40-1,65	1,60-2,00
основних шлаках	0,40-0,50	1,0	1,35-1,65	1,55-1,90
Пуцоланові портландцементи:				
з добавкою туфу	0,50-0,60	1,0	1,45-1,75	1,55-1,90
з добавкою опоки	0,50-0,60	1,0	1,25-1,55	1,40-1,65

Для орієнтовного прогнозування росту міцності бетону в часі може бути використане приблизно лінійне співвідношення між міцністю f_n і логарифмом тривалості твердіння n при $n \geq 3$ днів і $t = 15 \dots 20^\circ \text{C}$ (формула Б.Г. Скрамтаєва):

$$f_n = f_{28} \frac{\lg n}{\lg 28}. \quad (4.53)$$



Розрахункові коефіцієнти росту міцності бетону (f_n/f_{28}), отримані за формулою (4.53), наведені нижче:

вік бетону, діб	3	7	14	28	90	180
коефіцієнти	0,33	0,58	0,79	1,0	1,35	1,56

О.В. Саталкін, ґрунтуючись на логарифмічному законі наростання міцності бетону, запропонував модифікувати формулу (4.53) і враховувати два значення міцності бетону f_{n_1} і f_{n_2} у два строки твердіння:

$$f_n = f_{n_1} + \frac{(f_{n_2} - f_{n_1})(\lg n - \lg n_1)}{\lg n_2 - \lg n_1}. \quad (4.54)$$

У формулі (4.54) усувається припущення, що міцність бетону у віці однієї доби дорівнює нулю ($\lg 1=0$) і з'являється можливість додатково врахувати вплив особливостей цементу та інших факторів на швидкість твердіння бетону.

Для бетонів на сучасних цементах логарифмічна залежність дає, як правило, занижені показники міцності для початкових строків твердіння (до 28 діб) і завищені для пізніх термінів твердіння.

На величину міцності бетону суттєво впливає його вологість. К.А. Мальцев запропонував лінійну залежність міцності бетону при стиску і розтягу від вологості:

$$f_w = f_{w_0} \left(1 - \frac{W - W_0}{a} \right), \quad (4.55)$$

де f_w і f_{w_0} – міцність бетону при вологості, рівній відповідно W і W_0 ;

a – емпіричний коефіцієнт, що залежить від складу бетону, його структурних характеристик та інших факторів.

Зи зниженням температури і, особливо, наближенням її до 0°C твердіння бетону (рис. 4.9) різко сповільнюється, що особливо суттєво позначається в ранньому віці. Середні значення швидкості наростання міцності бетону при зміні



температури від 40 до 0° С наведені за даними С.А. Миронова в табл. 4.20.

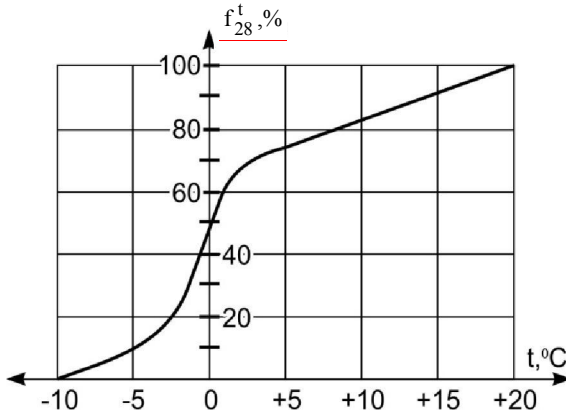


Рис. 4.9. Наростання міцності бетону протягом 28 днів при температурах від +20 до -10°С (в % від f_{28})

Таблиця 4.20

Вихід міцності бетону на стиск при різних температурах твердіння, у % від 28-добової міцності

Бетон	Строк твердіння, днів	Середня температура бетону, °С					
		0	5	10	20	30	40
С12/15(М200) на портландцементі М300	1	4	6	10	18	27	36
	2	8	12	18	30	43	55
	3	12	20	25	40	52	65
	5	20	30	40	55	65	78
	7	30	40	50	65	74	85
	14	40	55	65	80	90	100
	28	55	68	80	100	-	0
С12/15...С20/25 (М 200...300) на портландцементі М400	1	5	9	12	23	35	45
	2	12	19	25	40	55	65
	3	18	27	37	50	65	77
	5	28	38	50	65	80	90
	7	35	48	58	75	90	100
	14	50	62	72	90	100	0
	28	65	77	85	100	-	-



продовження табл. 4.20

Бетон	Строк твердіння, днів	Середня температура бетону, °С					
		0	5	10	20	30	40
С25/30 (М 400) на портландцементі М500	1	8	12	18	28	40	55
	2	16	22	32	50	63	75
	3	22	32	45	60	74	85
	5	32	45	58	74	85	96
	7	40	55	66	82	92	10
	14	57	70	80	92	100	0
	28	70	80	90	100	-	-
С35/45 (М 500) на портландцементі М600	1	9	13	21	32	45	59
	2	17	25	36	52	65	75
	3	23	35	46	62	75	85
	5	34	47	58	75	83	90
	7	42	57	68	85	90	10
	14	58	73	82	95	100	0
	28	75	83	92	100	-	-
С12/15 (М 200) на шлакопортланд- цементі М300	1	-	3	6	12	20	35
	2	4	7	12	20	35	50
	3	7	12	18	30	46	63
	5	13	20	30	45	60	80
	7	18	25	40	55	70	92
	14	25	40	55	75	90	-
	28	35	55	70	100	-	-
С15/25 (М 200...300) на шлакопортланд- цементі М400	1	3	6	10	16	30	40
	2	8	12	18	30	40	60
	3	13	18	25	40	55	70
	5	20	27	35	55	65	85
	7	25	34	43	65	70	10
	14	35	50	60	80	96	0
	28	45	66	80	100	-	-

Усереднені дані щодо наростання міцності бетону з основними протиморозними добавками при від'ємних температурах наведені за даними НДІЗБ в табл. 4.21.



Таблиця 4.21

Зростання міцності бетону на портландцементі з
протиморозними добавками

Добавка	Температура твердіння бетону, °С	Міцність при стиску, % марочної, при твердінні на морозі, діб			
		7	14	28	90
НН, ННК	-5	30	50	70	90
	-10	20	35	55	70
	-15	10	25	35	50
ХК+ХН	-5	35	65	80	100
	-10	25	35	45	70
	-15	15	25	35	50
	-20	10	15	20	40
НКМ, НК+С, ННК+С	-5	35	50	80	100
	-10	20	35	60	80
	-15	15	25	35	60
	-20	10	20	30	50
ННХК, ННХК+С	-5	50	70	95	105
	-10	30	45	70	90
	-15	20	35	45	70
	-20	15	30	40	60
	-25	10	15	25	40
Поташ	-5	50	65	75	100
	-10	30	50	70	90
	-15	25	40	65	80
	-20	20	35	55	70
	-25	15	30	50	60

Примітка: Протиморозні добавки: ХН– хлорид натрію; ХК– хлорид кальцію; НН – нітрит натрію; ННК– нітрит-нітрат кальцію; С – сечовина; НК– нітрит кальцію; НКМ– нітрат кальцію із сечовиною; ННХК– нітрит-нітрат-хлорид кальцію.

Легкі і ніздрюваті бетони. Для легких бетонів поряд з міцністю визначальним параметром є густина.

Густина легкого бетону може бути виражена формулою:

$$\rho_{\sigma} = \rho_{\kappa} \varphi + \left(1 - \varphi - \frac{V_n}{100} \right) \rho_p, \quad (4.56)$$

де ρ_{κ} і ρ_p – відповідно густина зерен пористого заповнювача і цементно-піщаного розчину;



V_n – об'єм міжзернових пустот;

φ – об'ємна концентрація пористого заповнювача.

При прогнозуванні міцності легких бетонів важливо враховувати особливості їх руйнування під навантаженням.

Для легких бетонів залежність їх міцності від міцності розчинової частини можна розділити на дві ділянки (рис. 4.10).

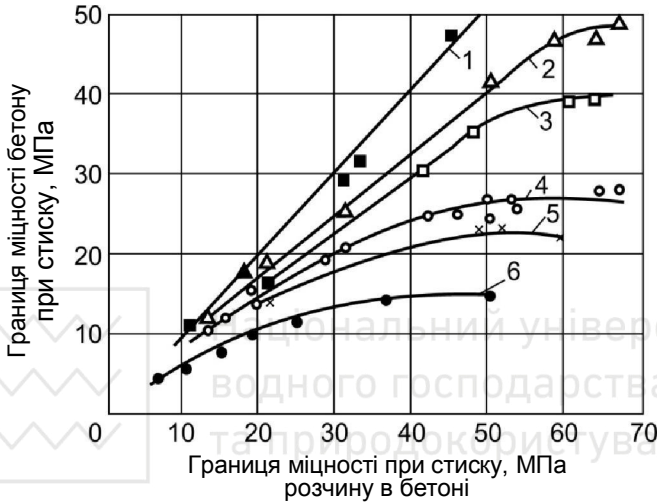


Рис. 4.10. Залежність міцності при стиску керамзитобетону від густини заповнювачів і міцності розчинової частини бетону:
1 – бетон на гранітному щебені (для порівняння);
2 – керамзитобетон на керамзитовому ґравії з густиною $\rho_k=1,4 \text{ т/м}^3$; 3 – $\rho_k=1,05 \text{ т/м}^3$; 4 – $\rho_k=0,86 \text{ т/м}^3$;
5 – $\rho_k=0,66 \text{ т/м}^3$; 6 – $\rho_k=0,52 \text{ т/м}^3$

На відносно прямолінійній ділянці зі збільшенням міцності розчину має місце пропорційний ріст міцності бетону. В цьому інтервалі міцність бетону не залежить від міцності заповнювача. На другій криволінійній ділянці міцність легкого бетону визначається граничною деформативністю пористого заповнювача. Гранична міцність бетону зменшується зі зменшенням міцності пористого заповнювача. Наприклад, для керамзитобетону граничну міцність (f_{cm}) можна знайти за емпіричною формулою В.Г. Довжика та Л.А. Кайсера:



$$f_{cm} = 9,5R_k \frac{1-\varphi}{0,5}, \quad (4.57)$$

де R_k – міцність керамзиту в циліндрі.

Міцність легких бетонів корелюється з їхньою густиною (рис. 4.11). Великий вплив чинить об'єм міжзернових порождин заповнювача, не заповнений цементним тістом. При 5%-му об'ємі незаповнених міжзернових порождин міцність легкого бетону знижується приблизно на 20% у порівнянні з бетоном щільної структури.

Запропоновано ряд формул для визначення міцності легких бетонів, які можна розділити на три групи.

До першої групи можна віднести формули, в яких міцність легкого бетону залежить від міцнісних властивостей компонентів і їх відносного вмісту. Типовою для цієї групи є формула Ю.Е. Корніловича:

$$f_{cm} = R_p(1-\varphi) + R_k\varphi, \quad (4.58)$$

де R_p – міцність розчинової складової;

R_k – міцність крупного пористого заповнювача (керамзиту);

φ – об'ємна концентрація крупного заповнювача.

У другу групу входять формули, що зв'язують міцність бетону з деформативними властивостями компонентів. Найбільше визнання з формул цієї групи одержала формула О.І.Ваганова:

$$f_{cm} = E_\sigma \varepsilon_c = \frac{1}{\mu} E_\sigma \varepsilon_p, \quad (4.59)$$

де E_σ – модуль деформації бетону в момент руйнування;

ε_c – гранична деформація заповнювача при стисканні;

ε_p – гранична деформація заповнювача при розтягуванні;

μ – коефіцієнт Пуассона.

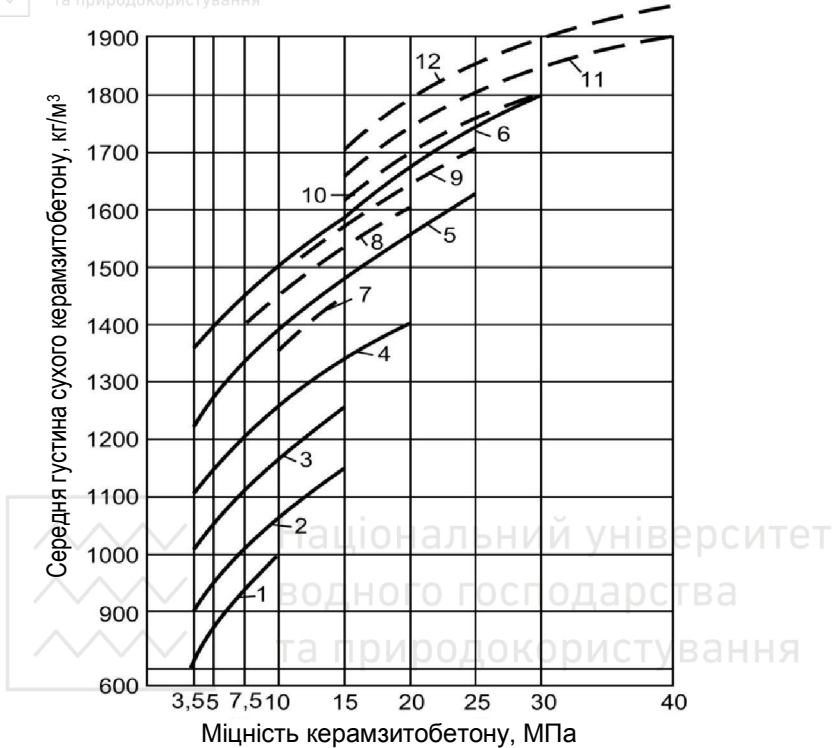


Рис. 4.11. Зв'язок міцності і середньої густини керамзитобетону на пористому і кварцовому піску:

на керамзитовому піску при насипній густині керамзитового гравію в $\text{кг}/\text{м}^3$: 1 – 300; 2 – 400; 3 – 500; 4 – 600; 5 – 700; 6 – 800;
на кварцовому піску при насипній густині керамзитового гравію в $\text{кг}/\text{м}^3$: 7 – 300; 8 – 400; 9 – 500; 10 – 600; 11 – 700; 12 – 800

Третя група поєднує формули, що враховують міцність компонентів, їх об'ємний вміст і деформативні властивості.

При початку руйнування бетону з розчинової частини може бути використана формула Б.Г. Скрамтаєва:

$$f_{cm} = R_p \left[1 + \left(\frac{E_3}{E_p - 1} \right) \varphi \right], \quad (4.60)$$



де E_3 і E_p – відповідно модулі пружності заповнювача і розчину.

Коли руйнування бетону починається з руйнування заповнювача застосовують формулу С.С. Фрейфельда:

$$f_{cm} = R_3 \left[1 + \left(\frac{E_p}{E_3} - 1 \right) (1 - \varphi) \right], \quad (4.60 \text{ a})$$

де R_3 – міцність заповнювача.

Істотний вплив міцності пористого заповнювача призводить до меншого відносного впливу на міцність легкого бетону таких факторів як В/Ц і активність цементу. При незмінній якості пористих заповнювачів для збільшення міцності легких бетонів необхідно підвищувати міцність розчинової складової, що досягається підвищенням витрати цементу або зменшенням об'ємної концентрації крупного заповнювача. При цьому збільшується середня густина бетону.

Міцність при розтягу легких бетонів вища цього показника для важких бетонів при однаковій міцності на стиск. Для конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів міцність при осьовому розтягу складає 12...17% від міцності при стиску, для конструкційних – 7...10%.

Міцність легких бетонів при розтягу можна приблизно розрахувати за формулою:

$$f_{c,t} = 2,1 \sqrt[3]{f_{cm}^2}. \quad (4.61)$$

Підвищена міцність легких бетонів при розтягу зумовлена більш міцним зчепленням пористого заповнювача з цементним каменем.

Для *ніздрюватих бетонів* так, як і для легких бетонів на пористих заповнювачах, міцність знаходиться в тісній кореляції з його густиною (ρ_0). На практиці для прогнозування міцності цих матеріалів використовують різні емпіричні залежності, наприклад:

$$f_{cm} = A \rho_0^2, \quad (4.62)$$



де A – конструктивний коефіцієнт, величина якого може змінюватись у значних межах.

Для ніздрюватих бетонів автоклавного твердіння $A \approx 10$, безавтоклавного $A \approx 7,5 \dots 8,5$. Підвищення точності прогнозу міцності досягається при врахуванні міцності ($R_{m,n}$) і густини ($\rho_{m,n}$) міжпорового матеріалу бетону. За К.І. Бахтіяровим та А.Т. Барановим залежність між міцністю ніздрюватого бетону і його густиною виражається формулою:

$$f_{cm} = R_{m,n} \left(\frac{\rho_b}{\rho_{m,n}} \right)^3 \quad (4.63)$$

Міцність на розтяг при згині ніздрюватих бетонів може бути орієнтовно розрахована за формулою:

$$f_{c,tf} = (2,5 f_{cm} - 0,005 f_{cm}^2) \cdot 10^{-2} \quad (4.64)$$

Міцнісні показники ніздрюватих бетонів істотно залежать від вологості. Орієнтовно при вологості бетону 8% коефіцієнт зменшення міцності на стиск складає 0,84, 10% – 0,8, 15% – 0,75 і 20% – 0,7.

Експериментально-статистичні моделі міцності бетону. Експериментально-статистичні (математичні) моделі міцності бетону отримують як рівняння регресії в результаті статистичної обробки експериментальних даних, що отримані переважно за допомогою математичних методів планування експериментів.

Вони, як показано в першому розділі, дозволяють залежно від мети конкретної задачі проаналізувати вплив обраних в дослідженні факторів, ефектів їх взаємодії, знайти їх оптимальні значення.

У задачах проектування складів бетонів експериментально-статистичні моделі міцності бетону аналізуються сумісно з моделями інших параметрів, що характеризують властивості бетонної суміші та бетону.



Нижче для прикладу наведений аналіз отриманих експериментально-статистичних моделей міцності високоміцних бетонів.

1. Для вивчення впливу водоцементного відношення (x_1), вмісту добавки поліфункціонального модифікатора (ПФМ), що містить суперпластифікатор полікарбоксилатного типу і інтенсифікатор помелу – пропіленгліколь (x_2), а також тонкості помелу композиційного цементу (x_3) у відповідності до умов, наведених в табл. 4.22, були реалізовані експерименти згідно факторного плану B_3 і отримані математичні моделі.

Таблиця 4.22

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральні	Кодовані	-1	0	+1	
В/Ц	x_1	0,25	0,3	0,35	0,05
Вміст ПФМ ₁ у КЦ, %	x_2	0,4	0,7	1	0,3
$S_{\text{пнт}}$, м ² /кг	x_3	350	450	550	100

Міцність бетону на стиск у віці 1 доби, МПа:

$$f_{cm}^1 = 36,72 - 2,31x_1 + 1,68x_2 + 6,3x_3 + 0,36x_1x_2 + 0,72x_1x_3 - 0,21x_2x_3 + 0,21x_1^2 - 4,8x_2^2 - 0,91x_3^2. \quad (4.65)$$

Міцність бетону на стиск у віці 28 діб, МПа:

$$f_{cm}^{28} = 80,1 - 6,09x_1 - 0,3x_2 + 9,57x_3 + 0,01x_1x_2 + 1,86x_1x_3 + 0,38x_2x_3 - 2,5x_1^2 - 4,28x_2^2 - 3,78x_3^2. \quad (4.66)$$

Міцність бетону на розтяг при розколюванні у віці 28 діб, МПа:

$$f_{c.t.sp}^{28} = 5,08 - 0,262x_1 - 0,013x_2 + 0,415x_3 + 0,069x_1x_3 + 0,001x_2x_3 + 0,027x_1^2 - 0,185x_2^2 - 0,172x_3^2. \quad (4.67)$$

Аналізуючи математичні моделі (4.65...4.67), прослідковується суттєвий вплив факторів В/Ц та $S_{\text{пнт}}$ (X_1 та X_3) на міцність як ранню, так і марочну. Суттєвий нелінійний ефект впливу всіх факторів простежується у більш пізньому віці.



Ранжування кількісних ефектів впливу досліджуваних факторів на міцнісні показники бетону при стиску дозволяє розташувати їх у такому порядку: $x_3 > x_1 > x_2$. Вплив факторів на міцність при розтягті та розколюванні має подібний характер.

Графічні залежності міцності бетону на стиск у віці 1 та 28 днів, побудовані на основі отриманих моделей, що наведені на рис. 4.12, на розтяг при розколюванні у віці 28 днів – на рис. 4.13.

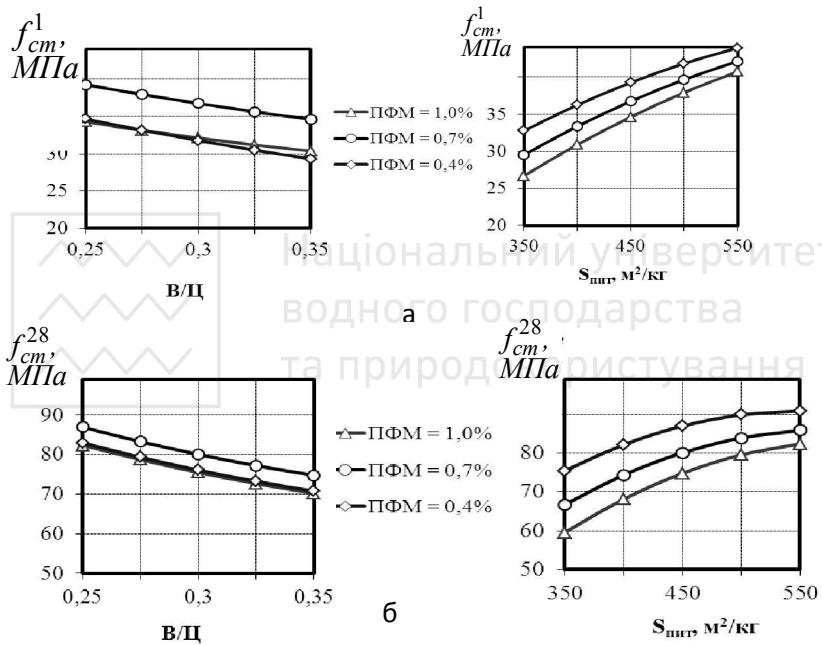


Рис.4.12. Залежності міцності бетону при стиску у віці: 1 (а) та 28 днів (б)

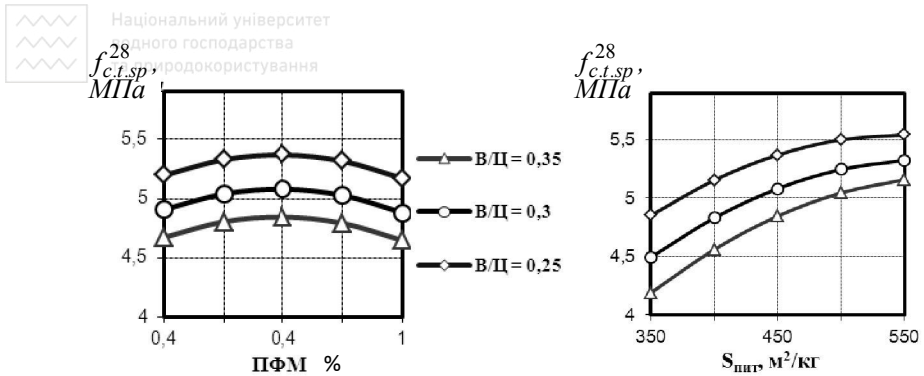


Рис. 4.13. Залежності міцності бетону на розтяг при розколюванні

2. Вивчали ефективність сульфатно-фторидно-лужної активізації піщаного бетону на основі малоклінкерного шлакопортландцементу (МШПЦ).

Умови планування експериментів наведені в табл.4.23.

Таблиця 4.23

Умови планування експериментів

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральні	Кодовані	-1	0	+1	
1	Вміст клінкеру, %	x_1	5	12	19	7
2	Вміст фосфогіпсу в перерахунку на SO_3 , %	x_2	3,03	4,5	5,97	1,47
3	Питома поверхня в'язучого, м ² /кг	x_3	350	450	550	100
4	Вміст активатора твердіння (Na_2SiF_6), %	x_4	0	2	4	2
5	Вміст суперпластифікатора СП-1, %	x_5	0	0,5	1	0,5

Примітка. Досліди виконувались на бетонній суміші складу в'язуче: пісок 1:3 з водоцементним відношенням, необхідним для досягнення розпливу конусу 106...115 мм.



В результаті реалізації плану На₅ отримані експериментально-статистичні моделі, наведені в табл. 4.24.

Таблиця 4.24

Експериментально-статистичні моделі водоцементного відношення та міцності бетонів на МШПЦ

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Водоцементне відношення	$B/C=0,36+0,01X_3+0,01X_4-0,03X_5-0,01X_2^2+0,02X_3^2-0,02X_4^2+0,01X_1X_2 \quad (4.68)$
Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	$f_{cm}^7=19,8+1,8x_1-2,2x_2+2,9x_3-0,1x_4+0,9x_5-3,1x_1^2-1,4x_2^2-1,1x_3^2-2,3x_4^2+3,5x_5^2-0,7x_1x_2-0,4x_1x_3-1,9x_1x_4-0,3x_1x_5+0,3x_2x_3-0,8x_2x_4-0,5x_2x_5+0,7x_3x_4-0,4x_3x_5+1,9x_4x_5 \quad (4.69)$
Міцність на стиск у віці 28діб, МПа	$f_{cm}^{28}=44+5,73x_1-0,7x_2+1,49x_3+0,22x_4+1,19x_5-6,32x_1^2-2,42x_2^2-3,22x_3^2-4,17x_4^2+1,33x_5^2-0,65x_1x_2-1,53x_1x_3-2,69x_1x_4-0,55x_1x_5+1,28x_2x_3+0,4x_2x_4-3,65x_2x_5-0,86x_3x_4+0,2x_3x_5+2,91x_4x_5 \quad (4.70)$

Аналізуючи рівняння 4.68 (табл. 4.24) та графічні залежності, наведені на рис. 4.14, приходимо до висновку, що збільшення вмісту клінкеру суттєво не впливає на водоцементне відношення бетонів, виготовлених на МШПЦ.

Найбільш значний ефект зменшення В/Ц без зміни консистенції бетонної суміші досягається при введенні суперпластифікатора. Суперпластифікатор СП-1 дозволяє зменшити В/Ц бетону на малоклінкерному ШПЦ від 0,39 до 0,33 і, відповідно, збільшити міцність зразків. Вплив суперпластифікатора на В/Ц, як випливає з аналізу отриманої моделі, має практично лінійний характер.

Зниження водопотреби в'язучих за рахунок введення добавки суперпластифікатора і підвищення питомої поверхні дозволяє суттєво збільшити їхню міцність. Також позитивно на міцність у віці 7 діб впливає збільшення вмісту добавки активатора твердіння Na₂SiF₆, але до величини не більше ніж 2% від маси в'язучого (рис. 4.15).

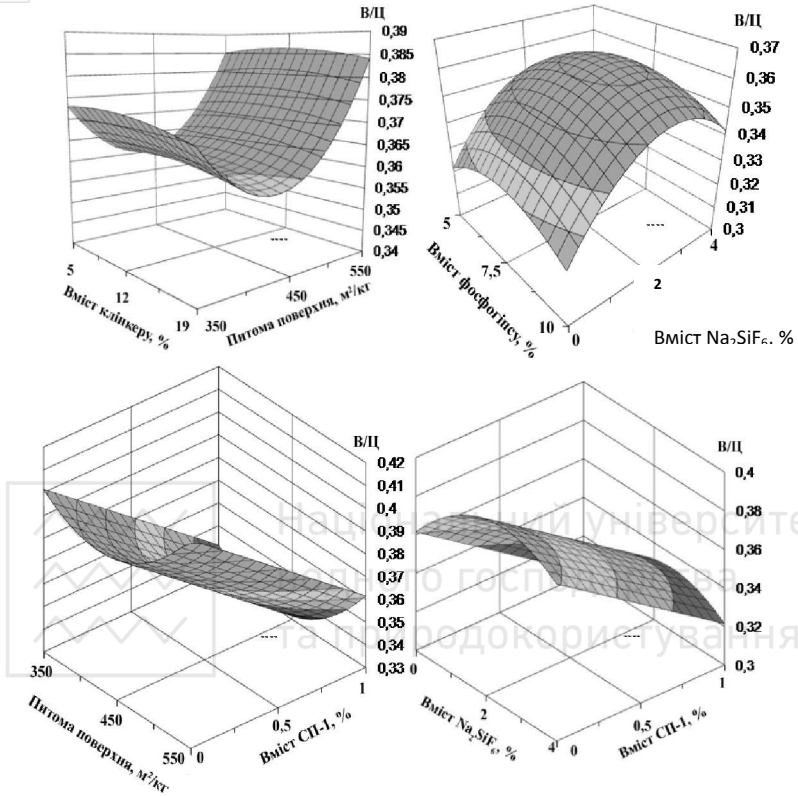


Рис. 4.14. Вплив технологічних факторів на водоцементне відношення бетонів на основі малоклінкерного шлакопортландцементу

Подальше збільшення вмісту цієї добавки призводить до спаду міцності.

Аналіз рис. 4.16 показує, що одночасне збільшення вмісту клінкеру, фосфогіпсу та кремнійфториду натрію в загальній масі в'язучого при збільшенні його питомої поверхні, позитивно впливає на марочну міцність МШПЦ. Це пов'язано з тим, що в присутності іонів Ca^{2+} і SO_4^{2-} і високої дисперсності частинок прискорюється гідратація склоподібної фази доменного



гранульованого шлаку, внаслідок чого відбувається утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію.

Негативно на міцність МШПЦ впливає надмірне збільшення величини питомої поверхні в'язучого, а також витрати добавки кремнійфториду натрію, що зумовлено різким збільшенням В/Ц. Дослідженнями встановлено, що найбільша міцність зразків спостерігається при величині питомої поверхні 450 м²/кг, при цьому оптимальна витрата фосфогіпсу та кремнійфториду натрію у в'язучому становить 7,5% (4,5% у перерахунку на SO₃) і 2% відповідно.

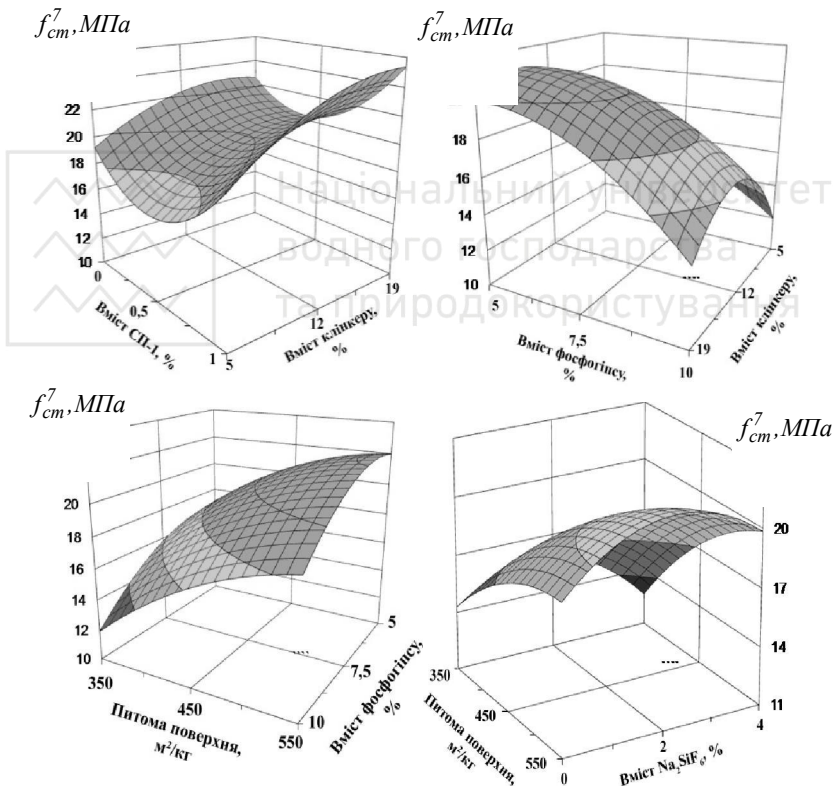


Рис. 4.15. Вплив технологічних факторів на міцність бетонів на основі малоклінкерного шлакопортландцементу у віці 7 діб

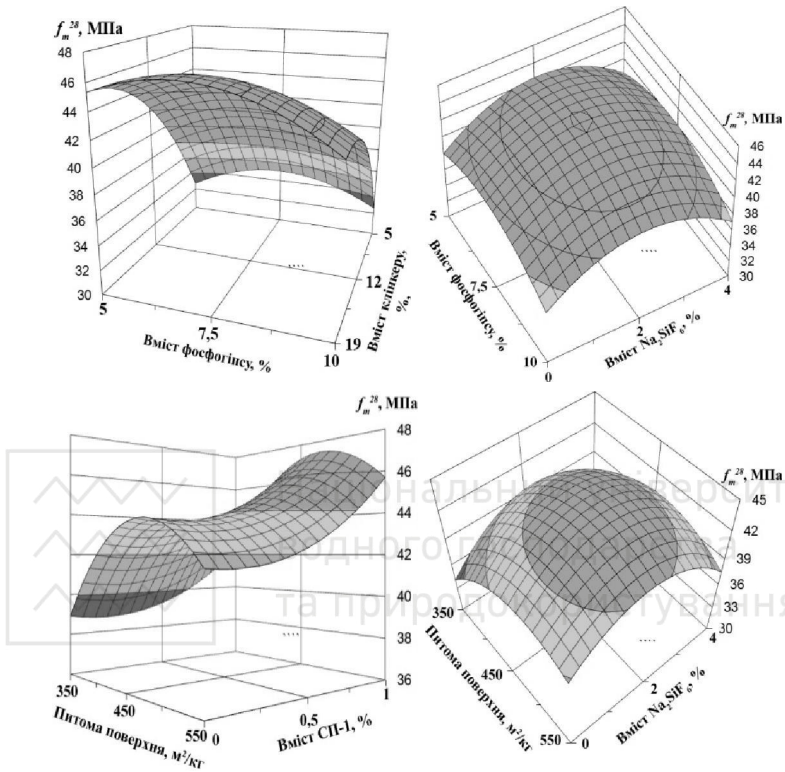


Рис.4.16. Вплив технологічних факторів на міцність бетонів на основі малоклінкерного шлакопортландцементу у віці 28 діб

3. Вивчали вплив вмісту частинок $<0,16$ мм в заповнювачі – гранітних відсівих на міцність дрібнозернистих бетонів із застосуванням комплексної добавки, що містить суперпластифікатор і метакаолін.

Умови планування експериментів наведені в табл. 4.25.



Таблиця 4.25

Умови планування експериментів

№ з/п	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральні	Кодовані	-1	0	1	
1	Витрата суперпластифікатора Melflux, СП, %	X_1	0	0,35	0,7	0,25
2	Вміст частинок <0,16 мм у відсівах ($m_{0,16}, \%$)	X_2	0	6	12	6
3	Вміст метакаооліну (МК, %)	X_3	0	4	8	4

Примітка. Рухомість бетонної суміші РЗ (ОК = 9...15 см).

В результаті реалізації факторного плану отримані експериментально-статистичні моделі водоцементного відношення (В/Ц) і міцності на стиск у 1 та 28 добовому віці (f_{cm}^1 і f_{cm}^{28}) наведені нижче:

$$\begin{aligned} B/Ц = & 0,35 - 0,079x_1 + 0,021x_2 + 0,052x_3 + \\ & + 0,026x_1^2 - 0,014x_2^2 + 0,011x_3^2 - 0,018x_1x_2 - \\ & - 0,03x_1x_3 + 0,003x_2x_3 \end{aligned} \quad (4.71)$$

$$\begin{aligned} f_{cm}^1 = & 21,99 + 2,71x_1 + 0,34x_2 + 0,19x_3 - 0,828x_1^2 + \\ & + 0,022x_2^2 - 2,37x_3^2 + 0,538x_1x_2 - 0,063x_1x_3 - \\ & - 0,113x_2x_3 \end{aligned} \quad (4.72)$$

$$\begin{aligned} f_{cm}^{28} = & 64 + 6,64x_1 + 2,7x_2 + 6,3x_3 - 1,1x_1^2 - 4,724x_2^2 - \\ & - 8,326x_3^2 + 4,1x_1x_2 + 6,8x_1x_3 - 4,0x_2x_3 \end{aligned} \quad (4.73)$$

Усі варійовані фактори спричиняють суттєву зміну водопотреби бетонної суміші: при переході з нижнього рівня на верхній фактор X_1 викликає зниження В/Ц, а X_2 та X_3 – підвищення. Квадратичні ефекти факторів у рівнянні (4.71) –



незначні. За лінійним впливом досліджувані фактори можна проранжувати у наступній послідовності:
 $X_1(\text{СП}) > X_3(\text{МК}) > X_2(m_{0,16})$.

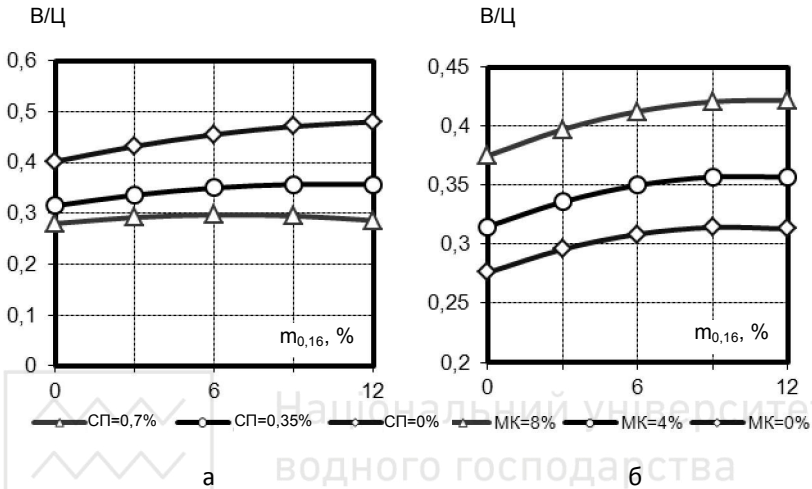


Рис. 4.17. Залежність водоцементного відношення від:
а – вмісту частинок $<0,16$ мм та суперпластифікатора;
б – вмісту частинок $<0,16$ мм та метаксаоліну

Введення добавки-суперпластифікатора полікарбосилатного типу викликає максимальне зниження V/C , тому здатне нівелювати негативний вплив дисперсних частинок на водопотребу бетонних сумішей. Метаксаолін збільшує водопотребу внаслідок високої питомої поверхні.

Найбільш значними взаємодіями факторів у рівнянні (4.71) є “витрата суперпластифікатора – вміст метаксаоліну” та “витрата суперпластифікатора – вміст частинок $<0,16$ мм”, котрі підтверджують можливість компенсувати негативний вплив дисперсних частинок за рахунок суперпластифікатора полікарбосилатного типу при низьких значеннях V/C (рис. 4.17).



Отримані результати з визначення міцності бетону підвищеної міцності на гранітних відсівах наведені на рис. 4.18, 4.19.

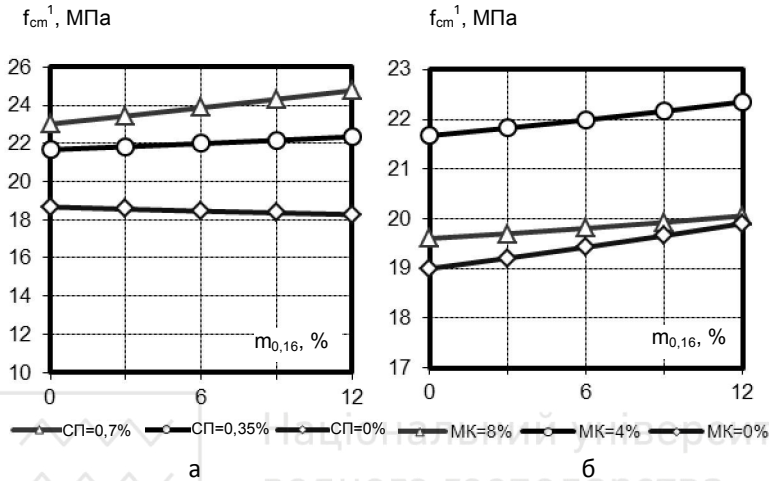


Рис. 4.18. Залежність міцності дрібнозернистого бетону у віці 1 доба від:

- а – вмісту частинок $<0,16$ мм та суперпластифікатора;
- б – вмісту частинок $<0,16$ мм та метакаліну

Усі досліджувані фактори спричиняють суттєвий вплив на міцність. За лінійним впливом максимальне підвищення міцності викликають фактори X_1 та X_2 , фактор X_3 – майже у 2 рази менше (рівняння (4.73)). Збільшення вмісту суперпластифікатора (X_1) спричиняє практично лінійний вплив на міцність, що, в основному, відповідає характеру зміни В/Ц бетону. Для факторів X_2 та X_3 , котрі виражають вплив мінеральних наповнювачів, характерна наявність у рівняннях міцності суттєвих квадратичних ефектів зі знаком “-”, що свідчить про існування граничної області їх ефективного впливу.

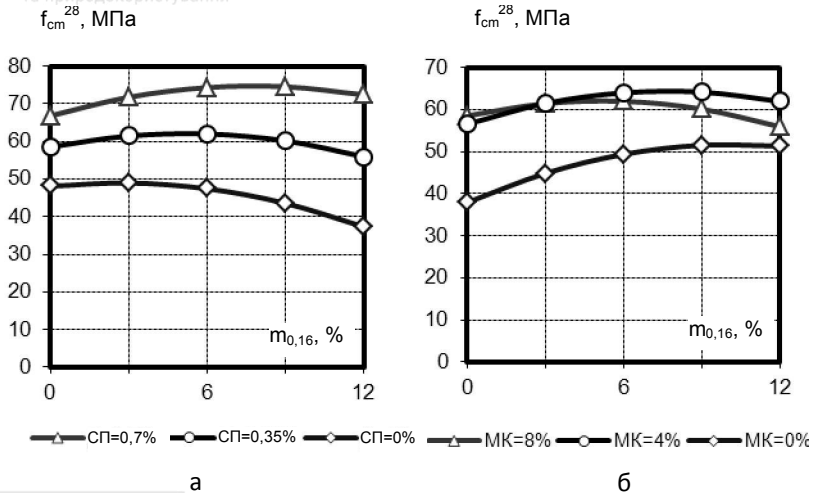


Рис.4.19. Залежність міцності дрібнозернистого бетону у віці 28 днів від:

а – вмісту частинок $<0,16$ мм та суперпластифікатора;
б – вмісту частинок $<0,16$ мм та метакаооліну

Введення добавки Melflux, внаслідок компенсації підвищеної водопотреби, сприяє позитивному впливу гранітного пилу, що міститься у відсівах, як активного наповнювача, який при оптимальному поєднанні факторів викликає підвищення міцності на 12...16%. Ефективний вміст гранітного пилу зростає зі збільшенням вмісту суперпластифікатора: при вмісті добавки Melflux 0,35% позитивний ефект зберігається до 6...7%, при максимальному вмісті Melflux (0,7% від маси цементу) – до 8...9%. Метакаоолін (фактор X_3) внаслідок високої дисперсності та гідравлічної активності демонструє більшу ефективність, ніж гранітний пил. Підвищення міцності дрібнозернистого бетону за рахунок цієї добавки складає 35...38%, що узгоджується з відомими даними. Як і у випадку з гранітним пилом, ефективність метакаооліну суттєво зростає із введенням суперпластифікатора, хоча деякий позитивний вплив (8...10%) спостерігається і у непластифікованих сумішах.



Аналіз отриманих експериментально-статистичних моделей показує можливість отримання високоміцного швидкотверднучого бетону з використанням гранітних відсівів і додаванням суперпластифікатору.

Приклади

4.8. Розрахувати міцність бетону на стиск за формулами (4.25, 4.26, 4.28, 4.31, 4.32) та порівняти отримані значення. Бетон виготовляють на портландцементі з $R_c=40$ МПа, кварцовому піску з $M_k=2.0$ та гранітному щебені 5...20 мм.

Результати розрахунків наведені в табл.4.26.

Таблиця 4.26

Результати розрахунку міцності бетону за різними формулами

Номер формул	Значення Ц/В				
	1,0	1,25	2,0	2,5	3,0
4.25	11	22	33	44	51,8
4.26	11	22	33	42,4	51
4.24	11,2	21	30,4	40	47,3
4.31	11,2	20	29	37	45

Примітка. При розрахунку міцності використані значення коефіцієнтів у формулах: (4.25, 4.26) $A=0,55$ при $C/B \leq 2,5$, $A_1=0,37$ при $C/B > 2,5$; (4.24) $A=0,55$ при $C/B \leq 2,25$, $A=0,53$ при $C/B = 2,5$; $A=0,51$ при $C/B = 3,0$; (4.31) $A=1,0$.

4.9. Розрахувати міцність бетону на портландцементі М500, рядових заповнювачах за формулами 4.25, 4.28 та 4.35 при однакових значеннях Ц/В і вмісту води 170, 190 та 210 л/м³. Порівняти отримані значення.

Результати розрахунків наведені нижче.



Розрахункова формула	Ц/В			Вміст води, л/м ³
	1,5	2,0	2,5	
4.25	30	45	60	-
4.28	28	42	56	-
4.35	30,5	44,6	59,5	170
	28,1	41,1	54,9	190
	25,8	37,7	50,3	210

4.10. За формулою (4.36) порівняти зміну міцності бетону на стиск при Ц/В=1.5; Ц/В=2,5 при застосуванні портландцементу з нормальною густиною 27% марки М400 при переході з фракціонованого гранітного щебеню на нефракціонований, середнього кварцового піску з вмістом пилувато-глинистих частинок до 3% на дрібний з водопотребою 11%.

Розрахункові дані наведені нижче.

Щебень	Пісок	Коефіцієнти				Міцність бетону на стиск, МПа при Ц/В	
		A ₁	A ₂	K*	C	1,5	2,5
Фракційо- нований	Середній	1	1	0,6	0,5	24	48
Нефракційо- нований	Дрібний	1,08	0,95	0,43	0,5	17,6	35,3

З отриманих розрахункових даних слідує, що при перехід на нефракціонований крупний заповнювач і дрібний пісок приведе до зменшення міцності бетону на стиск при Ц/В=1,5 на 26,7%, Ц/В=2.5 на 26,5%.

4.11. Розрахувати (за В.П.Сизовим) зміну міцності бетону, що виготовляють з бетонної суміші з ОК=2 см Ц/В=1,5 і застосуванні портландцементу марки М500 з НГ=27%, щебеню з вмістом пилуватих та глинистих часток 1%, піску з M_к=3, вмістом пилуватих та глинистих часток – 3% при переході без зміни Ц/В на бетонну суміш з ОК=12 см,



портландцемент з $НГ=29\%$, щебінь з вмістом пилюватих та глинистих часток 2% та пісок з $M_k=1,15$.

Розрахунок міцності бетону виконуємо за формулою (4.24):

$$f_{cm} = AR_u (C / B - 0,5).$$

Значення коефіцієнта A приймаємо за табл. 4.9 $A=0,58$.

При збільшенні в щебені вмісту пилюватих та глинистих часток до 2% значення коефіцієнта A становитиме $0,55$. Знайдемо за формулами (4.29) додаткові поправки на: показник рухомості бетонної суміші:

$$\Delta A_1 = -0,0033 \cdot 12 = -0,0396$$

нормальну густоту цементу:

$$\Delta A_2 = -0,0075(29 - 27) = -0,015$$

модуль крупності піску:

$$\Delta A_3 = 0,01(M_k - 3) = 0,01(1,5 - 3) = -0,015$$

$$\Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3 = -0,0396 + (-0,015) + (-0,015) = -0,0696$$

Остаточню при зміні рухомості бетонної суміші і якості вихідних матеріалів в розрахунковій формулі міцності приймаємо $A=0,58-0,07=0,51$

Розрахункове зменшення міцності бетону на стиск:

$$\Delta f_{cm} = (0,58 \cdot 50 \cdot 1,5) - (0,51 \cdot 50 \cdot 1,5) = 43,5 - 38,2 = 5,3 \text{ МПа}$$

(12,2%).

4.12. Міцність бетону на алітовому портландцементі в 7 діб склала 25,5 МПа, в 28 діб – 36,4 МПа, на шлакопортландцементі відповідно 17 МПа і 33,5 МПа.



Спрогнозувати за допомогою формул (4.53, 4.54) і табл. 4.19 міцність бетонів у 90 і 180 діб.

Розрахункові дані наведені нижче.

Бетон	Фактична міцність, МПа		Очікувана міцність за табл.4.19*		Міцність, МПа			
			90діб	180діб	за формулою (4.53)		за формулою (4.54)	
	7 діб	28 діб	90 діб	180 діб	90 діб	180 діб	90 діб	180 діб
на алітовому ПЦ	25,5	36,4	42,5	49,1	49,1	56,7	45,6	51,0
на ШПЦ	17	33,5	50,2	56,9	45,2	52,2	47,4	55,6

*У відповідності з табл. 4.19 коефіцієнти росту міцності у 90 і 180 діб прийняти для портландцементу відповідно 1,15 і 1,35, шлакопортландцементу – 1,5 і 1,7.

4.13. Бетон нормального твердіння на портландцементі М500 виготовляють на рядових заповнювачах з Ц/В=1,5. Визначити можливий приріст міцності бетону та економію цементу за умови постійної міцності при введенні у бетонну суміш 150 кг золи-винесення з $K_{ц.зе}=0,16$. У бетонах без добавки і з добавкою золи забезпечується постійний вміст води ($V=180$ л).

Для розрахунку міцності бетону без добавки і з добавкою золи застосовують формули (4.25, 4.39). За умови постійності коефіцієнта А ($A=0,55$) розрахункові значення міцності бетону: без добавки золи:

$$f_{cm} = 0,55 \cdot 50(1,5 - 0,5) = 27,5 \text{ МПа}$$

з добавкою золи:

$$f'_{cm} = 0,55 \cdot 50 \left[1,5 + \frac{0,16 \cdot 150}{180} \right] - 0,5 = 31,16 \text{ МПа}$$



Приріст міцності складає:

$$\Delta f_{cm} = 31,16 - 27,5 = 3,66 \text{ МПа (13,3\%)}$$

Економію цементу при введенні золи-виносення за умови однакової міцності і легкоукладальності бетону знайдемо з формули (4.41):

$$\Delta Ц = 0,16 \cdot 150 = 24 \text{ кг / м}^3.$$

4.14. Визначити міцність бетону після пропарювання і Ц/В для досягнення бетоном протягом 1 доби міцності $f_{cm}^{np} = 28 \text{ МПа}$ при забезпеченні проектної міцності у 28 днів $f_{cm}^{28} = 40 \text{ МПа}$.

Вихідні дані: ОК=5...9 см; режим пропарювання 2+3+6+2, при 80° С.

Матеріали: портландцемент з $R_u = 50 \text{ МПа}$ ($C_3A = 7\%$, шлак 10%), щебінь та дрібний пісок.

1. Приймаємо значення коефіцієнтів $A = 0,55$; $A_1 = 1$ і за формулою (4.44) визначаємо (Ц/В), що забезпечує досягнення потрібної міцності у віці 28 днів:

$$(Ц / В)_1 = \frac{f_{cm}^{28}}{A A_1 R_u} + 0,5 = \frac{40}{0,55 \cdot 1 \cdot 50} + 0,5 = 1,95.$$

2. Значення базового коефіцієнта ефективності пропарювання стандартних цементно-піщаних зразків за формулою (4.51):

$$K_e^0 = (0,3877 - 0,0032 T_{np}) \ln \tau_{i3} + 0,012 T_{np} - 0,5096 = \\ (0,3877 - 0,0032 \cdot 80) \ln 6 + 0,012 \cdot 80 - 0,5096 = 0,686$$

Приймаємо значення поправочних коефіцієнтів $K_A = K_D = K_{Rc} = 1$.



3. Значення коефіцієнта ефективності пропарювання стандартних цементно-піщаних зразків з урахуванням впливу мінералогічного складу цементу, вмісту мінеральних добавок та активності цементу за формулою (4.50):

$$K_e = K_A K_D K_{R_u} K_e^0 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,686 = 0,686 .$$

4. Активність цементу після пропарювання:

$$R_u^{np} = R_u K_e = 50 \cdot 0,686 = 34,3 \text{ МПа.}$$

5. Інтенсивність тверднення бетону після тепловологісної обробки за формулою (4.47):

$$I = (0,000634 f_{cm}^{28} - 0,03254) \tau_{32} - 0,01 f_{cm}^{28} + 0,5787 = \\ (0,000634 \cdot 40 - 0,03254) \cdot 6 - 0,01 \cdot 40 + 0,5787 = 0,1356$$

Міцність бетону через 4 год. після пропарювання ($K_t=1$):

$$f_{cm}^{np} = f_{cm_1}^{np} - K_t I \lg\left(\tau_e / \tau_e^0\right) f_{cm}^{28} = \\ 28 - 1 \cdot 0,1356 \cdot \lg(8/4) \cdot 40 = 26,4 \text{ (МПа)}$$

6. Визначаємо за допомогою формули (4.45) $(C/B)_2$, що забезпечує досягнення необхідної міцності бетону після пропарювання, приймаючи значення коефіцієнтів ($K=0,53$; $K_1=1,0$; $K_2=1,0$):

$$(C/B)_2 = \frac{f_{cm}^{np}}{K K_1 K_2 R_u^{np}} + 0,74 = \frac{26,4}{0,53 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 34,3} + 0,74 = 2,2$$

Оскільки $(C/B)_2 > (C/B)_1$, для подальшого розрахунку складу бетону приймаємо більше значення C/B тобто $C/B=2,2$.



4.15. Розрахувати міцність бетону у віці 7 днів при температурах 10 і 30° С, якщо 28-добова міцність при нормальному твердінні 20 МПа. При активності цементу 40 МПа і значенні коефіцієнта A у формулі (4.24) 0,52 розрахувати В/Ц бетону, що необхідне для досягнення 7-добової міцності $f_{cm}^7 = 20$ МПа.

Для розрахунку коефіцієнта A_{τ} , що характеризує вплив тривалості і температури твердіння бетону використаємо емпіричну формулу, що отримана статистичною обробкою даних С.А. Миронова (табл. 4.20):

$$A_{\tau} = -0,023 + 0,068\tau + 0,023t - 0,016\tau^2 - 0,003t^2 - 0,0001\tau,$$

де τ – тривалість твердіння, днів;

t – середня температура бетону ($t=5 \dots 40^{\circ}\text{C}$).

Для температури $t=10^{\circ}\text{C}$:

$$A_{\tau} = -0,023 + 0,068 \cdot 7 + 0,023 \cdot 10 - 0,0016(7^2) - 0,003(10^2) - 0,0001 \cdot 7 \cdot 10 = 0,57$$

Для температури $t=30^{\circ}\text{C}$:

$$A_{\tau} = -0,023 + 0,068 \cdot 7 + 0,023 \cdot 30 - 0,0016(7^2) - 0,003(30^2) - 0,0001 \cdot 7 \cdot 30 = 0,89$$

Очікувані значення міцності:

$$\text{при } 10^{\circ}\text{C} \quad f_{cm}^7 = 0,57 \cdot 20 = 11,4 \text{ МПа}$$

$$\text{при } 30^{\circ}\text{C} \quad f_{cm}^7 = 0,89 \cdot 20 = 17,8 \text{ МПа}$$

Розрахункові значення В/Ц, необхідні для досягнення $f_{cm} = 20$ МПа у віці 7 днів:

при 10°С:

$$B / Ц = \frac{0,57 \cdot 0,52 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,57 \cdot 0,52 \cdot 40} = 0,46,$$



при 30°C:

$$B / Ц = \frac{0,89 \cdot 0,52 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,89 \cdot 0,52 \cdot 40} = 0,63.$$

4.16. Знайти відхилення розрахункових показників міцності бетону на розтяг при згині ($f_{c.tf}$) та міцність на розтяг при розколюванні ($f_{c.t.sp}$) при використанні портландцементів марок М500, рядових заповнювачів, та Ц/В=1,5 і Ц/В=2,0 при використанні рекомендованих формул (табл.4.18) і емпіричних формул:

$$f_{c.tf} = 0,045R_c (Ц / В + 0,064) \quad (4.74)$$

$$f_{c.t.sp} = 0,031R_c (Ц / В + 0,064) \quad (4.75)$$

Отримані розрахункові дані наведені нижче.

Показник	Ц/В	Значення міцності, МПа		Розбіжність, % *	
		f_{cm} , МПа	ф-ла 4.74, 4.75		табл. 4.18
$f_{ct.f}$	1,5/27,5		3,52	3,38	3,98
	2,0/41,2		4,64	4,42	4,74
$f_{ct.sp}$	1,5/27,5		2,42	2,33	3,72
	2,0/41,2		3,2	3,045	4,84

* Розбіжність отриманих результатів знаходили у % по відношенню до розрахункових даних, отриманих за формулами 4.74, 4.75.

4.17. Співставити розрахункові за формулою (4.78) значення міцності на стиск керамзитобетону на портландцементі М400 залежно від приведеного Ц/В і експериментальні дані.

Експериментальні дані наведені в табл. 4.27.



Таблиця 4.27

Експериментальні і розрахункові значення
міцності керамзитобетонів

Густина бетону, кг/м ³	Витрата матеріалів, кг/м ³			Об'єм втягнуто го і залишкового повітря, %	(Ц/В) _{пр}	Експериментальні значення міцності бетону, МПа	Розрахункові значення міцності бетону, МПа
	Ц	К	П				
1500	224	$\frac{767}{800}$	479	3,2	0,69	17,1	15,09
1600	289	$\frac{708}{800}$	563	2,3	0,92	18,8	20,2
1800	392	$\frac{520}{800}$	835	1,8	1,4	33,1	30,8

Примітки. У знаменнику для керамзиту (К) зазначена марка за насипною густиною.

Згідно отриманих експериментальних даних розраховані значення приведеного Ц/В (Ц/В)_{пр} знаходили за формулою:

$$(Ц / В)_{пр} = \frac{Ц}{B + П_3 V_3 + V_{н.в}}, \quad (4.76)$$

де Ц, В, V_з, V_{н.в} – відповідно абсолютні витрати цементу, води та об'єми пористого заповнювача і повітря в 1м³ бетонної суміші;

П_з – пористість заповнювача.

Пористість керамзиту визначали за формулою:

$$П_к = 1 - \frac{1,8\rho_к^n}{\rho}, \quad (4.77)$$

де ρ_к^н – насипна густина керамзиту;

ρ – дійсна густина керамзиту.



Обробка довідкових і експериментальних даних (табл. 4.21) показала, що міцність легких бетонів на пористих заповнювачах пов'язана з параметром $(Ц/В)_{пр}$ лінійною залежністю:

$$f_{cm} = AR_y (Ц/В)_{пр}, \quad (4.78)$$

де A – коефіцієнт, що враховує особливості заповнювачів (для керамзитобетону на кварцовому піску $A \approx 0,55$);

R_y – активність цементу.

Аналіз наведених в табл.4.27 даних свідчить, що розбіжність між розрахунковими і експериментальними даними знаходиться в межах 7...11%.

Вправи

4.9. Порівняти розрахункові значення міцності бетону на стиск за формулами (4.25, 4.26, 4.30) при різних значеннях $В/Ц$.

4.10. Порівняти при різних значеннях $Ц/В$ і коефіцієнтів A і A_1 значення міцності бетону на стиск за формулами Б.Г. Скрамтаєва і Ю.М. Баженова (4.25 і 4.26) та узагальненою формулою 4.28.

4.11. Порівняти при різних $Ц/В$ розрахункові значення міцності бетону за формулами (4.25, 4.26 і 4.31).

4.12. Порівняти при різних $Ц/В$ розрахункові значення міцності бетону за формулами Л.А. Кайсера і Р.С. Чехової (4.32) та Б.Г. Скрамтаєва і Ю.М. Баженова (4.25, 4.26). Перевірити вплив на розбіжність отриманих результатів урахування коефіцієнтом A якості заповнювачів бетону.

4.13. Визначити як впливає водопотреба бетонної суміші в діапазоні $В=170...210$ л/м³ на розбіжність розрахункових значень міцності бетону за формулою (4.35).

4.14. Розрахувати вплив золи-винесення Бурштинської ТЕС на міцність бетону нормального твердіння класів С12/15 і С20/25 та можливу економію цементу. Витрата золи – 150 кг/м³. Збільшення водопотреби бетонної суміші при застосуванні золи складає в середньому 15 л/м³. Марка бетонної суміші Р3. Застосовуються цемент М400, заповнювачі середньої якості.



4.15. Розрахувати очікувану міцність бетону у віці 7, 28, 90, 180 діб. Бетони виготовлені на алітовому портландцементі М500 та шлакопортландцементі з застосуванням основних шлаків, рядових заповнювачів з Ц/В=1,5 та Ц/В=2,0. Встановити розбіжність результатів при застосуванні для прогнозу формул (4.53 і 4.54).

4.16. Розрахувати очікувані значення міцності бетонів на алітовому портландцементі і шлакопортландцементі М400 і рядових заповнювачах у віці 7 та 28 діб при Ц/В=1,7 і Ц/В=2,2 при температурах 5, 20 та 40° С.

4.17. Розрахувати очікувану міцність бетону на алітовому портландцементі і рядових заповнювачах з Ц/В=1,5 та Ц/В=2,0 у віці 7, 28 та 90 діб. Бетон твердне в зимовий період при температурах -5...-15° С. У бетонну суміш вводяться протиморозні добавки: нітрит натрію або поташ.

4.18. Бетон на портландцементі М500 з вмістом С₃А – 7% та мінеральних добавок 20% з Ц/В=2,1 пропарюється при 80 °С за режимом (2)+3+6+2. Розрахувати очікувану міцність бетону через 4 год. після пропарювання.

4.19. Розрахувати міцність бетону після пропарювання та через 1 добу подальшого тверднення. Застосовуються цемент марки М500 з міцністю після пропарювання $R_u^{np}=32$ МПа та рядові заповнювачі. Бетонна суміш має ОК=2 см та Ц/В=1,8. Тривалість ізотермічної витримки при пропарюванні 8 год. Температура витримування бетону після пропарювання 20° С.

4.20. Розрахувати очікувані значення міцності бетону на осьовий розтяг та міцність при розколюванні. Бетон виготовляють на портландцементі марки М400, витрата цементу – 370 кг/м³, як заповнювачі застосовуються гранітний щебінь фракції 5...20 мм і дрібний кварцовий пісок з водопотребою $V_n=9\%$. Рухомість бетонної суміші за осадкою конуса 12 см.

4.21. Для отримання конструкційного керамзитобетону застосовують керамзитовий гравій марки 700 за насипною густиною з густиною зерен 2,4 г/см³ у кількості 610 кг/м³. Витрата цементу – 410 кг/м³, Ц/В=2,1. У бетонній суміші після



ущільнення залишається 2,5% повітря. Розрахувати методом “приведеного Ц/В” очікувану міцність керамзитобетону.

4.22. При вивченні впливу добавки метакаоліну (МТК) в сукупності з суперпластифікатором була отримана експериментально-статистична модель міцності дрібнозернистого бетону на стиск у віці 28 діб.

$$f_{cm} = 76,5 - 9,9x_1 + 3,5x_2 + 2,0x_3 + 2,8x_4 - 3,0x_1^2 - 1,0x_2^2 - 4,2x_3^2 - 1,3x_4^2 - 0,9x_1x_2 + 1,5x_1x_3 + 2,7x_2x_3$$

Умови планування експериментів наведені в табл. 4.28.

Таблиця 4.28

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральні	кодовані	-1	0	+1	
Водов'язуче відношення В/(Ц+МТК)	X_1	0,34	0,37	0,40	0.03
Витрата в'язучого (Ц+МТК), кг/м ³	X_2	450	500	550	50
Витрата МТК, %	X_3	5	10	15	5
Модуль крупності піску (M_k)	X_4	1,6	2,0	2,4	0,4

Проаналізувати вплив окремих факторів та ефектів їх взаємодії на міцність бетону та визначити оптимальний вміст метакаоліну, при якому досягається максимальна міцність.

4.3. Розрахункове прогнозування властивостей бетону з урахуванням його міцності, особливостей складу та структури

Більшість експлуатаційних властивостей бетону, що визначають його довговічність в конструкціях та спорудах, пов'язані з його міцністю. Суттєвий додатковий вплив на ці властивості чинять особливості складу та структури бетону.



Модуль пружності та граничні деформації. При проектуванні конструкцій для прогнозування модуля пружності бетону при завантаженні його у віці τ найбільше застосування мають залежності типу:

$$E_{\sigma} = \frac{E_m f_{cm}}{S + f_{cm}}, \quad (4.79)$$

де f_{cm} – кубикова міцність бетону на стиск при певній тривалості твердіння (τ);

E_m і S – емпіричні константи. У будівельних нормах рекомендуються значення $E_m=52000$; $S=23$.

Європейським комітетом з бетону і нормами деяких країн рекомендується залежність:

$$E_{\sigma} = C(f_{cm})^{\gamma} \quad (4.80)$$

де $C=1900$;

$\gamma=0,5$.

Різними авторами запропоновані різні модифікації формули (4.80) і значення коефіцієнтів.

Розбіжності між значеннями E_{σ} , обчисленими за формулами (4.79) і (4.80), зростають (до 35%) у міру підвищення міцності бетону.

При значних коливаннях вмісту цементного каменю з модулем пружності $E_{ц.к}$ для бетонів з різним модулем пружності заповнювачів E_3 справедлива більш загальна формула:

$$E_{\sigma} = \frac{\varphi E_{ц.к} f_{cm}}{\varphi SP_{ц.к} + f_{cm}}, \quad (4.81)$$

де $E_{ц.к}$ – граничне значення модуля пружності цементного каменю; ($E_{ц.к}=5 \cdot 10^4$ МПа);

$P_{ц.к}$ – вміст цементного каменю в бетоні за масою;

φ і S – коефіцієнти:

$$S \approx 80;$$



$$\varphi = \frac{n}{1 + \rho_k (n - 1)}, \quad (4.81 \text{ а})$$

де $n = E_s/E_{ц.к.}$

При використанні високоякісних крупних заповнювачів з вивержених порід типу граніту в сполученні із кварцовим піском ($E_s=5,5 \cdot 10^4$ МПа) Е.М.Щербаковим показано, що для широкої області складів бетону вираз (4.81) перетворюється у формулу:

$$E_{\sigma} \cdot 10^{-4} = \frac{5,3 f_{cm}}{85 P_{ц.к.} + f_{cm}}. \quad (4.82)$$

Динамічний модуль пружності (E_{∂}), що враховує напруження, котрі виникають при коливаннях зразка, приблизно дорівнює початковому, визначеному при статичних випробуваннях. Величина E_{∂} пов'язана з міцністю бетону при стиску (рис. 4.21, 4.22) залежністю:

$$E_{\partial} = \frac{4 \cdot 10^3 f_{cm}}{1 + 0,07 f_{cm}}. \quad (4.83)$$

Запропоновано ряд формул, що зв'язують E_{σ} і E_{∂} , наприклад:

$$E_{\sigma} = E_{\partial} \left[1 - 0,15 \left(\frac{\sigma - 40}{100} \right) \right], \quad (4.84)$$

$$E_{\sigma} = E_{\partial} \left[1 - 0,001 \left(\sigma - \frac{f_{cm.prism}}{10} \right) \right], \quad (4.85)$$

де $f_{cm.prism}$ – призмova міцність бетону, МПа.

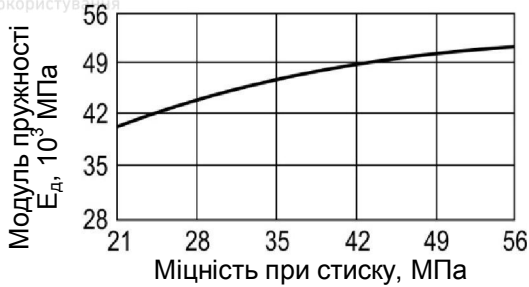


Рис. 4.20. Залежність між динамічним модулем пружності і міцністю бетону при стиску



Рис. 4.21. Відношення статичного модуля пружності до динамічного для бетонів різної міцності

При розрахунку елементів залізобетонних конструкцій враховують *граничні деформації* бетону при короточасному навантаженні, тобто такі деформації, які можуть бути досягнуті до моменту втрати бетоном несучої здатності або порушення зчеплення з арматурою. Звичайно граничні деформації приймають при стиску $\varepsilon_{f_{cm}} = 200 \cdot 10^{-5}$, а при розтягу $\varepsilon_{f_{ct}} = 15 \cdot 10^{-5}$. Для бетону, до якого висувають підвищені вимоги по тріщиностійкості, особливо при розтягу, нормують граничні



деформації. Наприклад, для гідротехнічного масивного бетону у 180-добовому віці гранична розтяжність повинна бути у відповідності з нормами не менше $5 \cdot 10^{-5}$ для бетону внутрішніх зон та $7 \cdot 10^{-5}$ – зовнішніх.

Граничні деформації бетону при осьовому стиску лінійно зростають зі збільшенням його призмової міцності. Г.І.Писанко та Е.М. Щербаковим кореляційний зв'язок між граничною деформацією при стиску та призмовою міцністю бетону апроксимовано аналітичним виразом:

$$\frac{\varepsilon_{zp} \cdot 10^{-4}}{f_{cm, prism}} = 0,1 + \frac{11}{f_{cm, prism}}. \quad (4.86)$$

Для граничної деформації бетону при розтягу, визначеної прямим способом, утруднене одержання достатньо обґрунтованої залежності, що зв'яже її з міцнісними й іншими параметрами бетону. Однак відомі розрахункові формули для визначення величини т.зв. умовної деформативності, що чисельно близька до величини граничної деформації бетону при розтягу.

Умовну деформативність ε_y запропоновано знаходити як відношення границі міцності при розтягу розколюванням ($f_{c.t.sp}$) до величини динамічного модуля пружності:

$$\varepsilon_y = f_{c.t.sp} / E_d. \quad (4.87)$$

У процесі лабораторного контролю величину ε_y можна розрахувати, знаючи міцність при розтягу розколюванням і при стиску:

$$\varepsilon_y = \frac{f_{c.t.sp}(1 + 0,07 f_{cm})}{4 \cdot 10^3 f_{cm}}. \quad (4.88)$$

При невідомих значеннях $f_{c.t.sp}$ можна, використовуючи співвідношення $f_{c.t.sp} = 0,55 f_{cm}^{2/3}$, перетворити залежність (4.88):



$$\varepsilon_y = \frac{0,1375(1 + 0,07f_{cm})}{10^3 \sqrt[3]{f_{cm}}}. \quad (4.89)$$

Повзучість та усадка бетону. Запропоновано ряд емпіричних формул для розрахунку міри повзучості бетону залежно від його міцності та основних параметрів складу. Деякі найбільш відомі із цих формул наведені в табл. 4.29.

Таблиця 4.29

Основні розрахункові формули для прогнозування міри повзучості важкого бетону

№	Ф о р м у л а	Автори
1	$C_{m(28)} = \frac{K_1}{f_{cm}}, \quad (4.90)$ <p>$C_{m(28)}$ – граничне значення міри повзучості бетону при завантаженні його в 28 діб; f_{cm} – кубикова міцність бетону при тиску у віці 28 діб, МПа; $K_1 = 25 \cdot 10^{-5}$.</p>	Вельмі
2	$C_{m(28)} = \frac{K_2 \cdot B / \text{Ц} (B + 0,33 \text{Ц})}{f_{cm}}, \quad (4.91)$ <p>B і Ц – витрати води та цементу на 1 м^3 бетону; $K_2 = 1,4 \cdot 10^{-6}$.</p>	Вельмі
3	$C_{m(28)} = \frac{K_3 V_n}{f_{cm} \sqrt[3]{f_m / f_{cm}}}, \quad (4.92)$ <p>V_n – об'єм пор у цементному камені за умови 15% хімічно зв'язаної води; f_m – граничне значення при $\tau \rightarrow \infty$ кубикової міцності. При приведеному радіусі перерізу конструкції $\bar{r} = 5 \text{ см}$, відносній вологості повітря $\Theta = 65\%$, $K_3 = 9,4 \cdot 10^{-6}$.</p>	Гуммель
4	$C_{m(28)} = \frac{K_4 \cdot B / \text{Ц} (B + 0,33 \text{Ц})}{\sqrt{f_{cm}}}. \quad (4.93)$ <p>При $\bar{r} = 2,5 \text{ см}$, $\Theta = 70\%$, $K_4 = 0,092 \cdot 10^{-6}$</p>	Європейський комітет з бетону (ЄКБ)



№	Ф о р м у л а	Автори
5	$C_{m(28)} = K_5 \frac{1 + B / Ц}{1 + B / Ц + m} (B / Ц)^2 \quad (4.94)$ $K_5 = 11 \cdot 10^{-6}; m - \text{масове співвідношення між}$ $\text{заповнювачем і цементом.}$	Улицький
6	$C_{m(28)} = \frac{K_6 B}{f_{cm}}, \quad (4.95)$ $K_6 = 0,16 \cdot 10^{-5}.$	Щербаков

Всі формули для прогнозування міри повзучості, за винятком самих ранніх, показують її неоднозначний зв'язок з міцністю бетону при стиску. Більшістю дослідників доведено, що на міру повзучості впливає як В/Ц, так і вміст цементного каменю в бетоні, що погоджується з гіпотезами про механізм її розвитку в бетоні.

Більшість емпіричних формул повзучості можуть бути приведені до виразу (4.90, табл. 4.29), якщо коефіцієнт К у них представити деякою функцією В/Ц і f_{cm} . Вираз (4.90) є найбільш простим, експериментально обґрунтованим і зручним при проектуванні складів для оцінки міри повзучості $C_{m(28)}$, хоча не можна виключити можливість застосування й інших розрахункових формул.

Вплив віку бетону (рис. 4.22) у момент прикладання навантаження на величину повзучості позначається сильніше, ніж вплив віку на міцність бетону. На рис. 4.23 наведена, за даними А.М. Невілля, залежність між величиною повзучості і його “зрілістю”, що характеризується у градусогодинах. При ранньому завантаженні бетону з підвищенням температури навколишнього середовища питомі деформації повзучості бетону зменшуються, що пояснюється прискоренням процесу гідратації цементу і зростанням міцності кристалічного зростка цементного каменю. Протилежний ефект спостерігається при завантаженні бетону в “зрілому” віці, коли гідратація цементу в основному завершена.



Рис. 4.22. Вплив віку в момент завантаження на повзучість бетону на глиноземистому цементі; час під навантаженням: 1 – 100 діб; 2 – 28 діб; 3 – 1 доба

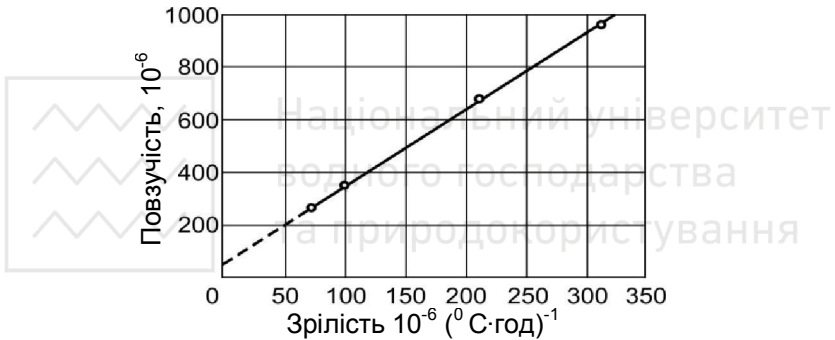


Рис. 4.23. Вплив зрілості бетону, завантаженого у віці 7 діб, на величину повзучості після 420 діб під навантаженням.

Усадочні деформації бетону, так як і його міцність на розтяг, впливають на його тріщиностійкість.

О.Є. Десов, припускаючи, що зразки деформуються при усадці рівномірно по перерізу, запропонував *модуль тріщиноутворення* цементного каменю, обумовлений усадочними напруженнями:

$$T = f_{ct} / \varepsilon_{yc} \quad , \quad (4.96)$$

де f_{ct} – міцність зразків на розтяг;

ε_{yc} – величина усадочних деформацій до моменту появи тріщин.



Ним установлено, що тріщиноутворення цементного каменю характерне при T менше 3,5 МПа, тріщини від усадки утворюються в цементному камені при абсолютних значеннях усадки від 40 до 150 мкм/м.

Для бетонів, до яких висуваються вимоги по тріщиностійкості, величина усадочних деформацій може нормуватися. Наприклад, для гідротехнічного бетону при відносній вологості повітря 60% і температурі 18° С у віці 28 діб лінійна усадка звичайно допускається не більше 0,3 мм/м ($0,3 \cdot 10^{-3}$), а в 180 діб – 0,7 мм/м ($0,7 \cdot 10^{-3}$).

На усадці цементного каменю і бетону позначаються численні фактори: тривалість твердіння, хіміко-мінералогічний склад, питома поверхня та витрата цементу, вміст заповнювача, гіпсу й лугів, водоцементне відношення та ін. (рис. 4.25...4.26).

Відомі емпіричні формули, запропоновані для прогнозування усадки важкого бетону в атмосферних умовах при незмінних розмірах перерізу елементів, відрізняються особливостями врахування витрати води й цементу в бетоні, а також їх співвідношення (табл. 4.30). Вирішальним фактором, що визначає усадку бетону, є витрата води. При незмінній витраті води в суміші величина ε_{yc} мало залежить від витрати цементу й Ц/В. Для інженерних розрахунків найбільш простою і зручною є формула (4.98).

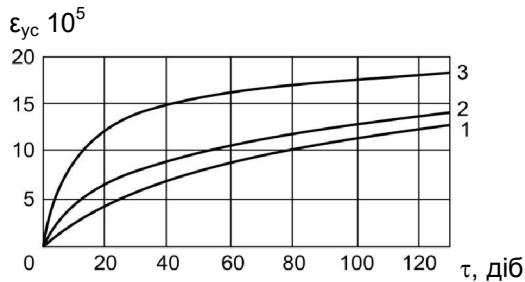


Рис. 4.24. Вплив витрати цементу і водоцементного відношення на усадку бетону трьох складів:
1 – Ц=350 кг/м³, В/Ц=0,45; 2 – Ц=450 кг/м³, В/Ц=0,35;
3 – Ц=450 кг/м³, В/Ц=0,45

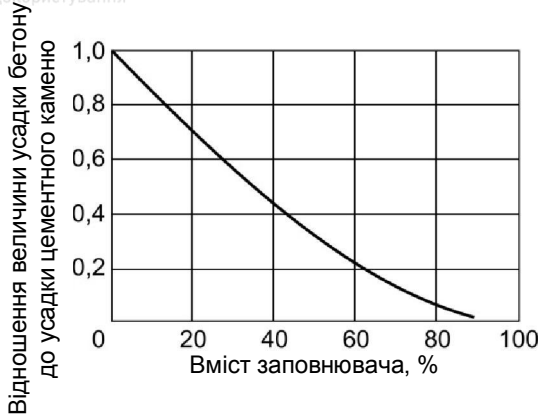


Рис. 4.25. Вплив вмісту заповнювача в бетоні (за об'ємом) на величину відношення усадки бетону до усадки цементного каменю

Таблиця 4.30
Основні розрахункові формули для прогнозування усадки бетону

№ п/п	Формули	Автори
1	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,24 B^{3/2} \frac{(1 + \frac{Ц}{B})^{3/2}}{6 + (\frac{Ц}{B})^2}, \quad (4.97)$ <p>B – витрата води в л/м³; $Ц/B$ – цементно-водне відношення.</p>	Є. М. Щербаков
2	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125B\sqrt{B} \quad (4.98)$	Є. М. Щербаков
3	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = \frac{5B/Ц}{1+m} (667 + Ц), \quad (4.99)$ <p>m – масове співвідношення між заповнювачем і цементом.</p>	А. Вельмі
4	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 5500 \frac{1 + B/Ц}{1 + B/Ц + m} (B/Ц)^2 \quad (4.100)$	Європейський комітет з бетону (ЄКБ)
5	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 300 \left[0,7 + 0,15 \left(\frac{Ц - 225}{25} + \frac{B/Ц - 0,4}{0,1} \right) \right] \quad (4.101)$	С. В. Александровський



Прогнозування усадочних деформацій у часі може бути виконане з урахуванням типових залежностей (рис. 4.26). За даними Міжнародної федерації по попередньо напруженому бетону (ФІП) та Європейського комітету з бетону (ЄКБ) через 7 діб твердіння усадка становить 0,2; 28 діб – 0,4; 180 діб – 0,7; 365 діб – 0,8 граничної деформації усадки $\varepsilon_{yc,m}$.

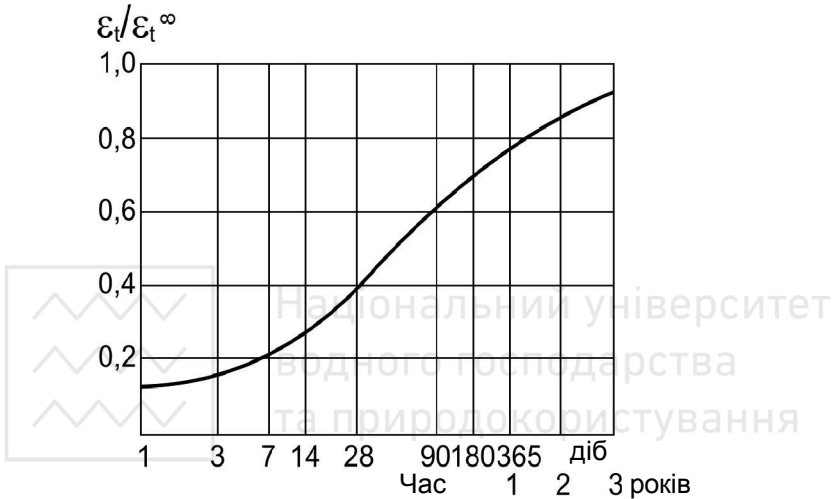


Рис. 4.26. Залежність усадочних деформацій бетону в часі

Термічна усадка викликається зниженням температури бетону. Високі перепади температур у літній і зимовий періоди можуть призводити до коливань довжини бетонних виробів до 0,5 мм/м.

Термічну усадку ε_{yc}^m можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon_{yc}^m = K_{m.p} \Delta t, \quad (4.102)$$



де $K_{m,p}$ – коефіцієнт термічного розширення бетону (він коливається від 7 до 14 мкм/м[°]С і в середньому приймається 10 мкм/м[°]С),

Δt – перепад температур.

Термічна усадка може бути причиною тріщиноутворення масивних конструкцій. Виникаючі тріщини збільшуються згодом під впливом усадки у зв'язку зі зміною вологості бетону й карбонізації. Для обмеження термічної усадки знижують екзотермію цементу, температуру суміші при укладанні в опалубку, вибирають заповнювач із високим модулем деформації.

Морозостійкість. Морозостійкість бетону зумовлена насамперед будовою його порового простору. У бетоні утворюються три основних види пор: пори цементного гелю, розмір яких лежить у межах $(15...40) \cdot 10^{-10}$ м, капілярні пори 0,01...1 мкм і умовно замкнуті пори 10...500 мкм.

Капілярні пори, що утворюються в бетоні водою, яка не вступає в хімічну взаємодію з цементом, є основним дефектом його структури. При твердінні частина об'єму, заповненого в бетоні водою, заповнюється цементним гелем. Чим більший ступінь гідратації цементу (α), тим більше утвориться гелю й тим менший об'єм залишається на капілярні пори.

Одна з перших спроб зв'язати морозостійкість із величиною капілярної пористості була зроблена Г.І. Горчаковим (рис. 4.27). Для бетону нормального твердіння, виготовленого на стандартних матеріалах, пропонувалася залежність виду:

$$F = K(P_{noc.} - P_k)^n, \quad (4.103)$$

де K , n , $P_{noc.}$ – параметри, що залежать від якості матеріалів, складу бетону, виробничих факторів;

P_k – капілярна пористість у %.

Показник n для випробуваних бетонів і цементно-піщаних розчинів коливався в межах від 2,7 до 3. Статистична обробка дозволила конкретизувати наведену вище залежність емпіричним рівнянням:



Рис. 4.27. Залежність морозостійкості бетону від капілярної пористості (за Г.І.Горчаковим)

Формулу (4.104) пропонується використовувати з урахуванням відношення контракційної пористості ($P_{кн}$) до капілярної (P_k) не менше 0,25...0,3. *Контракційна пористість* (контракційний об'єм) утворюється в результаті зменшення об'єму системи цемент-вода при твердінні. Зі збільшенням відношення $P_{кн}/P_k$ морозостійкість зростає (рис. 4.28).

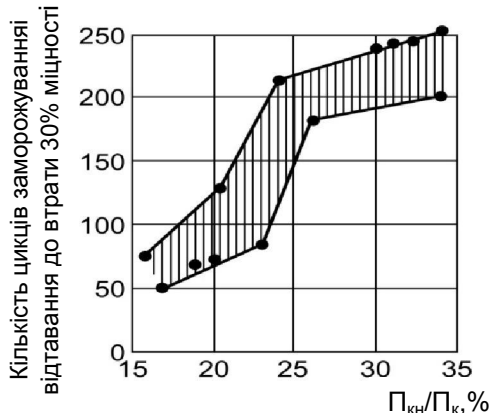


Рис. 4.28. Залежність морозостійкості бетону від відношення контракційної пористості $P_{кн}$ до капілярної P_k



Існують кореляційні залежності між морозостійкістю та льодистістю бетону. Наприклад, запропонований критерій морозостійкості (КМ) пов'язаний лінійно із критичним числом циклів:

$$KM = \frac{P_0 - I_t}{I_{-10}}, \quad (4.105)$$

де $P_0 = P_{zn} - P_p$ відкрита пористість;

$(P_{zn}$ – загальна пористість;

P_p – умовно-замкнута (резервна) пористість);

I_t й I_{-10} – об'ємний вміст льоду при температурі заморожування зразків t °С і при -10 °С.

Рівняння, що пов'язує величину F і KM , отримане Т.І. Розенберг і О.В. Кунцевичем, має вигляд:

$$F = 2,04KM - 25. \quad (4.106)$$

Запропонований також інший параметр морозостійкості (C), пов'язаний з льодистістю бетону I_{-10} :

$$C = I_{-10}(B / \Psi)^{1/3}. \quad (4.107)$$

Залежність морозостійкості бетону F від параметра C пропонується у вигляді рівняння:

$$F - F_0 = I / (C - C_0), \quad (4.108)$$

де F_0 і C_0 – деякі граничні значення параметрів F і C .

Для визначення вмісту льоду в бетоні пропонуються різні експериментальні методи. Найбільшою популярністю користується калориметричний метод, в основі якого лежить залежність між зміною температури при переході води в лід і масою льоду, що утворився. Застосовують також метод надвисоких частот, ультразвуковий і сорбційний методи.

Розрахункові методи дозволяють орієнтовно прогнозувати морозостійкість бетону “а ргіогі”, тобто без проведення



попередніх дослідів. Такі методи становлять особливий інтерес при проектуванні складів морозостійких бетонів. Разом з тим, розрахункові склади при нормуванні морозостійкості, так як і міцності, необхідно перевіряти експериментально.

Перший структурний критерій морозостійкості бетону був запропонований Т.Уайтсайдом і Х.Світом. Цей критерій, відомий як “ступінь насичення” (СН), дорівнює:

$$CH = \frac{V_{з.в.}}{V_{з.в.} + V_{пв}}, \quad (4.109)$$

де $V_{з.в.}$ і $V_{пв}$ – об’єми відповідно замерзаючої води і повітря на одиницю об’єму бетону.

Було встановлено, що при $CH < 0,88$ бетон має високу морозостійкість, а при $CH > 0,91$ швидко руйнується. Морозостійкість (F) пов’язана з величиною ступеня насичення зворотною залежністю:



$$F \sim \frac{1}{CH} = 1 + \frac{V_{пв}}{V_{з.в.}}. \quad (4.110)$$

Розрахунок величини СН на стадії проектування складів став можливим після розробки теоретичних уявлень про пористість цементного каменю і бетону та обґрунтуванні відповідних формул.

М. Фагерлундом для визначення кількості замерзаючої води (W_3), запропонована наступна формула:

$$W_3 = \frac{B / Ц - 0,25 \alpha (0,73 + K_t)}{B / Ц + 0,32}, \quad (4.111)$$

де K_t – коефіцієнт, що враховує температуру замерзання (для $t = -20^\circ \text{C}$, $K_t = 0,96$);

α – ступінь гідратації цементу.

Для стандартної температури заморожування ($t = -20^\circ \text{C}$) О.Е. Шейкіним запропонований критерій морозостійкості K_F , який базується на гіпотезі про те, що умовно-замкнута



пористість ($\Pi_{y.з.}$) бетону для запобігання його руйнування при заморожуванні і відтаванні повинна бути не меншою можливого збільшення об'єму води, що наповнює поровий простір бетону:

$$K_F = \frac{\Pi_{y.з.}}{0,09 \Pi_i} \geq 1, \quad (4.112)$$

де Π_i – інтегральна або відкрита пористість, яка дорівнює об'ємному водонасиченню бетону.

Критерій K_F базується на тій же концепції, що й ступінь насичення СН. Під умовно-замкнутою пористістю в критерії K_F пропонується розглядати лише контракційний об'єм цементного каменю, що твердіє.

Інтегральна пористість бетону (Π_i) розраховується як різниця загальної пористості (Π_o) і контракційного об'єму ($\Pi_{кн}$):

$$\Pi_i = \Pi_o - \Pi_{кн} = (B - 0,23\alpha C) - 0,041\alpha C = B - 0,271\alpha C. \quad (4.113)$$

Виконані експериментальні дослідження дозволили запропонувати модифікований вираз критерія морозостійкості (компенсаційного фактора):

$$F_k = \frac{V_{н.в.} + V_{кн}}{V_l}, \quad (4.114)$$

де $V_{н.в.}$ – об'єм резервних пор, утворених емульгованим повітрям;

$V_{кн}$ – контракційний об'єм.

При оцінці морозостійкості повинна бути справедливою умова:

$$\frac{V'_{н.в.} + V_{кн}}{0,09V_l} \geq 1 \text{ або } \frac{F_k}{0,09} \geq 1. \quad (4.115)$$

Розкривши об'єм пор у виразі (4.114) за допомогою залежностей, що зв'язують їх зі ступенем гідратації α і витратою цементу, остаточно отримаємо вираз F_k :



$$F_k = \frac{10V_{n.в} + 0,06\alpha Ц}{B - 0,5\alpha Ц + 1000(1 - K_y)}, \quad (4.116)$$

де K_y – коефіцієнт ущільнення бетонної суміші.

Для розрахунку показників пористості необхідно знати ступінь гідратації цементу (α). Можливе знаходження ступеня гідратації цементу α за довідковими даними, які, однак, недостатньо повні.

Для орієнтовного розрахунку ступеня гідратації цементу може бути використаний встановлений різними авторами взаємозв'язок його з міцністю цементного каменю при стиску. Наприклад, Т.Пауерс представив цю залежність у вигляді формули:

$$f_{у.к.} = 238\alpha^3, \quad (4.117)$$

де $f_{у.к.}$ – границя міцності при стиску (МПа) цементного каменю.

Ступінь гідратації цементу можна також визначити за формулами О.Е.Шейкіна, що зв'язують міцність цементного каменю $f_{у.к.}$ і активність цементу R_y при випробуванні стандартних зразків цементно-піщаного розчину з відносною густиною d цих матеріалів:

$$f_{у.к.} = 310d^{2,7}, \quad (4.118)$$

$$R_y = 110d^2, \quad (4.119)$$

$$d = \frac{1 + 0,23 \alpha \rho_y}{1 + \rho_y B / Ц}. \quad (4.120)$$

де ρ_y – густина цементу ($\rho_y = 3,1 \text{ г/см}^3$).

Нами після статистичної обробки експериментальних результатів було встановлено, що залежність морозостійкості бетону від критерію F_k описується показовою функцією виду:

$$F = K(10^{F_k} - 1), \quad (4.121)$$

де K – коефіцієнт, що залежить від виду цементу (для рядового середньоалюмінатного цементу $K=170$).



На рис. 4.29 наведені розрахункові значення морозостійкості за формулою (4.121) і експериментальні за даними Portlandcement Association. Американські дані відрізняються більш високими значеннями F при $V_{н.в} \geq 2\%$, що можна пояснити більш високим (25%) нормованим зниженням міцності.

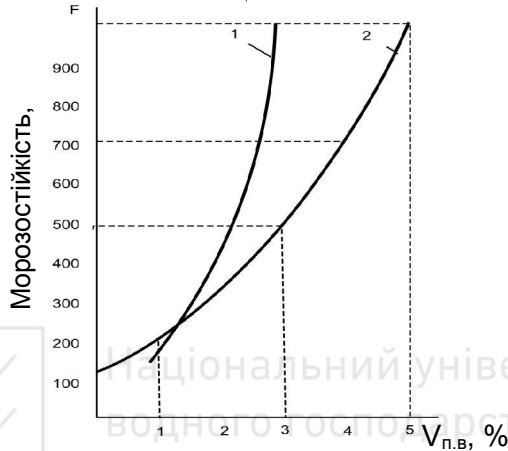


Рис.4.29. Вплив втягнутого повітря на морозостійкість бетону: 1 – за експериментальними даними; 2 – за формулою (4.121) при $\alpha=0,7$, $K=170$, $\rho=400 \text{ кг/м}^3$, $V=200 \text{ л/м}^3$.

Статистична обробка великого масиву експериментальних даних в достатньо широкому діапазоні складів ($f_{cm}=15 \dots 40 \text{ МПа}$, $V=140 \dots 220 \text{ л/м}^3$, $V_{н.в}=0,8 \dots 6,5\%$) дозволила зв'язати морозостійкість, міцність бетону на стиск і об'єм втягнутого повітря:

$$F = A_1 f_{cm}^{A_2} \exp^{A_3 V_{н.в.}} \quad (4.122)$$

Для досліджених складів бетону $A_3 = 0,35$.

Для рухомих бетонних сумішей ($OK=9 \dots 12 \text{ см}$), $A_1 = 0,34$, $A_2 = 1,68$; малорухомих – ($OK=1 \dots 4 \text{ см}$), $A_1 = 0,91$, $A_2 = 1,47$; жорстких – $A_1 = 2,48$, $A_2 = 1,28$.



Із формули (4.122) можна розрахувати об'єм необхідного втягнутого повітря:

$$V_{n.в} = \ln \left(\frac{F}{A_1 f_{cm} A_2} \right) / 0,35, \quad (4.123)$$

де F – марка бетону за морозостійкістю;
 f_{cm} – міцність бетону на стиск, МПа;
 A_1 і A_2 – коефіцієнти.

Необхідний об'єм втягнутого повітря забезпечується введенням повітрявтягуючих добавок, дозування яких визначається експериментально залежно від складу бетонних сумішей. На рис. 4.30 наведена експериментально отримана номограма для визначення вмісту повітрявтягуючої добавки типу СНП залежно від необхідного об'єму втягнутого повітря ($V_{n.в}$), витрат води (B) і цементу (C), частки піску в суміші заповнювачів (r) і вмісту в піску фракції менше 0,63 мм.

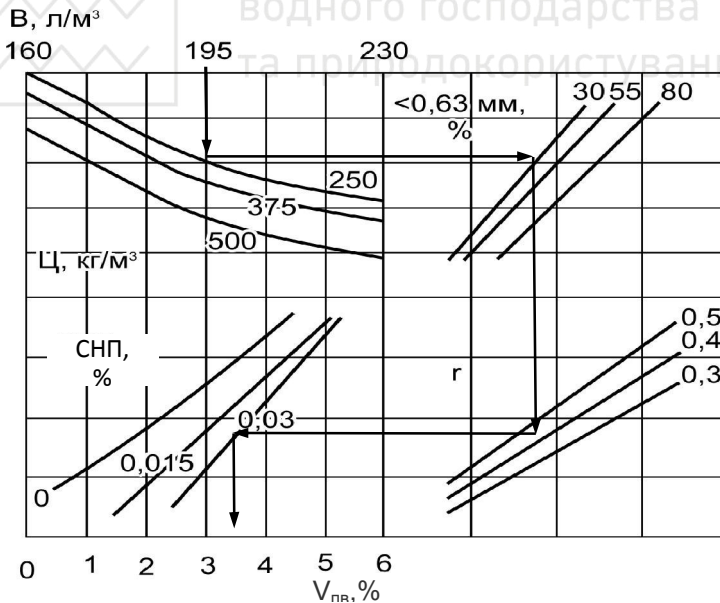


Рис. 4.30. Номограма для визначення об'єму втягнутого повітря $V_{пв}$, % залежно від факторів складу бетонної суміші



Водонепроникність. Залежно від марки за водонепроникністю і водопоглинанням бетони поділяють на групи за щільністю (табл. 4.31)

Таблиця 4.31

Групи бетону за щільністю

Вид бетону	Умовне позначення	Марка за водонепроникністю	Водопоглинання, % 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

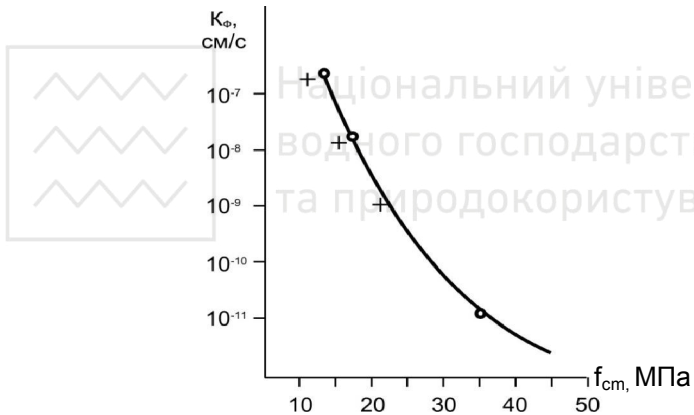


Рис. 4.31. Залежність коефіцієнта фільтрації бетону від міцності при стиску

Експериментально обґрунтований зв'язок між коефіцієнтом фільтрації бетону і його міцністю при стиску (рис. 4.31). Наявність цього зв'язку дозволила запропонувати методику визначення водонепроникності бетону за його міцністю при стиску. Експериментальні дані добре апроксимуються степеневою залежністю типу:



$$K_{\phi} = K_w f_{cm}^m, \quad (4.124)$$

де K_w і m – коефіцієнти, на величину яких впливають особливості складів бетонних сумішей, умови і тривалість твердіння і т.д.

З огляду на велике розмаїття факторів, що впливають на водонепроникність бетону, коефіцієнти K_w і m у формулі (4.124) при вирішенні завдань прогнозування водонепроникності і проектування складів бетону необхідно уточнювати експериментально.

В.П. Сизовим запропоновано прогнозувати водонепроникність (W) бетону за формулою:

$$W = A(R_u / 10)(C / B - 0,5). \quad (4.125)$$

де R_u – активність цементу, МПа.

Коефіцієнт A для еталонного складу пропонується приймати рівним 1, а для інших складів уточнювати за спеціальною номограмою, що враховує вплив W/C , витрату води, активних і інертних добавок, об'єм повітряних пор (рис.4.32).

У деяких випадках на практиці необхідно оцінити зміну коефіцієнта фільтрації бетону при тривалій дії напору води, тобто з урахуванням самоущільнення бетону. Самоущільнення бетону в натурних умовах відзначено багатьма авторами. Так, дані про водонепроникність бетону, визначені на кернах, вибурених у різний час з італійських гребель, свідчать про зниження коефіцієнта фільтрації бетону за період від 90 днів до 27 років на 3 порядки.

Коефіцієнт фільтрації бетону в часі при $\tau > 1$ діб описується експоненціальною функцією:

$$K_{\phi(\tau)} = K_{\phi_0} e^{-(\tau/T)^b}, \quad (4.126)$$

де $K_{\phi(\tau)}$ – коефіцієнт фільтрації бетону через τ діб фільтрації води, м/с;



Таблиця 4.32

Умови фільтрації і значення параметрів функції
самоущільнення бетону деяких складів

Склад бетону		Умови фільтрації			Параметри самоущільнення		
Ц:П:Щ	Ц, кг/м ³	В/Ц	гідрокарбонатна жорсткість води	градієнт напору	K _{ф0} , м/с	b	T
1:2.4:3.6	325	0,51	3,2	320	2,45	0,27	0,316
			0,8	86	1,92	0,24	1,55
1:2.5:5.7	245	0,65	3,2	213	7,2	0,35	1,2
			3,2	57	11,1	0,34	2,14
			0,8	57	12,9	0,27	2,63
			0,06	213	9,4	0,29	5,13
			0,06	57	10,5	0,27	6,76
1:2.9:6.1	222	0,74	3,2	213	31,2	0,34	1,47
			3,2	57	33,7	0,32	2,51
			0,8	57	39,2	0,32	5,01
			0,06	213	27,1	0,32	8,9
			0,06	57	30,4	0,3	10,7

Найвні експериментальні дані вказують на можливість значного підвищення водонепроникності бетону в пізні терміни твердіння (рис. 4.33). Воно може виявитися значно вищим, ніж відносний приріст міцності бетону. Для досягнення значного і стійкого підвищення водонепроникності бетону в часі необхідне забезпечення достатньої вологості бетону при твердінні.

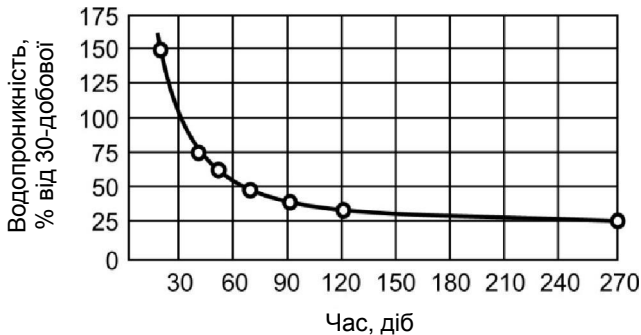


Рис. 4.33. Зміна водопроникності бетону залежно від часу твердіння у вологих умовах



Ефективним способом зниження водопроникності бетону є введення як органічних, так і неорганічних добавок у бетонну суміш з метою підвищення щільності бетону та кольматації його пор.

Приклади

4.18. Розрахувати значення модуля пружності бетону у віці 7,28 та 180 діб. Бетон виготовляється на портландцементі М500 із застосуванням гранітного щебеню максимальної крупності 20мм та кварцового піску з водопотребою 7%. Витрата цементу $C=400$ кг/м³. Марка бетонної суміші за рухомістю Р3.

1. Для визначення міцності бетону знайдемо цементно-водне відношення. Витрата води для забезпечення необхідної рухомості бетонної суміші – 210 л/м³.

$$C / B = 400 : 210 = 1,9$$

2. Розрахункову міцність бетону у віці 28 діб знайдемо за формулою (4.25):

$$f_{cm} = 0,6 \cdot 50(1,9 - 0,5) = 42 \text{ МПа}$$

3. Розрахункові значення міцності в 7, і 180 діб знайдемо з врахуванням рекомендованих (табл. 4.19) усереднених значень коефіцієнтів зростання міцності відповідно: 0,7, та 1,4. Очікувані значення міцності бетону на стиск у 7, 28 та 180 діб:

$$f_{cm}^7 = 29,4 \text{ МПа}, f_{cm}^{28} = 42 \text{ МПа}, f_{cm}^{180} = 58,8 \text{ МПа}.$$

4. Обчислимо за формулою (4.79) значення модуля пружності:

$$E_o^7 = \frac{52 \cdot 10^3 \cdot 29,4}{23 + 29,4} = 2,92 \cdot 10^4 \text{ МПа}$$



$$E_{\bar{\sigma}}^{28} = \frac{52 \cdot 10^3 \cdot 42}{23 + 42} = 3,36 \cdot 10^4 \text{ МПа}$$
$$E_{\bar{\sigma}}^{180} = \frac{52 \cdot 10^3 \cdot 58,8}{23 + 58,8} = 3,74 \cdot 10^4 \text{ МПа}$$

4.19. За умовою попереднього прикладу розрахувати динамічний модуль пружності ($E_{\bar{\sigma}}$) для бетону у віці 7, 28 та 180 діб та знайти співвідношення $E_{\bar{\sigma}} / E_{\bar{\sigma}}$.

Розрахунок здійснюємо за формулою (4.83):

$$E_{\bar{\sigma}}^7 = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 29,4}{1 + 0,07 \cdot 29,4} = 3,85 \cdot 10^4 \text{ МПа}$$

$$E_{\bar{\sigma}}^7 / E_{\bar{\sigma}}^7 = 2,92 \cdot 10^4 : 3,85 \cdot 10^4 = 0,75$$

$$E_{\bar{\sigma}}^{28} = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 42}{1 + 0,07 \cdot 42} = 4,26 \cdot 10^4 \text{ МПа}$$

$$E_{\bar{\sigma}}^{28} / E_{\bar{\sigma}}^{28} = 3,36 \cdot 10^4 : 4,26 \cdot 10^4 = 0,79$$

$$E_{\bar{\sigma}}^{180} = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 58,8}{1 + 0,07 \cdot 58,8} = 4,59 \cdot 10^4 \text{ МПа}$$

$$E_{\bar{\sigma}}^{180} / E_{\bar{\sigma}}^{180} = 3,74 \cdot 10^4 : 4,59 \cdot 10^4 = 0,81$$

4.20. Знайти орієнтовні значення умовної деформативності бетонів класів С16/20 та С25/30.

1. Знайдемо проектні значення міцності бетонів на стиск при $C_v=13,5\%$.

$$f_{cm_1} = \frac{20}{0,778} = 25,7 \text{ МПа} ;$$

$$f_{cm_2} = \frac{30}{0,778} = 38,6 \text{ МПа} .$$



Для розрахунків орієнтовного значення умовної деформативності бетону застосовуємо формулу (4.89):

$$\varepsilon_{y_1} = \frac{0,1375(1 + 0,07 \cdot 25,7)}{10^3 \sqrt[3]{25,7}} = 0,132 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{y_2} = \frac{0,1375(1 + 0,07 \cdot 38,6)}{10^3 \sqrt[3]{38,6}} = 0,152 \cdot 10^{-3}$$

4.21. Проаналізувати за допомогою експериментально-статистичної моделі вплив технологічних факторів на динамічний модуль пружності жаростійкого золошлакобетону.

При дослідженні впливу основних факторів складу жаростійких золошлакобетонів в умовах циклічного нагрівання та охолодження на динамічний модуль пружності, що визначали імпульсним ультразвуковим методом, реалізовано план 2^{4-1} . Умови планування експериментів наведені в табл. 4.33.

Таблиця 4.33

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання		Інтервал варіювання
натуральні	кодовані	-1	+1	
Вміст добавки С-3+Na ₂ SiF ₆ (Д)	X ₁	0	10	10
Цементно-водне відношення (Ц/В)	X ₂	1,5	2,5	1,0
Температура нагрівання, °С	X ₃	300	800	500
Кількість циклів нагрівання і охолодження, N	X ₄	15	35	10

В результаті статистичної обробки експериментальних даних отримана поліноміальна модель:

$$E_g = 2.205 + 0.305X_1 + 0.28X_2 - 0.102X_3 - 0.172X_4 - 0.02X_1X_2 - 0.047X_1X_3 + 0.077X_1X_4 \quad (4.127)$$



Аналіз моделі (рис. 4.34...4.37) дозволяє кількісно оцінити вплив досліджених факторів на динамічний модуль пружності.

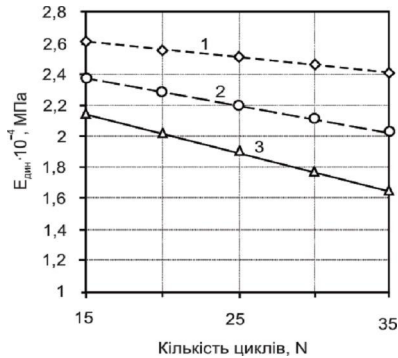


Рис.4.34. Вплив кількості циклів нагрівання і охолодження (N) і витрати комплексної добавки (D) на динамічний модуль пружності ($E_{\text{дин}}$) золошлакобетонів:
1 – D=10 кг/м³; 2 – D=5 кг/м³; 3 – D=0 кг/м³

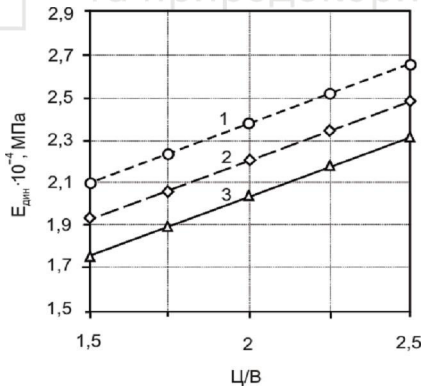


Рис. 4.35. Вплив цементно-водного відношення (Ц/В) і кількості циклів нагрівання і охолодження (N) на динамічний модуль пружності ($E_{\text{дин}}$) золошлакобетонів:
1 – N=15; 2 – N=25; 3 – N=35

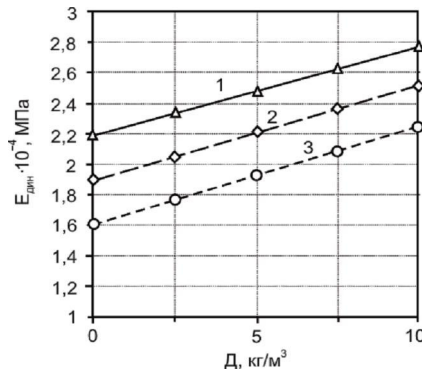


Рис. 4.36. Вплив витрати комплексної добавки (Д) і цементно-водного відношення (Ц/В) на динамічний модуль пружності ($E_{\text{дин}}$) золошлакобетонів:
1 – Ц/В=2,5; 2 – Ц/В=2; 3 – Ц/В=1,5

Для характеристики питомого впливу кожного з факторів на вихідний параметр можна скористатися коефіцієнтом:

$$\lambda = \frac{|\epsilon_i + \epsilon_{ij}|}{\epsilon_o}, \quad (4.128)$$

де $\epsilon_o, \epsilon_i, \epsilon_{ij}$ – коефіцієнти регресії відповідного рівняння.

Діаграма розподілу коефіцієнта λ , що характеризує вплив досліджених факторів на динамічний модуль жаростійких золошлакобетонів, наведена на рис. 4.37.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

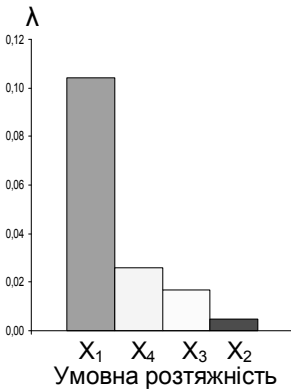
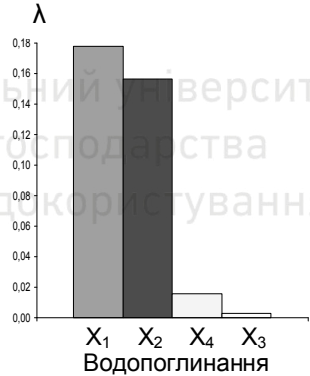
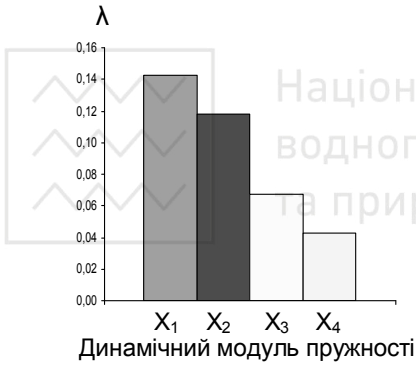
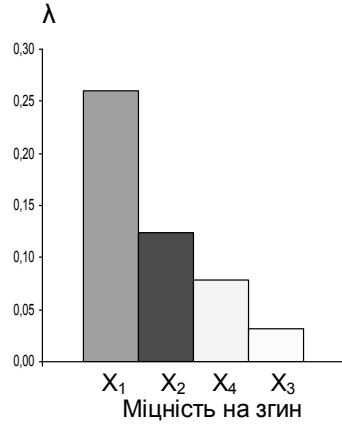
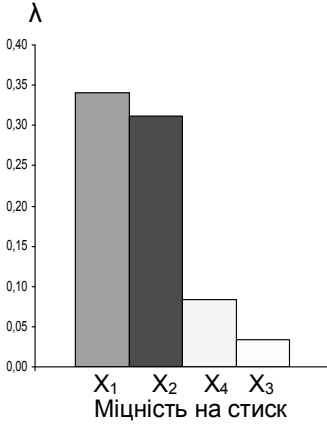


Рис. 4.37. Значення коефіцієнта λ для показників властивостей золошлакобетонів після їхнього циклічного нагрівання та охолодження
 X_1, X_2, X_3, X_4 – фактори варіювання



4.22. Проаналізувати вплив технологічних факторів на умовну розтяжність жаростійких золошлакобетонів.

За умовами планування експериментів (табл. 4.33) досліджували вплив в умовах циклічного нагрівання і охолодження основних факторів, що впливають на умовну розтяжність. Після реалізації експериментального плану 2^{4-1} отримано рівняння регресії:

$$\varepsilon_y = 0,999 + 0,106x_1 - 0,025x_2 - 0,017x_3 - 0,004x_4 + 0,02x_1x_2 - 0,022x_1x_4 \quad (4.129)$$

Вплив окремих факторів на величину ε_y , що встановлена при аналізі рівняння (4.129) наведена на рис. 4.38...4.40, а діаграма розподілу коефіцієнта λ , що дозволяє ранжувати фактори за величиною ефекту їх впливу на рис. 4.37.

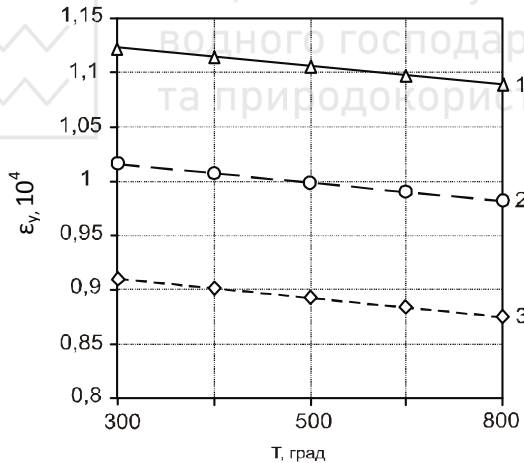


Рис. 4.38. Вплив температури нагрівання (Т) і витрати комплексної добавки (Д) на умовну розтяжність (ε_y) золошлакобетонів:

1 – Д=10 кг/м³; 2 – Д=5 кг/м³; 3 – Д=0 кг/м³

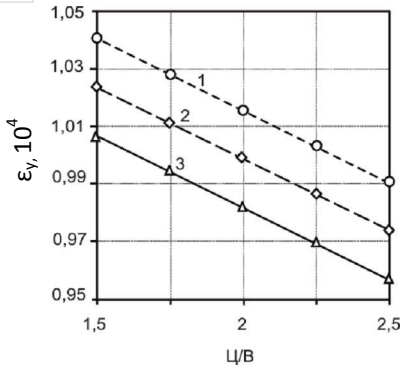


Рис.4.39. Вплив цементно-водного відношення (Ц/В) і кількості циклів нагрівання і охолодження (N) на умовну розтяжність (ϵ_y) золошлакобетонів:
 1 – N=15; 2 – N=25; 3 – N=35

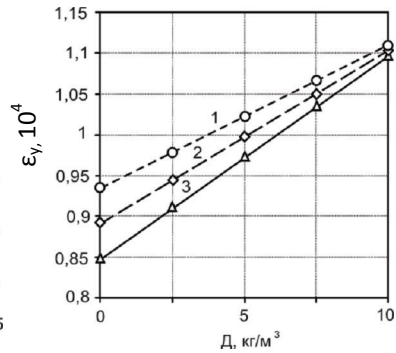


Рис.4.40. Вплив витрати комплексної добавки (D) і цементно-водного відношення (Ц/В) на умовну розтяжність (ϵ_y) золошлакобетонів:
 1 – Ц/В=2,5; 2 – Ц/В=2;
 3 – Ц/В=1,5

4.23. Порівняти експериментальні та розрахункові значення міри повзучості бетону.

При випробуванні бетонів різного складу отримані експериментальні значення питомих деформацій повзучості бетону у віці 28 діб та визначені значення міри повзучості, які наведені в табл. 4.34.

Таблиця 4.34

Експериментальні значення міри повзучості бетону

Бетон	Склад бетону			Міцність бетону на стиск, МПа	Міра повзучості
	В, л/м ³	Ц, кг/м ³	Ц/В		
1	180	240	1,33	23,5	$1,03 \cdot 10^{-5}$
2	180	290	1,61	28,6	$0,78 \cdot 10^{-5}$
3	180	340	1,89	34,2	$0,74 \cdot 10^{-5}$
4	190	370	2,05	38,4	$0,66 \cdot 10^{-5}$
5	195	410	2,1	43,5	$0,59 \cdot 10^{-5}$
6	205	450	2,2	45,4	$0,57 \cdot 10^{-5}$



Для знаходження розрахункових значень міри повзучості використані формули (4.90) і (4.95).

Розрахункові значення міри повзучості і відхилення експериментальних та розрахункових даних наведені в табл. 4.35.

Таблиця 4.35

Розрахункові значення міри повзучості

Бетон	Розрахункові значення міри повзучості, $C_{m(28)}^p \cdot 10^5$		Відхилення розрахункових значень міри повзучості від експериментальних, %	
	Ф-ла (4.90)	Ф-ла (4.95)	Ф-ла (4.90)	Ф-ла (4.95)
1	1,064	1,22	3,3	18,4
2	0,87	1,01	11,5	29,5
3	0,73	0,84	1,35	13,5
4	0,65	0,79	1,51	19,7
5	0,57	0,71	3,38	20,3
6	0,55	0,72	3,51	26,3

4.24. Порівняти експериментальні і розрахункові значення граничних експериментальних та розрахункових усадочних деформацій бетонів.

Для серії зразків бетонів, отриманих із бетонних сумішей різних складів, визначені експериментальні та розрахункові граничні деформації усадки, (табл. 4.36). Для розрахунку деформацій усадки застосовували формулу Е.М. Щербакова (4.98):

$$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125B\sqrt{B},$$

де B – витрата води, л/м³.



Таблиця 4.36

Експериментальні та розрахункові усадочні деформації

Бетон	Витрата води, л/м ³	Усадочні деформації		Відхилення $\frac{\varepsilon_{ус}^p - \varepsilon_{ус}^e}{\varepsilon_{ус}^e} \cdot 100\%$
		експерим. $\varepsilon_{ус}^e \cdot 10^5$	розрахунк. $\varepsilon_{ус}^p \cdot 10^5$	
1	230	45,2	43,6	3,54
2	215	38,3	39,4	2,87
3	205	39,2	36,7	6,38
4	196	37,1	34,3	7,54
5	188	30,3	34,2	12,9
6	176	34,2	29,1	14,9
7	165	29,3	26,5	9,6

Як слідує з наведених даних, відхилення розрахункових значень усадочних деформацій від отриманих експериментально не перевищує 15 %.

4.25. Визначити можливість використання формули (4.104) $F = (14 - \Pi_k)^{2,7}$ для розрахункового прогнозу морозостійкості бетону (F) випробуваних складів.

У наведеній вище формулі Π_k – капілярна пористість бетону. Капілярну пористість можна розрахувати за номограмою (рис. 4.41)

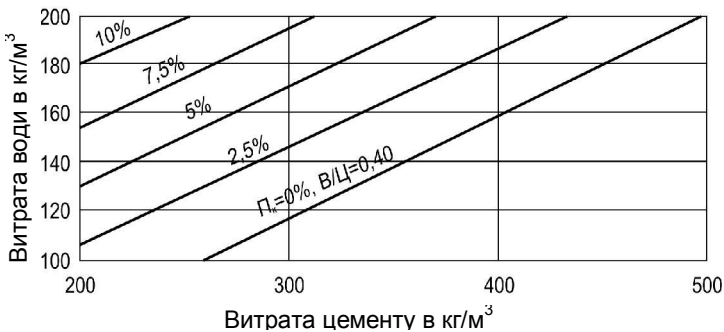


Рис. 4.41. Номограма капілярної пористості бетону



Експериментальні та розрахункові значення морозостійкості бетону наведені в табл. 4.37.

Таблиця 4.37

Експериментальні та розрахункові за формулою (4.104) значення морозостійкості бетону

Бетон	В, л/м ³	Ц, кг/м ³	П _к , %	Морозостійкість, цикли, F		
				F _{експ.}	F _p	$\frac{F_p - F_e}{F_e} \cdot 100\%$
1	180	200	10	47	42	10,6
2	180	270	7,5	142	156	9,9
3	170	300	5	343	377	9,9
4	170	330	3	570	648	13,6
5	170	350	2,5	650	730	12,3
6	170	380	1,25	825	966	17,1

4.26. Знайти середнє відхилення розрахункових даних з морозостійкості бетону, знайдених за формулою (4.122), від експериментальних.

Значення міцності бетону на стиск, вмісту втягнутого повітря, фактичної та розрахункової морозостійкості бетону для досліджених складів наведені в табл. 4.38.

Таблиця 4.38

Експериментальні та розрахункові за формулою (4.122) значення морозостійкості бетону

№ серії	Міцність бетону на стиск у 28 діб f _{cm} , МПа	Вміст втягнутого повітря, %	Морозостійкість, F, цикли		$\frac{F_p - F_\phi}{F_\phi} \cdot 100\%$
			фактична	розрахункова	
1	20	4,5	419	360	14,1
2	25	2,5	218	192	19,9
3	25	3,5	230	260	13,0
4	25	4	370	310	16,2
5	30	1	125	150	20,0
6	30	3	250	295	18
7	30	5	820	780	4,9
8	35	2	330	270	18,2
9	40	3	500	580	16,0



Середнє відхилення розрахункових значень морозостійкості по відношенню до фактичних становить 15,6%.

4.27. *Визначити відносне відхилення розрахункових значень коефіцієнта фільтрації бетону відносно фактичних.*

Розрахунок коефіцієнта фільтрації (K_ϕ) бетону здійснювали за формулою (4.124) з уточненими значеннями коефіцієнтів: $A=110,76$; $m=-9,6$. Результати розрахунків коефіцієнта фільтрації для бетону з різною міцністю на стиск у віці 28 діб та порівняння отриманих розрахункових та експериментальних значень наведені в табл. 4.40.

Таблиця 4.40

Експериментальні та розрахункові значення коефіцієнта фільтрації

№ серії	Міцність бетону на стиск	Розрахункове значення K_ϕ	Експериментальне значення K_ϕ	Відносне відхилення $\frac{K'_\phi - K_\phi}{K'_\phi} \cdot 100\%$
1	10	$2,78 \cdot 10^{-6}$	$3,10 \cdot 10^{-6}$	10,32
2	15	$5,68 \cdot 10^{-8}$	$4,95 \cdot 10^{-8}$	14,75
3	20	$3,59 \cdot 10^{-9}$	$4,20 \cdot 10^{-9}$	14,52
4	25	$4,21 \cdot 10^{-10}$	$5,10 \cdot 10^{-10}$	17,45
5	30	$7,31 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$	12,46

Середнє відносне відхилення розрахункових значень коефіцієнта фільтрації від експериментальних для даного прикладу становить 13,9%.

4.28. *Визначити за середнім відносним відхиленням розрахункових даних від експериментальних точність прогнозування водонепроникності бетону за допомогою експериментально-статистичної моделі.*

Для пропареного бетону за режимом 2+3+6+2 при температурі 80° С після реалізації експериментального плану Na_5 та статистичної обробки отриманих результатів була отримана експериментально-статистична модель водонепроникності бетону (W), МПа:



$$W = 0,53 - 0,15X_1 + 0,07X_2 + 0,02X_1^2 - 0,04X_2^2 - 0,08X_3^2 - 0,03X_4 - 0,03X_1X_4 - 0,07X_2X_4 + 0,03X_4X_3 + 0,03X_2X_3 + 0,05X_3X_5 \quad (4.131)$$

Зв'язок між натуральними та кодованими (X) значеннями факторів в моделі можна знайти за формулами:

$$X_1 = (B/C - 0,6) / 0,1; \quad X_2 = (r_{щ} - 0,53) / 0,08; \quad X_3 = (r_3 - 0,2) / 0,1; \\ X_4 = (B - 190) / 10; \quad X_5 = (M_k - 2,4) / 1,0,$$

де B/C – водоцементне відношення;

$r_{щ}$ – частка щебеню в суміші піску, золи та щебеню;

r_3 – частка золи в суміші золи та піску;

B – водопотреба бетонної суміші, л/м³;

M_k – модуль крупності піску.

Розрахункові та експериментальні значення водонепроникності наведені в табл. 4.41.

Таблиця 4.41

Розрахункові та експериментальні значення водонепроникності бетону

№ з/п	Фактори					Водонепроникність, МПа		$\frac{W_p - W_e}{W_e} \cdot 100, \%$
	$\frac{X_1}{B/C}$	$\frac{X_2}{r_{щ}}$	$\frac{X_3}{r_3}$	$\frac{X_4}{B}$	$\frac{X_5}{M_k}$	розрах	експер.	
1	$\frac{-1}{0,5}$	$\frac{-1}{0,45}$	$\frac{-1}{0,1}$	$\frac{-1}{180}$	$\frac{-1}{1,4}$	0,55	0,61	9,8
2	$\frac{-0,5}{0,55}$	$\frac{-0,5}{0,49}$	$\frac{-0,5}{0,15}$	$\frac{-0,5}{185}$	$\frac{-0,5}{1,9}$	0,52	0,54	3,7
3	$\frac{0}{0,6}$	$\frac{0}{0,53}$	$\frac{0}{0,2}$	$\frac{0}{190}$	$\frac{0}{2,4}$	0,53	0,48	10,4
4	$\frac{+0,5}{0,65}$	$\frac{+0,5}{0,57}$	$\frac{+0,5}{0,25}$	$\frac{+0,5}{195}$	$\frac{+0,5}{2,9}$	0,48	0,41	17,1
5	$\frac{+1}{0,7}$	$\frac{+1}{0,61}$	$\frac{+1}{0,3}$	$\frac{+1}{200}$	$\frac{+1}{3,4}$	0,33	0,28	17,8

Середнє відхилення отриманих експериментальних значень водонепроникності від розрахункових складає 11,76%.



Вправи

4.23. Значення модуля пружності зразків бетону з кубиковою міцністю 26,1; 46,5; 58,3; 71,5; 82,4; 105,4 МПа при стандартному випробуванні наступні ($E_{\sigma} \cdot 10^{-4}$ МПа): 1,93; 2,72; 3,46; 3,75; 3,91; 4,17. Знайти відхилення експериментальних даних від розрахункових, % при застосуванні формул (4.79) і (4.80):

$$E_{\sigma} = \frac{E_m f_{cm}}{S + f_{cm}},$$

де $E_m = 52000$;
 $S = 23$.

$$E_{\sigma} = C(f_{cm})^{\gamma},$$

де $C = 1900$,
 $\gamma = 0,5$.

4.24. Знайти коефіцієнт кореляції між модулем пружності (E_{σ}) і міцністю бетону на стиск (f_{cm}), а також відповідне рівняння регресії, використавши наступні дані:

f_{cm}	7,5	10	12,5	15	20	25	30	35	40
$E_{\sigma} \cdot 10^{-3}$	23,0	28,0	31	33,5	35,5	38,5	40,5	42,5	44,5

4.25. З допомогою результатів повнофакторного експерименту 2^3 розрахувати та проаналізувати експериментально-статистичну модель модуля пружності бетону (E_{σ}) залежно від Ц/В бетонної суміші (X_1) і активності цементу (X_2). Вказані фактори змінюються на двох рівнях у діапазоні Ц/В=1,5 і 2,5 і $R_w=40$ і 50 МПа.

Експериментальні результати:

X_1 (Ц/В)	X_2 (R_w)	$E_{\sigma} \cdot 10^{-3}$
+1 (2,5)	+1 (50)	37,5
+1 (2,5)	-1 (40)	32,3
-1 (1,5)	+1 (50)	24,1
-1 (1,5)	-1 (40)	19,5



4.26. Знайти коефіцієнт кореляції і рівняння регресії між динамічним модулем пружності ($E_{d,6} \cdot 10^{-3}$) і міцністю бетону при стиску (f_{cm}).

Експериментальні дані:

f_{cm} , МПа	21,2	27,8	35	42,2	49	56,2
$E_{d,6} \cdot 10^{-3}$	40,8	43,2	46,5	49,1	50,1	51,9

4.27. Вивчали зміну модуля пружності конструкційних легких бетонів залежно від зміни їх марки за середньою густиною ($D=1400 \dots 1800 \text{ кг/м}^3$) і міцністю бетону на стиск у 28-добовому віці ($f_{cm}=25 \dots 35 \text{ МПа}$).

За результатами повнофакторного експерименту 2^3 були отримані наступні дані:

$X_1 (D)$	$X_2 (f_{cm})$	$E_6 \cdot 10^{-3}$
+1	+1	22,50
+1	-1	19,0
-1	+1	18,0
-1	-1	15,0

Розрахувати і проаналізувати відповідну експериментально-статистичну модель.

4.28. Розрахувати граничні деформації бетону при осьовому стиску за формулою (4.86) Г.І.Писанко та Е.М.Щербакова для бетонів з призмовою міцністю 12, 20, 25, 30 МПа.

4.29. Розрахувати умовну деформативність бетону, якщо відома міцність бетону при стиску (f_{cm}): 15, 25, 30, 40 та 50 МПа.

4.30. Для бетонів різних складів та міцності порівняти за формулами (4.90) і (4.91) значення міри повзучості.

Бетони	В/Ц	В	f_{cm}
1	0,7	190	25
2	0,5	180	37
3	0,4	170	45

4.31. Порівняти розрахункові значення усадки бетонів різних складів за формулами (4.97 і 4.98) зі значеннями усадки,



що розраховані за формулою (4.100), яка рекомендована Європейським комітетом з бетону.

Бетони	Параметри складів		
	В	В/Ц	m (співвідношення між заповнювачем і цементом за масою)
1	180	0,7	6,5
2	180	0,6	6,2
3	190	0,5	4,7
4	195	0,4	3,4
5	195	0,35	2,9

4.32. Базуючись на рівнянні (4.116), що пов'язує морозостійкість (F) з модифікованим компенсаційним фактором (F_k), розрахувати морозостійкість бетонів на середньоалюмінатному цементі, використавши наступні дані:

– бетон №1: об'єм резервних пор, утворених емульгованим повітрям $V_{п.в}=3,5\%$, ступінь гідратації цементу $\alpha=0,55$, витрата цементу $\Pi=350 \text{ кг/м}^3$, водоцементне відношення $\text{В/Ц}=0,5$, коефіцієнт ущільнення $K_y=0,98$;

– бетон №2: $V_{п.в}=2,8\%$, $\alpha=0,65$, $\Pi=410 \text{ кг/м}^3$, $\text{В/Ц}=0,6$, $K_y=0,99$.

4.33. Розрахувати за формулою (4.123) необхідний об'єм втягнутого повітря для забезпечення морозостійкості F_{300} і F_{500} бетону з 28-добовою міцністю $f_{cm}=30 \text{ МПа}$ та $f_{cm}=40 \text{ МПа}$, що виготовлені з бетонних сумішей марок РЗ та ЖЗ.

4.34. Визначити водонепроникність важких бетонів на цементах марок 400 і 500, МПа, за формулою В.П. Сизова (4.125).

Бетони	В/Ц	В, л/м ³	D_A^* , %
1	0,5	150	15
2	0,7	170	25

* D_A – вміст активної мінеральної добавки.

4.35. Розрахувати за експериментально статистичною моделлю водонепроникності (4.131), що наведена у прикладі



(4.28), водонепроникність пропарених цементно-золяних бетонів з наступними параметрами, що характеризують їх склад:

- 1) $V/C=0,7$; $r_{щ}=0,049$; $r_3=0,2$; $V=195$ л/м³, $M_k=2,9$;
- 2) $V/C=0,5$; $r_{щ}=0,53$; $r_3=0,15$; $V=180$ л/м³, $M_k=1,9$;
- 3) $V/C=0,55$; $r_{щ}=0,61$; $r_3=0,1$; $V=185$ л/м³, $M_k=2,4$.

4.36. Для корозійностійкого бетону, що працює в гідротехнічній споруді, запропонована емпірична формула необхідного коефіцієнта фільтрації:

$$K_\phi = B_\phi L / H \tau, \quad (4.132)$$

де L – товщина конструкції, м;

H – напір води, м;

τ – розрахунковий строк служби споруди, роки;

B_ϕ – кількість фільтрованої води за одиницю часу через одиницю площі конструкції.

Розрахувати значення коефіцієнту фільтрації залежно від строку служби споруди в діапазоні 10...30 років при $H=5...20$ м, $L=0,3...1$ м; $B_\phi=0,06...0,020$ л/(діб·м²) і побудувати відповідні графічні залежності.

4.37. Побудувати за даними табл. 4.32 і з допомогою формули (4.126) графічні залежності коефіцієнта фільтрації бетону від V/C , гідрокарбонатної жорсткості і градієнту напору.



5. ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БЕТОНУ. ОСНОВИ МЕТОДОЛОГІЇ

Проектування складів бетону – ключова технологічна задача, рішення якої визначає рівень експлуатаційної надійності конструкцій та споруд і ступінь раціонального використання ресурсів, витрачених на їх виготовлення і зведення.

5.1. Основні задачі

В сучасній технології під проектуванням складів бетону розуміють обґрунтування вибору виду вихідних матеріалів і їх співвідношень, що забезпечують при заданому критерії оптимальності нормовані проектні вимоги до бетонної суміші і бетону. При використанні методології системного підходу проектування складів бетону може включати ряд додаткових задач, пов'язаних з оптимізацією технологічних параметрів виробництва і проектних вимог до бетону.

Задачі проектування складів бетону можна розділити на три групи: однопараметричні, дво- і багатопараметричні. В основу такої класифікації покладена загальна кількість нормованих параметрів для бетонної суміші і затверділого бетону.

Для *однопараметричних задач* не нормується звичайно в строго визначених кількісних границях показник легкоукладальності суміші. Вказується лише його якісна характеристика (суміш напівсуха, жорстка, рухома, лита). Якісно можуть характеризуватися й окремі показники затверділого бетону (бетон морозостійкий, водонепроникний, сульфатостійкий та ін.). В ряді випадків вказується спосіб виготовлення виробів або виконання бетонних робіт. Можуть вказуватися також умови експлуатації конструкцій. В тих випадках, коли це виявляється можливим, технолог вводить в умову задачі проектування складів кількісні показники, адекватні якісним оцінкам і однопараметрична задача проектування складу трансформується в дво- або багатопараметричну. В інших випадках доводиться, проектуючи



склад, що забезпечує нормовані властивості, вводити необхідні обмеження по витраті води, В/Ц, крупності і виду заповнювачів, вмісту добавки та ін.

Найбільш розробленими і реалізованими на практиці є *двопараметричні задачі*, коли нормованою властивістю бетону є його міцність при стиску (f_{cm}), а бетонної суміші – показник легкоукладальності (рухомість ОК або жорсткість Ж). Для рішення задач цього типу широко застосовуються розрахунково-експериментальні методи, що використовують ряд відомих технологічних залежностей, що базуються на правилах водоцементного (цементно-водного) відношення, сталості водопотреби бетонних сумішей, оптимального вмісту піску та ін.

При рішенні таких задач для важких бетонів послідовно визначають (рис.5.1) значення цементно-водного або водоцементного відношення, витрати води з урахуванням необхідної рухомості або жорсткості бетонної суміші і заповнювачів, використовуючи припущення про те, що бетонна суміш складається з абсолютних об'ємів всіх її складових. В найпростішому випадку для чотирьохкомпонентної суміші, необхідне знання трьох параметрів: цементно-водного відношення (Ц/В), витрати води (В) і фактору, що характеризує співвідношення заповнювачів (частки піску в суміші заповнювачів (g) або коефіцієнта розсунення зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином (α)). Останній фактор можна розглядати як оптимізуючий, тому що лише при деякому оптимальному його значенні, в умовах Ц/В=const, можливе досягнення мінімальної витрати цементу. Найчастіше під оптимальним приймають співвідношення заповнювачів, що забезпечує їх найкращу легкоукладальність або мінімальну водопотребу.

При проектуванні складів різних, і особливо, спеціальних видів бетону (гідротехнічного, дорожнього, корозійностійкого і т.д.) виникають *багатопараметричні задачі*. Їх можна розділити на три підгрупи:

- з нормованими параметрами, однозначно зв'язаними з міцністю бетону при стиску;



- з нормованими параметрами, неоднозначно зв'язаними з міцністю при стиску;
- з нормованими параметрами, не зв'язаними з міцністю при стиску.

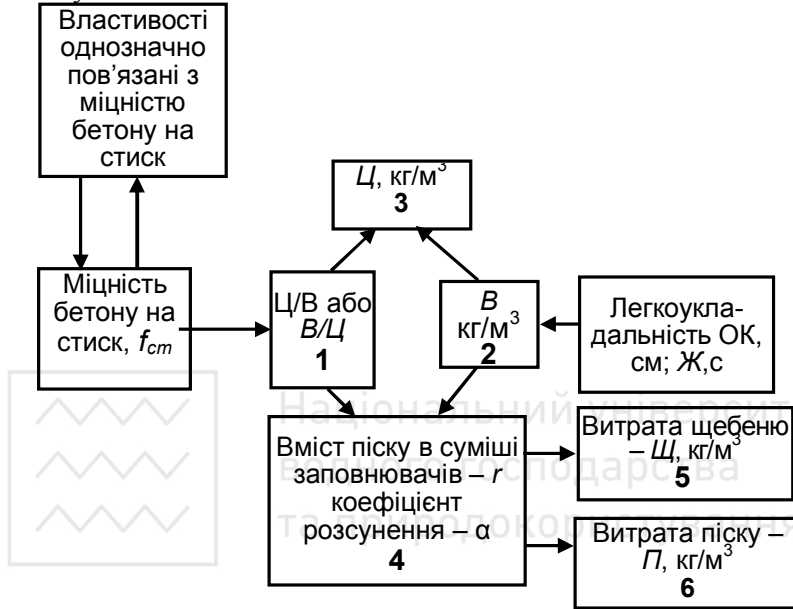


Рис. 5.1. Схема розрахунку номінальних складів важкого бетону

У першу підгрупу входять, наприклад, задачі з різними нормованими показниками міцності бетону. При розрахунку складів таких бетонів спочатку знаходиться визначальний параметр із нормованих властивостей бетону, відповідна йому міцність при стиску і встановлюється мінімально можливе Ц/В, що забезпечує весь набір властивостей. Під “визначальним параметром” розуміється такий нормований параметр, досягнення якого забезпечує одночасно досягнення й всіх інших параметрів, зазначених в умові задачі.

Наприклад, з рис. 5.2 випливає, що якщо нормуються: міцність при стиску $f_{cm} \geq 20$ МПа, розтягу при згині $f_{c,lf} \geq 8,3$ МПа і розтягу при розколюванні $f_{c,sp} \geq 7,9$ МПа, то, очевидно, що



визначальним параметром є $f_{c,t.sp}$ і необхідне Ц/В, що забезпечує всі три показники властивостей, дорівнює 2.1.

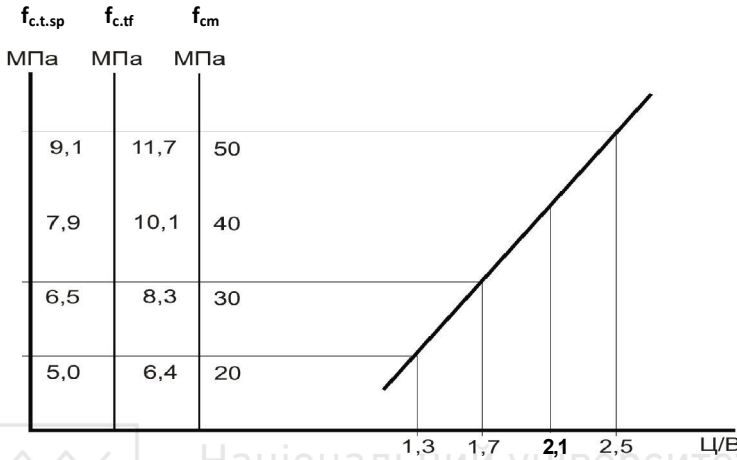


Рис. 5.2. Вплив Ц/В на міцність при стиску (f_{cm}), розтяг при згині ($f_{c,tf}$) і розтяг при розколюванні ($f_{c,t.sp}$)

Принциповою особливістю таких задач є існування області Ц/В, в межах якої знаходиться Ц/В, що забезпечує всі нормовані показники. Чим вужча ця область (для розглянутого прикладу вона – 1,3...2,1), тим ближчим є склад до оптимального і $Ц \rightarrow \min$. Для досягнення цієї умови можуть використовуватися різні технологічні прийоми: введення добавок-регуляторів властивостей, зміна умов твердіння, підбір вихідних матеріалів та ін.

Нормованими параметрами в задачах другої підгрупи, поряд з міцністю при стиску, можуть бути повзучість, морозостійкість, тепловиділення і т.д.

Для рішення задач даної підгрупи, так само як і попередньої, встановлюється область Ц/В або В/Ц, що забезпечує нормовані параметри, розглядаються технологічні шляхи її звуження й остаточно необхідне значення Ц/В. Регулювання Ц/В в цих задачах можливо, також, за рахунок зміни інших факторів складу, зокрема кількості цементного тіста, об'єму втягнутого повітря та ін.



Для ряду задач проектування складів бетону (наприклад, легких бетонів) Ц/В не є визначальним чинником, що забезпечує комплекс нормованих властивостей. Для таких задач (задач третьої підгрупи) варто знаходити сукупність істотних для всіх нормованих властивостей параметрів.

Розробка досить загального і доступного розрахунково-експериментального методу проектування складів бетонних сумішей із заданою легкоукладальністю і міцністю бетону стала можливою завдяки використанню ряду допущень, зроблених на основі фізичних закономірностей, обумовлених впливом структури бетону на його властивості. Дані закономірності можуть бути використані і при багатопараметричному проектуванні складів бетону.

Завдання на проектування складу бетону повинно бути підготовлено для конструкцій або виробів конкретної номенклатури, що виготовляють із бетону одного виду і якості по визначеній технології. Воно повинно містити:

- нормовані показники якості бетону відповідно до вимог проектної документації на конструкції (вироби) конкретних видів, для яких призначений бетон;

- показники якості бетонної суміші, тривалість і режими тверднення бетону та інші вимоги виробництва відповідно до технологічної документації;

- показники однорідності міцності бетону, а також відповідний їм середній рівень міцності, який передбачається на певний період;

- обмеження за параметрами складу бетону і застосування матеріалів для його виготовлення.

Метою *оптимізації складів бетонних сумішей* є зазвичай мінімізація витрати цементу при забезпеченні нормованих властивостей бетону. Разом з тим практика допускає застосування різноманітних простих і комплексних, технічних, економічних і техніко-економічних критеріїв оптимальності (табл. 5.1). Критерії оптимальності в завданнях оптимізації складів бетону можуть прямувати до деякого абсолютного або умовного екстремуму, а в багатокритеріальних задачах перебувають у компромісній області.



Основні критерії оптимальності при проектуванні складів
бетону*

Питома витрата ресурсу (на 1 м ³ бетонної суміші, конструкції, споруди): $X \rightarrow \min$.
Відношення питомої витрати ресурсу до показника визначальної властивості бетону (P _i): $X/P_i \rightarrow \min$.
Питомий вартісний показник*: $C \rightarrow \min$, де C – вартість 1 м ³ бетону, конструкції, споруди, ресурсів та ін.
Відношення питомих вартісних показників для даного бетону і бетону еталонного складу (C ₀): $C/C_0 \rightarrow \min$
Відношення питомих вартісних показників і показників властивостей (або навпаки): $C/P_i \rightarrow \min$ (або $P_i/C \rightarrow \max$).
Відношення показників властивості бетону (P _i) до питомої витрати матеріального або енергетичного ресурсу, необхідного для його виготовлення (X): $P_i/X \rightarrow \max$, де X – витрата цементу, заповнювачів, добавок, теплової, електричної енергії тощо.
Відношення показників властивості для даного бетону (P _i) і бетону еталонного складу (P ₀): $P_i/P_0 \rightarrow \max(\min)$.
Показник визначальної властивості (комплекс, співвідношення властивостей) бетонної суміші або бетону (P _i): $P_i \rightarrow \max(\min)$, де P _i – рухомість бетонної суміші, міцність, морозостійкість, усадка бетону та ін.

* – Критерій оптимальності розглядається при обов'язковому забезпеченні заданих показників властивостей.

Склад бетону характеризується витратами окремих компонентів із визначеними якісними показниками на 1 м³ бетонної суміші, які необхідні для забезпечення нормованих



показників матеріалу. Розрізняють номінальний (лабораторний) і виробничий (робочий) склади. *Номінальний склад* вказує витрати на 1 м³ суміші сухих компонентів, *виробничий (робочий)* – з певною вологістю компонентів.

Проектування (підбір) складів бетонів і розчинів може виконуватись експериментальними або розрахунково-експериментальними методами. Останні є найбільш поширеними. Вони базуються на застосуванні перевірених практикою розрахункових залежностей з остаточною перевіркою та уточненням розрахункових складів за допомогою експериментів.

5.2. Розрахунково-експериментальний метод проектування складів важких бетонів

Вибір вихідних матеріалів для бетонних сумішей.

Першим етапом проектування складів бетонів і розчинів є вибір вихідних матеріалів і визначення їх технічних властивостей. При виборі вихідних матеріалів враховують як їх якісні параметри, так і техніко-економічні характеристики.

Найбільш важливі якісні показники вихідних матеріалів бетонних сумішей розглянуті в розділі 2.

Основними технічними показниками при виборі *виду цементу* є його хіміко-мінералогічний і речовинний склад; активність і марка; міцність, яка досягається через визначений час тверднення в т.ч. при необхідності й в умовах тепловологісної обробки; нормальна густина і тонкість помелу; ряд інших показників, обумовлених проектними вимогами до бетону, умовами його роботи в конструкціях і спорудах.

При звичайній технології виробництва для бетонів класів С16/20...С25/30 необхідно застосовувати цемент марки не нижче М400, для бетонів класів С30/37 і вище – цемент марки не нижче М500. Для бетонів класів С12/15 і нижче можливе застосування цементів марок М300 і М400.

Рекомендовані види цементу у відповідності з умовами роботи конструкцій згідно рекомендацій НДІЗБ наведені в табл.5.2.



Рекомендовані види цементів

Умови роботи конструкцій	Вид цементу				
	порт- ланд- цемент	портланд- цемент з міне- ральни- ми до- бавками	шлако- порт- ланд- це- мент	сульфа- тостій- кий порт- ланд- цемент	пуцзола новий порт- ланд- цемент
Всередині будівлі з відносною вологістю повітря: до 60 %	$\frac{P}{P^1}$	P	$\frac{P}{P^2}$	Д	Н
більше 60 %	$\frac{P}{P}$	P	$\frac{P}{P}$	Д	Д
На відкритому повітрі (при дії атмосферних умов)	$\frac{P}{P}$	P	Д ²	Д	Н
Те саме, при одночасно- му систематичному по- перемінному заморожу- ванні і відтаванні або зволоженні і висиханні	$\frac{H}{H}$	Н	$\frac{Д^2}{Д}$	P	Н
В підземних і гідротех- нічних (та всередині масивних) спорудах	$\frac{Д}{H}$	Д	$\frac{Д}{H}$	Н	P
В зоні поперемінної дії води та морозу (гідро- споруд, облицювання каналів, відкритих ємностей)	$\frac{Д}{H}$	Н	$\frac{H}{H}$	P	Н

¹Під ризикою приведені дані для швидкотверднучого портландцементу і шлакопортландцементу.

²Застосування шлакопортландцементів для бетонів до яких висуваються вимоги за морозостійкістю допускається при введенні пороутворюючих добавок.

Примітка. В таблиці дані наступні позначення: P – рекомендується; Д – допускається; Н – не допускається.



Для бетонів, що піддають тепловій обробці слід застосовувати цементи I і II групи ефективності при пропарюванні, які відносяться до низько- і середньоалюмінатних ($C_3A=3...8\%$), нормально- і високоалітових ($C_3S - 50...60\%$). Не рекомендується в умовах теплової обробки бетонів застосовувати пуцоланові цементы (цементи IV типу).

Для важкого бетону в якості заповнювачів застосовують пісок, гравій і щебінь, які задовольняють вимогам ДСТУ БВ.2.7-43-96. В якості заповнювачів бетонів застосовують також золошлакові суміші, металургійні та паливні шлаки та інші промислові відходи після проведення відповідних випробувань та техніко-економічних обґрунтувань.

Найбільший розмір крупного заповнювача повинен не перевищувати $3/4$ відстані між арматурними стержнями і $1/3$ товщини виробу або конструкції.

Для зниження витрати цементу і заповнювачів, покращення властивостей бетону рекомендується до їх складу додавати мінеральні добавки як природного так і техногенного походження (шлаки, золошлакові суміші, золу та ін.). Для регулювання властивостей бетонних сумішей і бетонів, зниження витрат цементу, енергозбереження необхідно застосовувати хімічні добавки, які задовольняють вимогам діючих нормативних документів.

Технічні умови, яким має відповідати вода для бетонних сумішей викладені в ДСТУ БВ. 2.7- 273: 2011.

Розрахунок основних параметрів складу бетонних сумішей. Бетонна суміш у загальному випадку являє собою систему, для якої справедлива умова:

$$V_1 + V_2 + V_3 \dots V_n = I, \quad (5.1)$$

де V_i – абсолютний об'єм компонента бетонної суміші.

При використанні цієї умови задача розрахунку складу бетонної суміші зводиться до визначення витрат $n-1$ компонентів, наприклад для звичайного важкого бетону, витрат цементу, води, піску або щебеню (гравію).

Визначення складу бетонної суміші виконується із використанням залежностей, які пов'язують витрати окремих



компонентів або їхніх співвідношень із нормованими параметрами.

Загальна схема розрахунку складів важкого бетону, яка найбільш часто застосовується на практиці, приведена на рис. 5.1.

Цементно-водне відношення і обернене йому – *водоцементне відношення* (В/Ц), є основними параметрами складу бетонної суміші з якими однозначно пов’язані міцність бетону і комплекс інших його властивостей. При розрахунках Ц/В (або В/Ц) приймається середній рівень міцності бетону, який визначається залежно від необхідного класу за формулою (3.32) із урахуванням коефіцієнта k_c , який залежить від середнього за аналізований період коефіцієнта варіації міцності (табл. 3.19). Якщо визначальними для бетону є показники морозостійкості, водонепроникності та ін., середній рівень міцності повинен бути достатнім, щоб забезпечити дані показники.

З найбільш часто застосованих формул для знаходження Ц/В або В/Ц можна виділити наступні:

$$\text{при } f_{cm} \leq 1,2R_u \quad \frac{Ц}{В} = \frac{f_{cm} + 0,5AR_u}{AR_u}; \quad (5.2)$$

$$\frac{В}{Ц} = \frac{AR_u}{f_{cm} + 0,5AR_u}; \quad (5.3)$$

$$f_{cm} > 1,2R_u \quad \frac{Ц}{В} = \frac{f_{cm} - 0,5A_1R_u}{A_1R_u}; \quad (5.4)$$

$$\frac{В}{Ц} = \frac{A_1R_u}{f_{cm} - 0,5A_1R_u}. \quad (5.5)$$

де A – коефіцієнт, що залежить від якості вихідних матеріалів (4.25, 4.26, табл. 4.9).

Додаткові можливості для розширення діапазону розв’язуваних задач з’являються при використанні “приведеного Ц/В”, що розраховується за формулою (4.38).



В табл. 4.20 та 4.21 за даними С. А. Миронова приведені емпіричні значення відносної міцності бетону на стиск при різних температурах тверднення і в різному віці. Ці дані можна використовувати при відповідних умовах як коефіцієнти в формулі міцності бетону A_{tv} , що враховують зміну температури в діапазоні $0...40^{\circ}\text{C}$ і $-5...-15^{\circ}\text{C}$ (при від’ємних температурах у бетон додають хімічні добавки) при різній тривалості тверднення бетону.

Перехід від “приведеного Ц/В” до фактичного Ц/В можна здійснити за формулою:

$$\frac{Ц}{В} = \frac{(Ц + K_{ц.е} Д) - K_{ц.е} Д}{(В + V_{не}) - V_{не}} \quad (5.6)$$

де $K_{ц.е}$ – коефіцієнт “цементуючої ефективності” мінеральної добавки;

$Д$ – вміст мінеральної добавки, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$V_{не}$ – об’єм пор, заповнених повітрям.

Коефіцієнт “цементуючої ефективності” легко визначити за експериментальними даними для рівномісних бетонів за формулою (4.40).

На водопотребу бетонної суміші вирішальне значення має показник легкоукладальності, який призначається залежно від особливостей конструкцій і способу укладки (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

Показники легкоукладальності бетонної суміші залежно від виду конструкцій і способу укладки

Конструкції	Спосіб укладки бетонної суміші		
	з вібрацією		без вібрації
	ОК, см	Ж, с	ОК, см
Збірні залізобетонні з негайним розпалубленням	0	90...35	-
Підготовка під фундаменти і підлоги, дорожні і аеродромні покриття	1...2	35...25	2...3
Масивні неармовані з рідко розташованою арматурою	2...4	25...15	3...6
Каркасні залізобетонні (плити, балки, колони)	8...4	15...10	6...12



продовження табл. 5.3

Конструкції	Спосіб укладки бетонної суміші		
	з вібрацією		без вібрації
	ОК, см	Ж, с	ОК, см
Залізобетонні з густо розташованою арматурою (бункери, силоси та ін.)	8...10	10...5	12...15
Касети і елементи для об'ємно-збірного домобудування	12...18	-	-
Буронабивні сваї, шахтні стовбури	16...20	-	-
Конструкції дуже насичені арматурою і закладними деталями, які заважають укладці пластичних сумішей із вібруванням	20...24	-	-

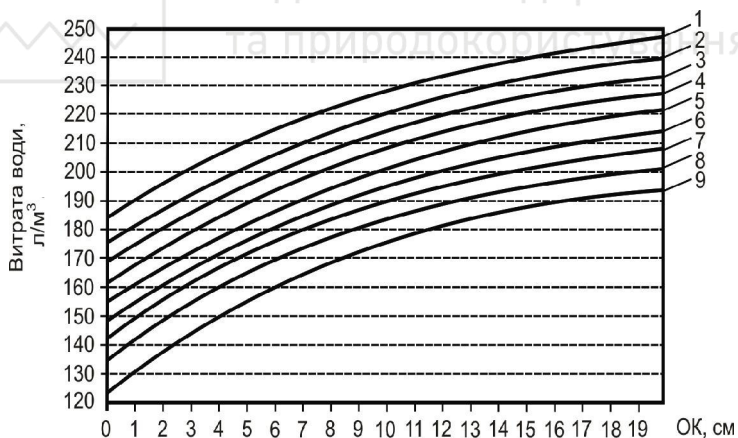


Рис. 5.3. Залежність витрати води на 1 м³ бетону від рухомості бетонних сумішей:

1 – пісок $M_k = 3$; 2-9 – щебінь гранітний крупністю 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80 і 150 мм



В практиці проектування складів бетону водопотребу бетонних сумішей зазвичай визначають по усередненим емпіричним даним за допомогою таблиць або графіків (рис. 5.3, табл. 4.1, 5.4, 5.5).

Таблиця 5.4

Орієнтовна витрата води (V_0) залежно від виду заповнювачів і легкоукладальності бетонної суміші

Легкоукладальність		Витрата води, л/м ³ при максимальній крупності заповнювача, мм			
Осадка конуса, см	Жорсткість, с	10	20	40	70
16...20	-	237	228	213	202
12...16	-	230	220	207	195
10...12	-	225	215	200	190
8...10	-	215	205	190	185
5...7	-	210	200	185	180
2...4	-	200	190	175	170
-	10...15	185	175	160	155
-	15...20	175	165	150	145
-	25...35	170	160	145	140
-	40...50	160	150	135	130

Примітки: 1. При збільшенні вмісту в щебені мулу та пилу понад 1% і частинок менше 5 мм вище 5% витрата води збільшується на 1...2 л на кожний відсоток. При збільшенні вмісту в піску мулу та пилу більше 3% – на 2 л/м³ на кожний відсоток. 2. Витрата води замішування наведена для бетонних сумішей, виготовлених на щебені з магматичних порід. Для бетонів на гравії витрата води зменшується на 10 л/м³. 3. Витрата води дана для бетонних сумішей на портландцементі з нормальною густиною цементного тіста 26-28%, і середньозернистому піску ($M_k=2-2,5$) без пластифікуючих добавок. При зміні нормальної густоти цементного тіста на кожний відсоток у бік зменшення витрата води зменшується на 3-5 л, у бік збільшення – збільшується на 3-5 л. При зміні модуля крупності піску на кожні 0,5 у бік зменшення витрата води збільшується на 3-5 л, у бік збільшення – зменшується на 3-5 л.



Таблиця 5.5

Водопотреба бетонної суміші при застосуванні піску $V_n=7\%$

Легкоукладальність		Витрата води, л/м ³ , при максимальній крупності заповнювачів, мм					
Осадка конуса, см	Жорсткість, с	гравій			щебінь		
	за стандартним віскозиметром	10	20	40	10	20	40
0	31	150	135	125	160	145	135
0	30...20	160	145	130	170	155	145
0	20...11	165	150	135	175	160	150
0	10...5	175	160	145	185	170	155
1...2		185	170	155	195	180	165
3...4		195	180	165	205	190	175
5...6		200	185	170	210	195	180
7...8		205	190	175	215	200	185
9...10		215	200	185	225	210	195

Примітки: 1. Таблиця складена для пісків із водопотребою $V_n=7\%$. При збільшенні V_n на кожен відсоток витрата води підвищується на 5 л, а при зменшенні V_n скорочується відповідно на 5 л. 2. При застосуванні пуцоланових цементів витрату води збільшують на 15...20 л.

При розрахунках водопотреби бетонних сумішей обов'язковим є врахування особливостей вихідних матеріалів та водоредукуючого ефекту пластифікуючих добавок.

Відомі значення цементно-водного або водоцементного відношення і водопотреби бетонної суміші дають можливість легко розрахувати витрату цементу в кг/м³:

$$Ц = B \cdot \frac{Ц}{B} \text{ або } Ц = \frac{B}{B / Ц} \quad (5.7)$$

Мінімальна витрата цементу приймається за ДСТУ Б В.2.7.-43-96 відповідно до табл. 5.6.



Таблиця 5.6

Мінімальна витрата цементу в бетоні

Вид конструкції	Умови експлуатації	Вид і витрата цементів, кг/м ³		
		ПЦ-Д0 ПЦ-Д5 ССПЦ-Д0	ПЦ-Д20 ССПЦ- Д20	ШПЦ ССШПЦ ПуцПЦ
Неармовані	Без атмосферного впливу	Не нормується		
	При атмосферному впливі	150	170	170
Армовані з ненапруженою арматурою	Без атмосферного впливу	150	170	180
	При атмосферному впливі	200	220	240
Армовані з попередньо напруженою арматурою	Без атмосферного впливу	220	240	270
	При атмосферному впливі	240	270	300

Примітки. 1. ПЦ-Д0, ПЦ-Д5, ПЦ-Д20 – портландцемент з вмістом мінеральної добавки відповідно 0, 5 і 20% за масою, ССПЦ-Д0, ССПЦ-Д20 – сульфатостійкий портландцемент з вмістом мінеральної добавки 0 і 20%, ШПЦ і ПуцПЦ – відповідно шлакопортландцемент і пуцолановий цемент, ССШПЦ – сульфатостійкий портландцемент. **2.** Допускається виготовлення армованих бетонів з витратою цементу менше мінімально допустимого за умови попередньої перевірки забезпечення захисних властивостей бетону по відношенню до сталеві арматури. **3.** Мінімальну витрату цементів інших видів встановлюють на основі результатів оцінки захисних властивостей бетонів на цих цементах по відношенню до сталеві арматури.

Витрату заповнювачів можна розрахувати, знаючи об'єм цементного тіста ($V_{ц.м}$) в бетонній суміші і рекомендовану частку піску в сумарному об'ємі піску та щебеню (гравію).

Об'єм цементного тіста, л/м³:

$$V_{ц.м} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + B. \quad (5.8)$$



Об'єм заповнювачів бетону, л/м³:

$$V_3 = 1000 - V_{ц.м}. \quad (5.9)$$

Об'єм V_n , л/м³ і маса Π , кг/м³ піску :

$$V_n = rV_3, \quad \Pi = \rho_n V_n. \quad (5.10)$$

Об'єм $V_{щ}$, л/м³ і маса Щ , кг/м³, крупного заповнювача:

$$V_{щ} = V_3 - V_n, \quad (5.11)$$

$$\text{Щ} = \rho_{щ} V_{щ}. \quad (5.12)$$

У наведених вище формулах $\rho_ц$, ρ_n , $\rho_{щ}$ – густина відповідно цементу ($\rho_ц \approx 3,1$ кг/л), піску, щебеню чи гравію.

Рекомендовані орієнтовні значення частки піску (r) у суміші заповнювачів наведені в табл. 5.7.

Таблиця 5.7
Орієнтовні значення частки піску (r) у суміші заповнювачів

Витрата цементу, кг/м ³	Максимальна крупність зерен щебеню, гравію, мм	Модуль крупності піску	r при використанні	
			щебеню	гравію
250	20	1,5-2,0	0,35	0,33
		2,0-2,5	0,36	0,34
	40	1,5-2,0	0,34	0,33
		2,0-2,5	0,35	0,34
	70	1,5-2,0	0,33	0,32
		2,0-2,5	0,34	0,33
300	20	1,0-2,0	0,34	0,32
		2,0-2,5	0,35	0,33
	40	1,5-2,0	0,33	0,32
		2,0-2,5	0,34	0,33
	70	1,5-2,0	0,32	0,31
		2,0-2,5	0,33	0,32



продовження табл. 5.7

Витрата цементу, кг/м ³	Максимальна крупність зерен щебеню, гравію, мм	Модуль крупності піску	r при використанні	
			щебеню	гравію
350	20	1,0-2,0	0,32	0,30
		2,0-2,5	0,33	0,31
	40	1,5-2,0	0,31	0,30
		2,0-2,5	0,32	0,31
	70	1,5-2,0	0,31	0,30
		2,0-2,5	0,32	0,31
400	20	1,0-2,0	0,30	0,28
		2,0-2,5	0,31	0,29
	40	1,5-2,0	0,29	0,28
		2,0-2,5	0,30	0,29
	70	1,5-2,0	0,29	0,28
		2,0-2,5	0,30	0,29

Примітка. Наведені значення r рекомендуються для бетонної суміші з рухомістю 2 см. При збільшенні рухомості на кожні 2 см значення r збільшується на 0,01.

У широко застосовуваних розрахунково-експериментальних методах проектування складів бетону для визначення витрат піску і щебеню передбачається використання коефіцієнта заповнення порожнин і розсунення зерен щебеню (гравію) в бетонній суміші цементно-піщаним розчином – α . Цей коефіцієнт (*коефіцієнт розсунення*) справедливий при допущенні, що бетонну суміш можна представити як двофазну систему, яка складається із крупного заповнювача в насипному стані і цементно-піщаного розчину.

У цьому випадку формулюється наступна умова:

$$\frac{B}{\rho_b} + \frac{Ц}{\rho_c} + \frac{П}{\rho_n} = \alpha P_{щ} \frac{Щ}{\rho_{н.щ}}, \quad (5.13)$$

де $P_{щ}$ – пустотність крупного заповнювача,

$\rho_{н.щ}$ – його насипна густина;

ρ_b, ρ_c, ρ_n – густина відповідно води, цементу та піску.

Параметри r і α взаємопов'язані:



$$\alpha = \frac{V_{ц.м} + rV_3}{(1-r)P_3V_3}, \quad (5.14)$$

де $V_{ц.м}$ – об'єм цементного тіста;

P_3 – пустотність суміші заповнювачів.

Витрати крупного і дрібного заповнювачів можна легко знайти рішенням системи 2-х рівнянь матеріального балансу. Перше рівняння в системі (5.15) відображає рівність абсолютного об'єму бетонної суміші сумі абсолютних об'ємів компонентів, що входять до неї, друге – відповідність об'єму цементно-піщаного розчину об'єму порожнин зерен крупного заповнювача з урахуванням їх необхідного розсунення для забезпечення заданої легкоукладальності суміші:

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{B}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_n} + \frac{ШЦ}{\rho_{ц.ц}} = 1000$$

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{B}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_n} = \alpha P_{ц} \frac{ШЦ}{\rho_{н.ц}}, \quad (5.15)$$

де $\rho_{ц}$, $\rho_{в}$, ρ_n і $\rho_{ц.ц}$ – дійсна густина відповідно цементу, води, дрібного та крупного заповнювачів, кг/л;

$P_{ц}$ – пустотність крупного заповнювача;

$\rho_{н.ц}$ – його насипна густина, кг/л.

З системи (5.15) слідує:

$$ШЦ = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{ц.ц}} + \frac{\alpha P_{ц}}{\rho_{н.ц}}}; \quad (5.16)$$

$$П = (1000 - Ц / \rho_{ц} - B / \rho_{в} - ШЦ / \rho_{ц.ц}) \rho_n. \quad (5.17)$$

Коефіцієнт розсунення α визначають за довідковими даними (табл. 5.8).

В рівняннях (5.15) враховують об'єм мінеральних добавок і повітря, якщо вони знаходяться в бетонній суміші в значній кількості.



Таблиця 5.8

Коефіцієнт розсунення α
(для пластичних бетонних сумішей)

Витрата цементу, кг/м ³	Значення α при B/C					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	–	–	–	1,26	1,32	1,38
300	–	–	1,3	1,36	1,42	–
350	–	1,32	1,38	1,44	–	–
400	1,31	1,4	1,45	–	–	–
500	1,44	1,52	–	–	–	–
600	1,52	1,56	–	–	–	–

Примітки: 1. Таблиця складена для пісків із водопогребом $B_n=7\%$. При збільшенні B_n на кожен відсоток α зменшується на 0,03, а при зниженні B_n зростає відповідно на 0,03. 2. Для жорстких бетонних сумішей ($C < 400$ кг/м³) $\alpha = 1,05 \dots 1,15$.

Приклади

5.1. Необхідно розрахувати C/B для важкого бетону класу $C16/20$. Бетон виготовляють із застосуванням портланд-цементу марки $M500$ на гранітному щебені з вмістом відмулюваних часток (глини, пилу і мулу) 1% і кварцовому піску – 3% . За даними виробничого контролю середнє значення коефіцієнта варіації бетону $V_c=8\%$.

1. Розраховуємо середній рівень міцності бетону. При $V_c=8\%$ коефіцієнти $k_t=1,09$ (табл. 3.19):

$$f_{cm} = k_t C = 1,09 \cdot 20 = 21,8 \text{ МПа};$$

2. Враховуючи, що $f_{cm} < 1,2R_c$ (R_c – марка цементу) прийемо для розрахунку C/B формулу (5.2);

3. Значення коефіцієнта A прийемо за табл. 4.9, $A=0,58$;

4. Розрахункове значення C/B :

$$\frac{C}{B} = \frac{21,8 + 0,5 \cdot 0,58 \cdot 50}{0,58 \cdot 50} = 1,25.$$



5.2. Необхідно розрахувати В/Ц для отримання бетону міцністю 20 МПа у віці (τ) 7 діб при температурах тверднення (t) 10 і 30° С. Коефіцієнт A в формулі ($pA_i = AA_1A_2 \dots A_n$), з урахуванням якості заповнювачів прийняти 0,52 (табл. 4.9). Активність використаного портландцементу $R_y = 40$ МПа.

1. Знаходимо за табл. 4.20 коефіцієнт A_{τ} :

при $t = 10^\circ \text{C}$, $\tau = 7$ діб $A_{\tau} = 0,58$;

$t = 30^\circ \text{C}$, $\tau = 7$ діб $A_{\tau} = 0,90$;

2. Знаходимо В/Ц за формулою (5.3), врахувавши додатково коефіцієнт A_{τ} :

$$\text{при } 10^\circ \text{C} \quad B / Ц = \frac{0,58 \cdot 0,52 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 0,58 \cdot 40} = \frac{12,064}{26,03} = 0,46;$$

$$30^\circ \text{C} \quad B / Ц = \frac{0,90 \cdot 0,52 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 0,90 \cdot 40} = \frac{18,72}{29,36} = 0,64.$$

Використання коефіцієнта A_{τ} дає можливість розглянути приклад і при іншій постановці задачі, визначивши очікувану міцність бетону у віці 7 діб (f_{cm}^7) при температурах тверднення 10 і 30° С, якщо він розрахований на міцність у 28 діб.

Наприклад, за нормальних умов тверднення $f_{cm} = 30$ МПа. Тоді при $t = 10^\circ \text{C}$ $f_{cm}^7 = 0,58 \cdot 30 = 17,4$ МПа; $t = 30^\circ \text{C}$ $f_{cm}^7 = 0,9 \cdot 30 = 27$ МПа.

5.3. Бетон на портландцементі марки М500 і заповнювачах середньої якості з добавкою нітриту натрію (НН) твердне при температурі -5° С. Визначити Ц/В при якому бетон у віці 28 діб буде відповідати за міцністю на стиск класу С16/20.

1. Середній рівень міцності бетону класу С16/20 (формула 3.32а):

$$f_{cm} = \frac{20}{0,778} = 25 \text{ МПа}.$$

2. Приймаємо коефіцієнт A у формулі ($pA_i = AA_1A_2 \dots A_n$), що враховує якість заповнювачів рівним 0,6 (4.25), а коефіцієнт A_{τ} , що враховує вихід міцності бетону з протиморозною добавкою у віці 28 діб 0,7 (табл. 4.41). Тоді значення Ц/В, яке



при заданих умовах забезпечує отримання бетону класу С16/20 за формулою (5.1) дорівнює:

$$\frac{Ц}{B} = \frac{25 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 0,7 \cdot 50}{0,6 \cdot 0,7 \cdot 50} = \frac{35,5}{21} = 1,69.$$

5.4. Для отримання бетону класу С20/25 на портландцементі марки М500 і заповнювача низької якості, що має тверднути за нормальних умов введено 150 кг/м^3 золи-виносу. Визначити необхідне значення приведенного Ц/В – $(Ц/В)_{пр}$ і розрахувати можливе зменшення Ц/В внаслідок введення золи-виносу. Витрата води 180 л/м^3 .

1. Необхідний середній рівень міцності бетону:

$$f_{cm} = \frac{25}{0,778} = 32 \text{ МПа};$$

2. Приймаємо згідно формули (4.25) $A=0,55$. Знайдемо значення $(Ц/В)_{пр}$ за формулою (4.38):

$$\left(\frac{Ц}{B}\right)_{пр} = \frac{32 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 50}{0,55 \cdot 50} = \frac{45,75}{27,5} = 1,66;$$

3. Величина фактичного Ц/В при введенні добавки золи-виносу за формулою (5.6) ($D=150 \text{ кг/м}^3$, $K_{це}=0,16$, (табл. 4.15):

$$\frac{Ц}{B} = 1,66 - \frac{0,16 \cdot 150}{180} = 1,53;$$

4. Розрахункове зменшення Ц/В при введенні золи-виносу:

$$\Delta Ц/В = 1,66 - 1,53 = 0,13.$$

5.5. Визначити Ц/В, необхідне для отримання через 4 год. після пропарювання за нормалізованим режимом



(2+3+6+2год) при 80° С бетону на рядових заповнювачах із міцністю при стиску 30 МПа. Марка портландцементу 400, активність після пропарювання 30 МПа.

1. За формулою (4.43) знаходимо Ц/В:

$$\begin{aligned}30 &= (0,41 \cdot 30 + 9) \text{Ц/В} - 0,83(\text{Ц/В})^2 - 0,35 \cdot 30 - 7; \\30 &= 21,3 \text{Ц/В} - 0,83(\text{Ц/В})^2 - 3,5, \\21,3 \text{Ц/В} - 0,83(\text{Ц/В})^2 - 33,5 &= 0, \\ \text{Ц/В} &= 1,68,\end{aligned}$$

2. Очікувану міцність бетону на стиск у віці 28 діб знайдемо за формулою (4.25) :

$$f_{cm} = 0,6 \cdot 40(1,68 - 0,5) = 28,32 \text{ МПа} .$$

5.6. Визначити необхідне Ц/В, яке забезпечує у віці 28 діб міцність бетону на стиск $f_{cm} \geq 20$ МПа, міцність бетону на розтяг при згині $f_{c,lf} \geq 11,7$ МПа, міцність бетону на розтяг при розколюванні $f_{c,sp} \geq 7,9$ МПа.

Як слідує з графіка (рис. 5.2) для даного прикладу визначальним параметром є міцність на розтяг при згині. Значення Ц/В, яке забезпечує $f_{c,lf} = 11,7$ МПа (Ц/В=2,5) дозволяє також отримання і значень міцності на стиск і на розтяг при розколюванні не менше заданих.

5.7. Визначити орієнтовну витрату води для виготовлення бетонної суміші марки Р2 (ОК=5...7 см). Вихідні матеріали: портландцемент з НГ=24%, крупний заповнювач – річковий гравій крупністю до 40 мм, дрібний заповнювач – пісок із $M_p = 1,5$ і вмістом мулу та пилу – 4%.



Таблиця 5.9

Розрахунок витрати води , л/м³

Водопотреба за табл. ₃ 5.4, л/м ³	Поправки л/м ³ на застосування				Орієнтовна витрата води, л/м ³
	гравію	портланд- цементу з НГ=24%	піску із M _к =1,5	вміст пилу та мулу в піску	
185	-10	-8	+5	+2	174

5.8. Визначити орієнтовну витрату води для отримання бетонної суміші з ОК=9...10 см. Вихідні матеріали: пуцолановий портландцемент (портландцемент IV типу), щебінь крупністю до 40 мм, пісок з водопотребою 9%. Добавка – суперпластифікатор із водоредукуючим ефектом 20...25%.

1. За даними табл. 5.5 знаходимо, що орієнтовна витрата води в бетонній суміші без пластифікуючої добавки з урахуванням поправок на водопотребу піску і застосування пуцоланового цементу повинна складати:

$$195 + 10 + 15 = 220 \text{ л.}$$

2. Введення добавки суперпластифікатора знижує витрату води на 20...25%: $220 \text{ л} - (44 \dots 55) \text{ л} = 176 \dots 165 \text{ л.}$

5.9. Розрахувати номінальний склад бетону класу C12/15 у віці 28 діб, що вкладається бетононасосом. Густина кварцового піску $\rho_n = 2,62 \text{ кг/л}$, водопотреба $V_n = 8\%$, густина гранітного щебеню $\rho_{щ} = 2,65 \text{ кг/л}$. Рухомість бетонної суміші за умовами укладки бетононасосом приймається рівною ОК=6 см (марка за легкоукладальністю P2). Найбільша крупність заповнювача становить 40 мм, насипна густина $\rho_{н.щ} = 1,48 \text{ кг/л}$. Статистичний контроль міцності бетону не виконувався.

1. Встановлюємо необхідну середню міцність бетону за формулою (3.34):

$$f_{cm} = 1,1 \frac{15}{0,778} = 21,1 \text{ МПа.}$$



2. Водоцементне відношення визначимо за формулою (4.25) для рядових заповнювачів ($A=0,6$).

$$\frac{B}{Ц} = \frac{0,6 \cdot 40}{21,1 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 40} = 0,733;$$

3. Витрата води з урахуванням водопотреби піску – $B=185$ л/м³ (за табл. 5.5).

4. Визначимо витрату цементу, кг/м³:

$$Ц = \frac{185}{0,73} = 253.$$

5. Виравовуємо пустотність крупного заповнювача:



$$P_{ц} = 1 - \frac{1,48}{2,65} = 0,44.$$

6. Коефіцієнт розсунення зерен $\alpha=1,35$ (за табл. 5.8). Оскільки пісок має водопотребу 8%, зменшуємо коефіцієнт розсунення на 0,03, остаточно приймаємо $\alpha=1,32$. Визначимо витрату щебеню за формулою (5.16), кг/м³:

$$Щ = \frac{1000}{\frac{0,44 \cdot 1,32}{1,48} + \frac{1}{2,65}} = 1300.$$

7. Визначимо витрату піску, кг/м³:

$$П = \left[1000 - \left(\frac{253}{3,1} + \frac{1300}{2,65} + 185 \right) \right] \cdot 2,62 = 637.$$

Розрахунковий номінальний склад бетону, кг/м³: $Ц=253$;
 $П=637$; $Щ=1300$; $B=185$ або 1:2,5:5,1 при $B/Ц=0,73$.



5.10. Визначити склад важкого бетону з середнім рівнем міцності в 28 діб $f_{cm}=60$ МПа, що твердне в умовах, які наближаються до нормальних. Рухомість бетонної суміші відповідає ОК=2...4 см, у суміш вводиться добавка-суперпластифікатор С-3 в оптимальній кількості 0,8% від маси цементу.

Вихідні матеріали: портландцемент із НГ=27%, активністю $R_c=45$ МПа. Щебень гранітний з максимальною крупністю зерен 40 мм, густиною $\rho_{щ}=2,7$ г/см³, насипною густиною $\rho_{н,щ}=1630$ кг/м³, пісок середньозернистий із модулем крупності $M_k=2,2$ і густиною $\rho_n=2,6$ г/см³.

1. Знайдемо значення водоцементного відношення за формулою (5.5); враховуючи, що $f_{cm} > 1,2R_c$. Коефіцієнт $A_f=0,43$ (4.26):



$$\frac{B}{Ц} = \frac{0,43 \cdot 45}{60 - 0,5 \cdot 0,43 \cdot 45} = 0,37$$

2. Витрата води за табл. 5.4 $B_0=175$ л/м³.

Приймаємо, що водоредукуючий ефект при введенні добавки С-3 складає 20%, тоді витрата води в бетонній суміші з добавкою:

$$B = 0,8 \cdot 175 = 140 \text{ л/м}^3$$

3. Розрахуємо витрати окремих компонентів за формулами (5.7, 5.16, 5.17). Пустотність щебню: $1 - 1,63/2,7=0,4$. Коефіцієнт $\alpha=1,38$ (табл. 5.8):

$$Ц = 140 : 0,37 = 378 \text{ кг/м}^3;$$

$$C-3 = \frac{0,8 \cdot 378}{100} = 3,02 \text{ кг/м}^3;$$

$$Щ = \frac{1000}{0,4 \cdot \frac{1,38}{1,63} + \frac{1}{2,7}} = 1408 \text{ кг/м}^3;$$



$$П = \left[1000 - \left(\frac{378}{3,1} + \frac{140}{1} + \frac{1408}{2,7} \right) \right] \cdot 2,6 = 564 \text{ кг/м}^3.$$

5.11. При умовах зазначених в прикладі 5.10, знайти витрати щебеню і піску, використавши рекомендовані в табл. 5.7 значення g .

1. Об'єм цементного тіста:

$$V_{ц.т} = \frac{378}{3,1} + 140 = 262 \text{ л/м}^3.$$

Об'єм заповнювачів:

$$V_z = 1000 - 262 = 738 \text{ л/м}^3.$$

2. При $g=0,31$ (табл. 5.7) витрата піску:

$$П = 738 \cdot 0,31 \cdot 2,6 = 595 \text{ кг/м}^3.$$

3. Витрата щебеню:

$$Щ = [738 - (738 \cdot 0,33)] \cdot 2,7 = 1374 \text{ кг/м}^3.$$

Вправи

5.1. Порівняти значення Ц/В, розраховані за формулами (5.2) і (5.3) для отримання бетонів класів С16/20, С20/25, С35/45, С40/50 при використанні рядових заповнювачів та цементів марок 400 та 500.

5.2. Визначити як зміняться розрахункові значення Ц/В та витрата цементу для бетонів класів С16/20 та С35/45 при використанні бетонної суміші з маркою за рухомістю Р3 на щебені з максимальною крупністю 20 мм, піску з водопотребою 9%, портландцементі М500, якщо груповий коефіцієнт варіації бетону в контрольному періоді змінився від 8 до 15%.



5.3. Завод виробляє бетони класів за міцністю C12/15 і C25/30. В аналізованому періоді бетонні суміші марок P2 і P3 виготовлялись на промитому щебені, піску з модулем крупності $M_k=3$, вмістом пилюватих і мулистих часток 3%, портландцементі марки M500 з НГ=27%. Коефіцієнт варіації міцності бетону класу C12/15 склав 8%, C25/30 – 12,5%. Як зміниться Ц/В і витрата цементу в контрольованому періоді, якщо для виготовлення бетонної суміші почали використовувати щебінь з вмістом пилу і мулу 2%, пісок з $M_k=1,5$, вмістом пилюватих та мулистих часток 5%. Нормальна густина цементу збільшилась до 29%.

5.4. Визначити, як необхідно змінити Ц/В і витрату цементу для бетону класу C16/20 на портландцементі і на шлакопортландцементі M400 при застосуванні рядових заповнювачів, щоб при температурах 5 і 10° С бетон мав таку ж міцність у віці 1, 7 і 28 діб, як при 20° С. Витрату води прийняти при застосуванні портландцементу 185 л/м³, шлакопортландцементу 195 л/м³.

5.5. Згідно метеопрогнозу температура повітря в найближчий місяць може змінитися від +10 до -10° С. Розрахувати як необхідно скоректувати цементно-водне відношення і витрату: а) портландцементу M400, б) шлакопортландцементу M400 для отримання бетону класу C16/20 без зниження міцності в 7, 14 і 28 діб при введенні протиморозних добавок: а) нітриту натрію (НН); б) поташу (П). Для отримання бетонної суміші (заповнювачі рядові) витрата води становить при застосуванні портландцементу 185 л/м³, шлакопортландцементу 195 л/м³.

5.6. Розрахувати витрату цементу для бетонів нормального тверднення при застосуванні портландцементу M500, щебеню з крупністю зерен 40 мм, піску з водопотребою 8%. Осадка конуса бетонної суміші 9 см. Проектна міцність бетону 30 МПа. Можливі 3 варіанти: а) бетон без введення добавок; б) при введенні 150 кг кам'яновугільної золи-виносу з $K_{це}=0,16$; в) при введенні золи і повітрявтягуючої добавки, що залучає у бетонну суміш 5% повітря. Вміст води при введенні золи збільшується на 5 л/м³, при введенні золи та повітрявтягуючої добавки зменшується на 10 л/м³.



5.7. Розрахункові значення витрат портландцементу і води складають: $C=350 \text{ кг/м}^3$, $V=180 \text{ кг/м}^3$. Дійсна густина цементу $3,1 \text{ кг/л}$, піску $2,56 \text{ кг/л}$, щебеню – $2,67 \text{ кг/л}$, насипна густина щебеню – $1,65 \text{ кг/л}$. Порівняти розрахункові значення необхідних витрат щебеню та піску при застосуванні: а) рекомендованої частки піску (γ) в суміші заповнювачів (табл. 5.7); б) коефіцієнта розсунення α (табл. 5.8).

5.8. Розрахувати склад бетону класу за міцністю C20/25 з рухомістю, що відповідає марці P3 при застосуванні портландцементу марки M500, гранітного щебеню з найбільшою крупністю 40 мм, дійсною густиною $\rho_{\text{щ}}=2,67 \text{ кг/л}$ і насипною густиною $\rho_{\text{н.щ}}=1,55 \text{ кг/л}$, дрібного піску з водопотребою $V_{\text{п}}=9\%$. В бетонну суміш вводиться суперпластифікатор з водоредукуючим ефектом 21%. При однакових Ц/В суперпластифікатор практично не впливає на міцність бетону.

5.3. Проектування складів легких та ніздрюватих бетонів

Легкі бетони. Загальні вимоги і довідкові дані. У групу легких бетонів, що виготовляють з застосуванням портландцементу або його різновидів, крупного і дрібного пористих заповнювачів (дрібний заповнювач може бути також щільним), входять теплоізоляційні, конструкційно-теплоізоляційні і конструкційні бетони. Виготовляють також спеціальні легкі бетони (жаростійкі, хімічно стійкі та ін.).

Теплоізоляційні бетони з густиною до 500 кг/м^3 , міцністю на стиск $1,5\dots2,5 \text{ МПа}$ і коефіцієнтом теплопровідності $0,12\dots0,24 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ застосовують в системах теплоізоляції будівель і споруд.

До *конструкційно-теплоізоляційних* відносять бетони, які призначені для огорожуючих конструкцій будівель і повинні характеризуватися необхідною теплоізоляційною здатністю поряд з достатньою міцністю.



Конструкційні легкі бетони застосовують для несучих конструкцій будівель і споруд, для них вимоги за теплоізолюючою здатністю не є визначальними.

Для конструкційно-теплоізоляційних бетонів густина знаходиться, зазвичай, в діапазоні 500...1400 кг/м³, міцність – 3,5...10 МПа, теплопровідність 0,17...0,40 Вт/(м·°С), для конструктивних відповідно – 1400...2000 кг/м³, 15...50 МПа, 0,4...0,58 Вт/(м·°С).

Метою проектування складів легких бетонів, як і важких, є забезпечення нормативних показників їх якості зазвичай при мінімально можливих витратах цементу або вартості матеріалів на 1 м³ бетону. Для конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів критерієм оптимізації складів може бути також мінімально можлива густина при забезпеченні інших нормованих властивостей.

Основним міцнісним параметром легких бетонів при проектуванні їх складів для збірних залізобетонних виробів є відпускна міцність. Для конструкційно-теплоізоляційних бетонів вона приймається 80% проектної, конструкційних – 70%. Для конструкційних легких бетонів, призначених для попередньо напружених конструкцій, нормується передаточна міцність. За умови забезпечення нормованих значень відпускної (передаточної) міцності перевіряється також необхідна міцність бетону в проектному віці.

Середній рівень міцності легкого бетону, який забезпечує заданий клас, так як і для важкого бетону розраховується за ДСТУ Б В.2.7-224:2009 із врахуванням однорідності бетону за міцністю.

Середній рівень густини бетону визначається аналогічно міцності за формулою:

$$\rho_{cm} = \rho_n K_T K_{m.n.}, \quad (5.18)$$

де ρ_n – нормована густина легкого бетону;

K_T і $K_{m.n.}$ – коефіцієнти, що приймаються залежно від досягнутого рівня однорідності густини за табл. 5.10.



Таблиця 5.10

Значення добутку коефіцієнтів K_T і $K_{м.п.}$

Коефіцієнт варіації за серед- ньою густин- ною, $V_{п, \%}$	Значення добутку $K_T \cdot K_{м.п.}$ для бетонів з середньою густиною		Коефі- цієнт варіації за серед- ньою густин- ною, $V_{п, \%}$	Значення добутку $K_T \cdot K_{м.п.}$ для бетонів з середньою густиною	
	700...1400 кг/м ³	>1400 кг/м ³		700...1400 кг/м ³	>1400 кг/м ³
2	1,0	0,98	6	0,93	0,92
3	0,985	0,985	7	0,92	0,90
4	0,97	0,95	8	0,90	-
5	0,95	0,94			

Легкоукладальність бетонних сумішей призначається залежно від виду конструкцій і технології їх виготовлення (табл. 5.11), вона повинна зберігатися до 30 хв.

Поряд зі щільними виготовляють поризовані легкі бетони. В поризованих легкобетонних сумішах об'єм втягнутого повітря підбирається за умови забезпечення нормованих характеристик бетону і, разом з тим, захисту сталеві арматури від корозії.

Таблиця 5.11

Рекомендована легкоукладальність легкобетонних сумішей

Конструкції	Марки бетонних сумішей за легкоукладальністю
Тонкостінні, які бетонуються у вертикальному положенні	P2...P3
Масивні, які виготовляються за стендовою технологією	P1
Масивні, які виготовляються на вібрамайданчиках	Ж1...Ж2
Тонкостінні, які бетонуються в горизонтальному положенні	Ж2...Ж3

Мінімальна витрата цементу в легкому бетоні для армованих конструкцій повинна бути не менше 200 кг/м³, а при



застосуванні зол ТЕС або інших мікронаповнювачів – 180 кг/м^3 . При застосуванні зол ТЕС із питомою поверхнею більше $400 \text{ м}^2/\text{кг}$ і втратами при прожарюванні (ВПП) більше 15% мінімальна витрата цементу для армованих конструкцій має бути не менше 220 кг/м^3 . Для неармованих виробів мінімальна витрата цементу не обмежується за умови забезпечення необхідних властивостей бетонної суміші і проектних характеристик бетону.

Для високорухомих сумішей витрата цементу повинна бути не менше 300 кг/м^3 , а сумарна витрата цементу і пиловидних фракцій піску (або золи) – не менше 400 кг/м^3 .

Для приготування конструкційних бетонів підвищеної водонепроникності, які застосовуються в агресивному середовищі, витрати цементу повинні бути не менше, вказаних в табл. 5.12.

Таблиця 5.12
Мінімальні витрати цементу для легких бетонів
з підвищеною водонепроникністю

Марка за водонепроникністю	Мінімальні витрати цементу, кг/м^3 , для легкобетонних сумішей марок за легкоукладальністю		
	Ж1	P1	P2
W4	290	310	400
W6	330	380	430
W8	380	430	480

Витрата крупного заповнювача за насипним об'ємом л/м^3 , не повинна перевищувати:

600 – в сумішах, які призначені для внутрішніх стінових панелей з підвищеною звукоізоляцією;

700 – в сумішах, які призначені для перекачування по трубопроводам;

850 – в сумішах для бетонів з підвищеною водонепроникністю і в нерозшарованих високорухомих сумішах.

При цьому мінімальна витрата крупного заповнювача за насипним об'ємом повинна бути не менше 400 л/м^3 .



Крупний заповнювач для легкого бетону підбирається за густиною і міцністю. Залежно від виду дрібного заповнювача, міцності бетону на стиск і його марки за середньою густиною встановлюється максимальна марка крупного заповнювача за насипною густиною і міцністю (табл. 5.13...5.19).

Таблиця 5.13
Максимальні марки гравійних пористих заповнювачів за насипною густиною для конструкційно-теплоізоляційних бетонів

Характеристична міцність бетону на стиск*, МПа	Марка бетону за середньою густиною	Максимальна марка гравійного крупного заповнювача за насипною густиною залежно від виду піску				
		подібнений із гравію або зола ТЕС	природний пористий або гранульований шлак	случений перлітовий марок 200, 250 за насипною густиною	без піску (поризований)	щільний
3,5	D700	-	-	400	350	-
	D800	350	-	500	450	-
	D900	500	350	550	550	300
	D1000	600	500	600	600	500
	D1100	-	600	-	-	600
5	D800	300	-	400	350	-
	D900	450	300	500	500	-
	D1000	550	500	600	600	450
	D1100	600	600	-	-	550
	D1200	-	-	-	-	600
7,5	D800	-	-	350	-	-
	D900	400	-	450	400	-
	D1000	500	350	550	500	-
	D1100	550	500	600	600	450
	D1200	600	600	-	-	550
	D1300	-	-	-	-	600

*Характеристична (нормативна) міцність бетону має забезпеченість 95% для даного класу.



Максимальні марки щебених пористих заповнювачів за насипною густиною для конструкційно-теплоізоляційних бетонів

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка бетону за середньою густиною	Максимальна марка крупного щебневидного заповнювача за насипною густиною залежно від виду піску		
		подрібнений із щебеню (крім перлітовий)	спучений перлітовий марок 200, 350 за насипною густиною	зола ГЕС, гранульований шлак
3,5	D800	-	400	-
	D900	-	500	400
	D1000	400	600	500
	D1100	500	700	600
	D1200	600	800	700
	D1300	700	900	800
	D1400	800	-	900
	D1500	900	-	-
5	D900	-	400	-
	D1000	-	500	400
	D1100	400	600	500
	D1200	500	700	600
	D1300	600	800	700
	D1400	700	900	800
	D1500	800	-	900
	D1600	900	-	-
7,5	D1000	-	400	-
	D1100	-	500	400
	D1200	400	600	500
	D1300	500	700	600
	D1400	600	800	700
	D1500	700	900	800
	D1600	800	-	900
	D1700	900	-	-

Примітка. Наведені дані відповідають бетонам, які виготовлені з повітрявтягувальними добавками. При приготуванні бетонних сумішей без повітрявтягувальних добавок значення насипної густини крупного заповнювача зменшується для бетонів на піску того ж виду і золи ГЕС на 100 кг/м^3 , для бетонів на спученому перлітному піску – 50 кг/м^3 .



Таблиця 5.15

Максимальні марки крупних пористих заповнювачів за
насищеною густиною для конструкційних бетонів

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка бетону за середньою густиною	Максимальна марка крупного заповнювача за насиченою густиною			
		гравію		щебеню	
		пісок щільний	пісок пористий	пісок щільний	пісок пористий
10...20	D1200	-	500	-	-
	D1300	-	600	-	400
	D1400	500	700	-	500
	D1500	600	800	400	600
	D1600	700	-	500	700
	D1700	800	-	600	800
	D1800	900	-	700	900
25...40	D1400	-	600	-	-
	D1500	-	700	-	-
	D1600	600	800	-	-
	D1700	700	-	-	700
	D1800	800	-	600	800
	D1900	900	-	700	900
	D2000	-	-	800	1000

Примітка. Згідно ДСТУ Б В.2.7-176:2008 для легких бетонів встановлені наступні класи міцності на стиск (LC): 8/9; 12/13; 16/18; 20/22; 25/28; 30/33; 35/38; 40/44; 45/50 та більш високі – до 80/88 включно.

Таблиця 5.16

Марки крупних пористих заповнювачів за міцністю

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка заповнювача за міцністю	Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка заповнювача за міцністю
3,5	П 25	20	П 150
5	П 35	22,5	П 200
7,5	П 50	25	П 250
10	П 75	30	П 300
12,5	П 100	35	П 350
15	П 125	40	П 400

Примітка. Крупний заповнювач відносять до тієї чи іншої марки за результатами випробувань в циліндрі.



Насипна густина пористих пісків для конструкційно-теплоізоляційних бетонів повинна знаходитись в межах 200...1000 кг/м³. Для конструкційних бетонів насипна густина піску повинна бути не менше 600 кг/м³ для бетону класів 12,5...20 і не менше 800 кг/м³ для бетонів класів 25 і вище. Залежно від класів бетонів за міцністю рекомендується вибирати пісок із міцністю при здавлюванні в циліндрі не менше вказаної в табл. 5.17.

Таблиця 5.17

Міцність піску при здавлюванні в циліндрі

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Міцність піску при здавлюванні в циліндрі, МПа, не менше			
	керамзитового	керамзитового і шунгізитового, перлітового	шлакопемзового	аглопоритового
15	2,5	1,2	1,0	0,8
25	4,5	2,2	1,2	1,0
30	6,5	3,3	1,4	1,2
40	8,0	4,0	1,8	1,4

Конструкційно-теплоізоляційні бетони. Розрахунок номінальних складів конструкційно-теплоізоляційних бетонів послідовно включає орієнтовне визначення витрати крупного пористого заповнювача залежно від його марки за міцністю і виду дрібного заповнювача; витрати цементу з урахуванням класу бетону за міцністю і марки заповнювача за насипною густиною; витрати дрібного заповнювача і води.

Витрата крупного заповнювача встановлюється (табл. 5.18) за умови максимального насичення ним легкого бетону.

Для визначення витрати цементу використовують рекомендації табл. 5.19, 5.20.

Витрату дрібного заповнювача в кг/м³ розраховують за формулою:

$$П = \rho_{\delta} - 1,15Ц - K, \quad (5.19)$$

де ρ_{δ} – заданий середній рівень густини бетону в сухому стані, кг/м³;

$Ц$ – витрата цементу, кг/м³;



K – витрата крупного заповнювача, $\text{кг}/\text{м}^3$, ($K=V_k\rho_k$, де V_k – об'єм крупного заповнювача, $\text{м}^3/\text{м}^3$, (табл. 5.18),
 ρ_k – його густина $\text{кг}/\text{м}^3$).

Таблиця 5.18

Орієнтовна витрата крупного заповнювача в конструкційно-теплоізоляційному бетоні

Фракція заповнювача, мм	Витрата крупного заповнювача, $\text{м}^3/\text{м}^3$, залежно від його марки за міцністю та виду дрібного заповнювача			
	П 75 і менше		Більше П 75	
	пісок пористий	зола ТЕС або щільний пісок	пісок пористий	зола ТЕС або щільний пісок
5-10 і 10-20	1,05-1,1	1,1-1,2	1,0-1,05	1,05-1,15
5-20	1,0-1,05	1,05-1,15	0,95-1,0	1,0-1,10

Примітка. Приведені в таблиці значення передбачають застосування при приготуванні бетонної суміші повітрявтягувальних добавок. При відсутності добавок для отримання щільної структури бетону витрата крупного заповнювача зменшується на 5-10%. Для поризованих безпіщаних бетонів витрату крупного заповнювача приймають такою ж, як в бетонах на золі ТЕС або щільному піску.

Таблиця 5.19

Орієнтовні витрати цементу для легких бетонів на гравійних заповнювачах

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка заповнювача за насипною густиною	Витрата цементу марки 400, $\text{кг}/\text{м}^3$, залежно від дрібного заповнювача					без піску (поризований бетон)
		того ж виду, що і крупний заповнювач	спучений перлітовий марки 300	зола і золошлакова суміш	щільний		
3,5	300	230	250	210	240	-	
	350 - 400	220	230	200	230	260	
	450 - 500	210	220	200	220	245	
	550 - 600	200	210	200	210	230	
5	300	240	270	230	250	-	
	350 - 400	230	250	220	240	280	
	450 - 500	220	230	210	230	260	
	550 - 600	210	220	200	220	250	
7,5	350 - 400	250	300	230	270	-	
	450 - 500	240	270	220	250	-	
	550 - 600	230	250	210	230	-	



Таблиця 5.20

Орієнтовні витрати цементу для легких бетонів на щебневих
заповнювачах

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка заповнювача за насипною густиною	Витрата цементу марки 400, кг/м ³ , залежно від дрібного заповнювача		
		того ж виду, що і крупний заповнювач	спучений перлитовий марки 300	зола і золошлакова суміш
3,5	400	260	280	240
	500	240	260	230
	600	235	250	220
	700	225	240	210
	800	215	230	200
	900	205	220	200
5	400	280	320	255
	500	265	290	240
	600	255	270	230
	700	245	260	220
	800	235	250	210
	900	225	240	200
7,5	400	340	390	300
	500	310	360	280
	600	290	240	260
	700	270	210	240
	800	260	300	230
	900	250	290	220

Орієнтовна витрата води приймається за формулою (5.20) залежно від легкоукладальності бетонної суміші, крупності і водопоглинання крупного заповнювача, водопотреби і кількості дрібного заповнювача:

$$B = B_0 + B_1 + B_2, \quad (5.20)$$

де B_0 – початковий вміст води за табл. 5.23, л/м³;

B_1 – поправка на водопотребу дрібного заповнювача, л/м³;

B_2 – поправка на водопоглинання крупного пористого заповнювача (водопоглинання крупного пористого заповнювача прийнята в табл. 5.23 – 15%).

Водопотреба пористих пісків в 2...3 рази більше ніж щільних. Наприклад, водопотреба подрібненого керамзитового піску 13...16%, шлакопемзового – 16...18%. При середній



витраті піску 250 л/м^3 за абсолютним об'ємом зміна водопотреби піску на 1% буде відповідати зміні витрати води на $0,02 \text{ л/л}$ об'єму піску.

Поправку B_1 можна розрахувати за формулою:

$$B_1 = 0,025 \frac{\Pi}{\rho_n} (B_n - 7), \quad (5.21)$$

де B_n – водопотреба піску, %,

Π – витрата піску, кг/м^3 .

При відсутності даних по водопотребі піску можна збільшувати значення B_0 при застосуванні дрібного кварцового піску на 5 л/м^3 на кожні $0,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ його насипного об'єму, подрібненого керамзитового піску – $7 \dots 10 \text{ л/м}^3$, спученого перлітового піску – $12 \dots 15 \text{ л/м}^3$, аглопоритового – 15 л/м^3 , шлакопемзового – 10 л/м^3 , золи ТЕС – $15 \dots 20 \text{ л/м}^3$.

Правильність орієнтовного розрахунку складів легкого бетону перевіряють визначенням сумарного абсолютного об'єму його компонентів $\Sigma V_{абс}$.

$$\Sigma V_{абс} = \frac{\Pi}{\rho_{ц}} + \frac{\Pi}{\rho'_{з.н}} + \frac{K}{\rho'_{з.к}} + B, \quad (5.22)$$

де $\rho_{ц} \approx 3,1 \text{ кг/л}$;

$\rho'_{з.н}$ і $\rho'_{з.к}$ – густина зерен дрібного і крупного заповнювачів, визначена в цементного тісті.

При відсутності повітрявтягувальних добавок знайдене значення $\Sigma V_{абс}$ повинно знаходитись в межах $950 \dots 1050 \text{ л/м}^3$. Якщо воно виходить за вказані межі розрахунок повторюють, змінивши витрату крупного заповнювача (табл. 5.18) або передбачивши введення повітрявтягувальних, піноутворюючих добавок та ін.

Розрахунковий вміст втягнутого повітря, %:

$$V_{в.н} = 0,1(1000 - \Sigma V_{абс}). \quad (5.23)$$



Визначене за формулою (5.23) значення об'єму втягнутого повітря не повинно перевищувати 12% для бетонів, які містять дрібний заповнювач і мають у своєму складі повітрявтягувальну добавку і 20% для безпіщаних поризованих бетонів.

Легкі конструкційні бетони. Розрахунок складів конструкційних легких бетонів зазвичай виконують у наступній послідовності:

1) залежно від заданих показників міцності і середньої густини бетону, а також насипної густини та міцності крупного заповнювача з'ясовують можливість приготування бетону на щільному або пористому піску з врахуванням його міцності при здавлюванні в циліндрі (табл. 5.15.– 5.17);

2) відповідно до заданого середнього рівня міцності бетону на стиск визначають витрату цементу (C) залежно від його марки, а також виду піску, крупності і марки за міцністю крупного заповнювача, легкоукладальності бетонної суміші (табл. 5.21, 5.22);

3) залежно від заданої легкоукладальності бетонної суміші, найбільшої крупності і виду крупного заповнювача визначають початкову витрату води (B_0), (табл. 5.23);

4) залежно від заданого середнього рівня густини бетону та зерен крупного заповнювача, а також знайдених витрат цементу і води встановлюється об'ємна концентрація крупного заповнювача (φ) і його витрата (кг), (табл. 5.24);

5) за умови правила абсолютних об'ємів розраховують витрату піску;

6) уточнюють розрахункову витрату води з урахуванням поправок на водопотребу піску, водопоглинання крупного заповнювача, його об'ємну концентрацію і витрату цементу.

Об'ємну концентрацію крупного заповнювача можна знайти залежно від густини зерен в цементному тісті (табл.5.24), або об'єму міжзернових пустот крупного заповнювача (α) для бетонних сумішей із маркою за легкоукладальністю P1 за формулою:

$$\varphi = 0,85 - \alpha . \quad (5.24)$$



Для бетонних сумішей марок Р2 і більше значення φ зменшується на 0,02, Ж1 і Ж2 – збільшується на 0,02.

Таблиця 5.21

Орієнтовна витрата цементу, $\text{кг}/\text{м}^3$, при застосуванні пористих заповнювачів із крупністю до 20 мм і щільного піску для бетонних сумішей з Ж=5...8 с.

Міцність бетону, МПа	Рекомендована марка цементу	Марка пористого заповнювача за міцністю зерен						
		П75	П100	П125	П150	П200	П250	П300
15	400	300	280	260	240	230	220	210
20	400	-	340	320	300	230	260	250
25	400	-	-	390	360	330	310	290
30	500	-	-	-	420	390	360	330
35	500	-	-	-	-	450	410	380
40	500	-	-	-	-	-	480	450
50	500	-	-	-	-	-	570	540

Густину зерен крупного заповнювача ($\rho'_{з.к}$) в цементному тісті орієнтовно можна визначити за формулами:

-для пористого гравію:

$$\rho'_{з.к} = 1,05\rho_{з.к} \quad (5.25)$$

-для пористого щебеню:

$$\rho'_{з.к} = 1,1\rho_{з.к} \quad (5.26)$$

де $\rho_{з.к}$ – насипна густина зерен крупного заповнювача.



Таблиця 5.22

Коефіцієнти зміни витрати цементу при зміні його марки, виду піску, крупності заповнювача і легкоукладальності бетонної суміші

Характеристика матеріалів	Міцність бетону, МПа						
	15	20	25	30	35	40	50
Цемент марки:							
300	1,15	1,2	-	-	-	-	-
400	1	1	1	1,5	1,2	1,25	-
500	0,9	0,88	0,85	1	1	1,1	1,1
Пісок:							
щільний	1	1	1	1	1	1	1
пористий	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Найбільша крупність заповнювача, мм							
40	0,9	0,9	0,93	0,93	0,95	0,95	0,95
20	1	1	1	1	1	1	1
10	1,1	1,1	1,07	1,1	1,05	1,05	1,05
Жорсткість, с							
5...8	1	1	1	1	1	1	1
8...12	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
12...20	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Осадка конуса, см							
1...2	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
2...5	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
8...12	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25

Примітки. 1. Коефіцієнти зміни витрати цементу при застосуванні піску з $M_k=1,5\dots 2$ ($V_n=10\%$) – 1,05; $M_k=1\dots 1,5$ ($V_n>10\%$) – 1,1. 2. Для цементу І групи за ефективністю при пропарюванні – 0,93; III – 1,07.

Таблиця 5.23

Орієнтовна витрата води (V_0) для легкобетонної суміші

Осадка конуса, см	Жорсткість, с	Масимальна крупність, мм					
		пористого гравію			пористого щебеню		
		10	20	40	10	20	40
8...12	-	235	220	205	265	250	235
3...7	-	220	205	190	245	230	215
1...2	3...5	205	190	175	225	210	195
	5...8	195	180	165	215	200	185
	8...12	185	170	160	200	185	175
	12...20	175	160	150	190	175	165

Примітки. 1. Початкові витрати води приведені для бетонів з витратою цементу 450 кг/м^3 і менше, застосуванні щільного піску з $V_n=7\%$ при об'ємній концентрації крупного заповнювача $\phi=0,37$ і водопоглинанні 15%. 2. Бетонні суміші марок ПЗ і П4 виготовляють із пластифікуючими добавками.



Значення φ за табл. 5.24 не повинно перевищувати більш ніж на 0,05 оптимальну величину, що розраховується за формулою (5.24). Якщо ця умова не забезпечується, частину щільного піску замінюють пористим, золошлаковою сумішшю або золою. Для конструктивного бетону міцністю 15...20 МПа рекомендується також при застосуванні щільного піску введення повітровтягувальних добавок, які залучають 3...6% повітря і знижують значення φ на 0,03...0,06.

Таблиця 5.24

Об'ємна концентрація крупного пористого заповнювача (φ) в бетонній суміші

Середня густина бетону в сухому стані, кг/м ³	Об'ємна концентрація заповнювача φ з густиною зерен в цементному тісті, кг/л						
	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
1300	0,47	0,51	0,54	-	-	-	-
1400	0,43	0,47	0,51	0,54	-	-	-
1500	0,39	0,43	0,47	0,51	-	-	-
1600	0,33	0,37	0,42	0,46	0,51	-	-
1700	-	0,29	0,36	0,41	0,46	0,51	-
1800	-	-	-	0,32	0,4	0,46	0,51
1900	-	-	-	-	0,3	0,38	0,46
2000	-	-	-	-	-	-	0,37

Примітки: 1. Приведені значення справедливі для бетонів із витратою цементу $C=400$ кг/м³, початковим водовмістом $B_0=200$ л/м³, водопот-ребом піску $B_n - 8\%$. 2. При зміні витрати цементу на ± 100 кг/м³ φ відповідно змінюється на 0,01 – 0,02, а при зміні C на ± 200 кг/м³ – на 0,03 – 0,05. 3. При збільшенні B_0 на кожні 20 л/м³ φ зменшується на 0,02, при зменшенні B_0 на кожні 20 л/м³ φ збільшується на 0,02. 4. При зменшенні або збільшенні B_n на 2% φ відповідно збільшується або зменшується на 0,01.

Витрату крупного пористого заповнювача, кг/м³, за масою і насипному об'єму визначають за формулами:

$$K = 1000\varphi \cdot \rho_k; \quad (5.27)$$

$$V_k = \frac{K}{\rho_k^H}, \quad (5.28)$$

де ρ_k і ρ_k^H – відповідно дійсна густина і насипна густина крупного пористого заповнювача.



Витрату піску, $\text{кг}/\text{м}^3$, залежно від середньої густини бетону, витрати цементу і крупного заповнювача визначають за формулою:

$$P = \rho_{\bar{\sigma}} - 1,15C - K. \quad (5.29)$$

Загальну водопотребу бетонної суміші знаходять додаючи до початкової витрати води (B_0) за табл. 5.23 поправки на водопотребу піску (B_1), підвищений вміст цементу (B_2) і неоптимальну об'ємну концентрацію крупного заповнювача (B_3). При можливості вводять і інші поправки, що враховують, наприклад, водопоглинання заповнювачів та ін.

Поправка B_1 на водопотребу пористого піску (B_n) знаходиться за формулою (5.21).

Поправка на підвищену витрату цементу ($C > 450 \text{ кг}/\text{м}^3$):

$$B_2 = 0,15(C - 450). \quad (5.30)$$

Поправка на неоптимальну з умови водопотреби суміші об'ємну концентрацію крупного заповнювача:

$$B_3 = 2000(\varphi - 0,37)^2. \quad (5.31)$$

Розрахунок складів конструкційних легких бетонів методом "приведеного C/V ". Традиційна методика проектування складів конструкційних легких бетонів, що викладена вище, ґрунтується на призначенні орієнтовної витрати цементу й об'ємної концентрації пористого заповнювача на основі довідкових емпіричних даних, що враховують міцність і густину бетону, рухомість бетонної суміші, густину та міцність заповнювачів. З цією метою можуть бути використані як табличні та графічні дані, так і відповідні рівняння регресії.

Параметром суміші, однозначно пов'язаним з міцністю, для легких бетонів може бути "*приведене C/V* " визначене за формулою(4.38) .



В "приведеному Ц/В", $(\text{Ц/В})_{\text{пр}}$, вплив об'єму пор, утворених заповнювачем і втягнутим повітрям, "приводиться" до впливу еквівалентної кількості води в складі бетонної суміші.

"Приведене Ц/В" є більш універсальним параметром ніж Ц/В і трансформується в останнє згідно формули (5.6).

При врахуванні пор заповнювача і втягнутого повітря в бетонній суміші фізично обумовлена однозначна залежність міцності легких бетонів від "приведеного Ц/В" (*правило "приведеного Ц/В"*), яку можна покласти в основу розрахунково-експериментального методу проектування їхніх складів.

Міцність конструкційних легких бетонів пов'язана з $(\text{Ц/В})_{\text{пр}}$ лінійною залежністю, (ф-ла 4.78, табл. 5.25)

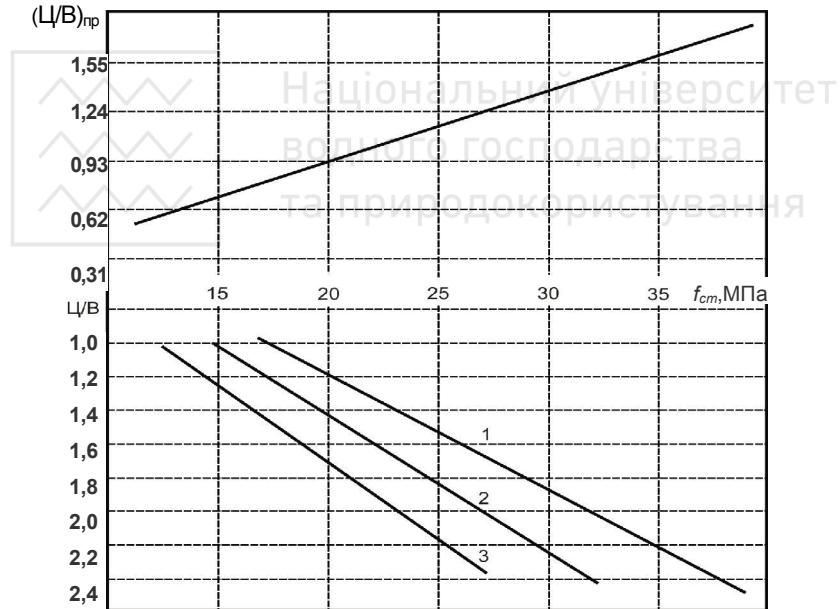


Рис. 5.4. Залежність міцності конструктивних керамзитобетонів від Ц/В і $(\text{Ц/В})_{\text{пр}}$ 1 – пористість керамзиту 0,4; 2 – 0,55; 3 – 0,7

Лінійна залежність міцності легких бетонів від приведенного Ц/В зберігається в області т.зв. ефективних складів, коли крупний заповнювач працює разом з розчиною складовою.



З формули (5.32) можна знайти витрату цементу при відомих значеннях необхідної витрати води (B), об'єму пористого заповнювача ($\Pi_3 V_3$), втягнутого повітря ($V_{пв}$), вмісту мінеральної добавки (D) і коефіцієнту її цементуючої ефективності ($K_{ц.е}$):

$$Ц = \frac{f_{cm} \cdot (B + (\Pi_3 V_3 + V_{пв}))}{AR_y} - K_{ц.е} D, \quad (5.32)$$

де f_{cm} – необхідна міцність бетону на стиск, МПа;
 R_y – активність цементу, МПа.

Таблиця 5.25

Експериментальні і розрахункові значення
міцності керамзитобетонів

Проектна міцність бетону МПа	Середня густина бетону, кг/м ³	Витрата матеріалів, кг/м ³			Об'єм втягнутого і залишкового повітря, %	Експериментальні значення міцності бетону, МПа
		Ц	К	П		
15	1500	224	$\frac{767}{800}$	479	3,2	15,1
15	1600	243	$\frac{440}{600}$	882	2,8	14,9
20	1500	369	$\frac{380}{500}$	691	2,7	19,8
20	1600	289	$\frac{708}{800}$	563	2,3	19,8
30	1600	477	$\frac{572}{700}$	477	2,1	29,4
30	1800	392	$\frac{520}{800}$	835	1,8	30,1

Примітка. В знаменнику для керамзиту (К) зазначена марка за насипною густиною.

Пористість крупного заповнювача, якщо він представлений керамзитовим гравієм, можна знайти за формулою:

$$P_3 = 1 - \frac{1,8 \cdot \rho_K^H}{\rho}, \quad (5.33)$$

де ρ_K^H – насипна густина керамзитового гравію;
 ρ – дійсна густина керамзиту.



Об'ємну концентрацію крупного пористого заповнювача в легкому бетоні (φ) можна знайти за допомогою формули, що враховує коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином (K_p):

$$\varphi = 1 - P_{\kappa}^{M3} \cdot K_p, \quad (5.34)$$

де P_{κ}^{M3} – об'єм міжзернових пустот крупного заповнювача.

Витрату крупного пористого заповнювача можна знайти з виразів:

об'ємну:

$$V_{\kappa} = 1000 \cdot \varphi; \quad (5.35)$$

масову:

$$K = 1,89\varphi \cdot \rho_{\kappa}^H. \quad (5.36)$$

В табл. 5.26 наведені значення K_p для конструктивних керамзитобетонів, отримані обробкою довідкових даних.

Таблиця 5.26

Значення K_p для конструктивних керамзитобетонів

ρ_{κ}^H , кг/м ³	Густина бетону ρ_b , кг/м ³				
	1400	1500	1600	1700	1800
400	1,25	1,33	1,45	-	-
500	1,18	1,25	1,36	1,50	-
600	1,10	1,19	1,28	1,39	1,54
700	-	-	1,20	1,29	1,45
800	-	-	-	1,21	1,33
900	-	-	-	-	1,22

Примітка. Значення K_p приведені для керамзитобетонних сумішей з ОК=5...9 см. Для сумішей з ОК=10...15 см – значення K_p збільшуються на 0,05...0,15, з ОК=15...20 см на 0,15...0,2 в залежності від середньої густини бетону. Для жорстких бетонних сумішей K_p зменшується в залежності від значень жорсткості і середньої густини бетону.

Вибір крупного пористого заповнювача здійснюється на основі емпіричних даних, що зв'язують його насипну густину (ρ_{κ}^H) з густиною (ρ_b) і міцністю бетону (f_{cm}).

Мінімально можлива насипна густина крупного пористого заповнювача (ρ_{κ}^H) визначається з умови досягнення заданої міцності бетону в зоні ефективних складів. Статистична обробка



відомих експериментальних даних для керамзитобетону показує можливість використання рівняння зв'язку:

$$R_{\kappa} = 0,008 \rho_{\kappa}^{\prime\prime} - 1,88, \quad (5.37)$$

де R_{κ} і $\rho_{\kappa}^{\prime\prime}$ – відповідно міцність в МПа і насипна густина керамзитового гравію в $\text{кг}/\text{м}^3$.

Максимально можлива густина крупного пористого заповнювача при $\varphi = \text{const}$ лімітується необхідною середньою густиною бетону ($\rho_{\bar{\sigma}}$) і густиною його розчинової складової (ρ_p). Вона може бути знайдена з рівняння:

$$\rho_{\bar{\sigma}} = \rho'_{\kappa} \varphi + \rho_p (1 - \varphi) - B_{\text{вип}}, \quad (5.38)$$

де ρ'_{κ} і ρ_p – відповідно густина зерен крупного заповнювача в цементному тісті і густина розчину;

$B_{\text{вип}}$ – маса води, що випаровується і утворює додатковий об'єм пор.

Величину $B_{\text{вип}}$ можна знайти, знаючи загальний водовміст бетонної суміші і її частину, що хімічно зв'язується з цементом:

$$B_{\text{вип}} \approx B - 0,15Ц. \quad (5.39)$$

З формули (5.38) максимально можлива густина крупного заповнювача:

$$\rho'_{\kappa} = \frac{\rho_{\bar{\sigma}} - \rho_p (1 - \varphi) + B_{\text{вип}}}{\varphi}. \quad (5.40)$$

Густина зерен крупного заповнювача в цементному тісті (ρ'_{κ}) і насипна густина ($\rho_{\kappa}^{\prime\prime}$) пов'язані залежністю:

$$\rho'_{\kappa} \approx 1,05 \frac{\rho_{\kappa}^{\prime\prime}}{1 - \Pi_{\kappa}^{\text{МЗ}}}, \quad (5.41)$$

де $\Pi_{\kappa}^{\text{МЗ}}$ – міжзернова пористість крупного заповнювача.

Для керамзитового гравію при $\Pi_{\kappa}^{\text{МЗ}} = 0,43$, $\rho'_{\kappa} \approx 1,89 \rho_{\kappa}^{\prime\prime}$.



Орієнтовно максимально можливу насипну густину крупного заповнювача можна знайти з нормативних і довідкових даних. Відомо, зокрема, що для щільного легкого бетону максимальне відношення ρ_k^H/ρ_b , що рекомендується при ρ_b до $800 \text{ кг/м}^3 - 0,40$; $800 \dots 1100 \text{ кг/м}^3 - 0,45$; $1200 \dots 1400 \text{ кг/м}^3 - 0,50$; $1400 \dots 1800 \text{ кг/м}^3 - 0,55$.

Вид піску, що характеризується його густиною (ρ_n), залежить від необхідної густини розчинової складової, а остання від необхідної густини бетону. Номограми, що дозволяють знайти ρ_n і встановити необхідну середню густину розчину приведені на рис. 5.5, 5.6.

Номограма (рис. 5.5) отримана обробкою відомих довідкових даних.

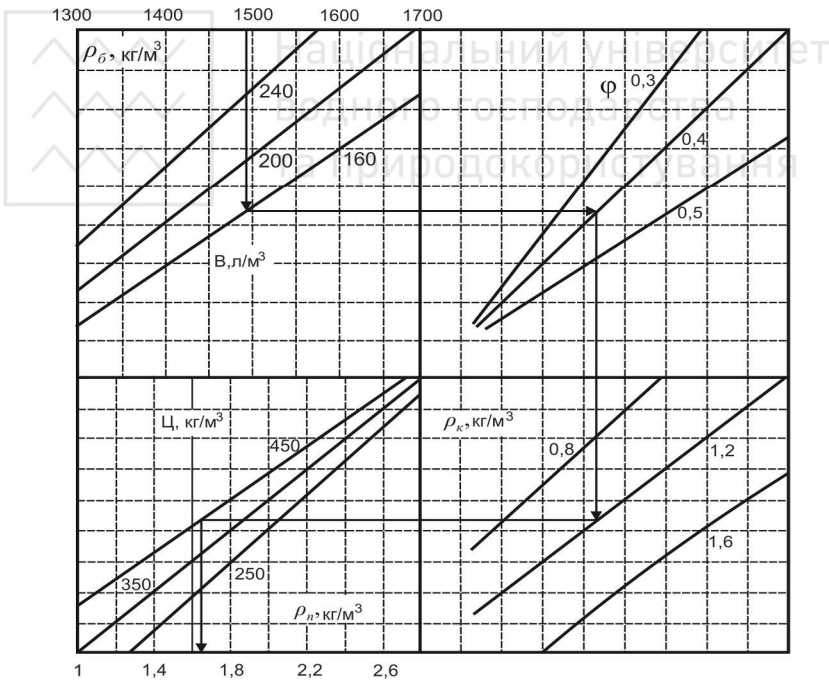


Рис. 5.5. Номограма для визначення необхідної густини піску ρ_n залежно від ρ_b , витрат води (B), цементу (C), параметра φ і ρ_k



Для отримання номограми (рис. 5.6) використане рівняння

$$\rho_p = \frac{1,15 + \Pi / \text{Ц}}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{\Pi / \text{Ц}}{\rho_n} + B / \text{Ц}}, \quad (5.42)$$

де ρ_c – густина цементу;
 $\Pi / \text{Ц}$ і $B / \text{Ц}$ – відповідно піщано-цементне і водоцементне
відношення.

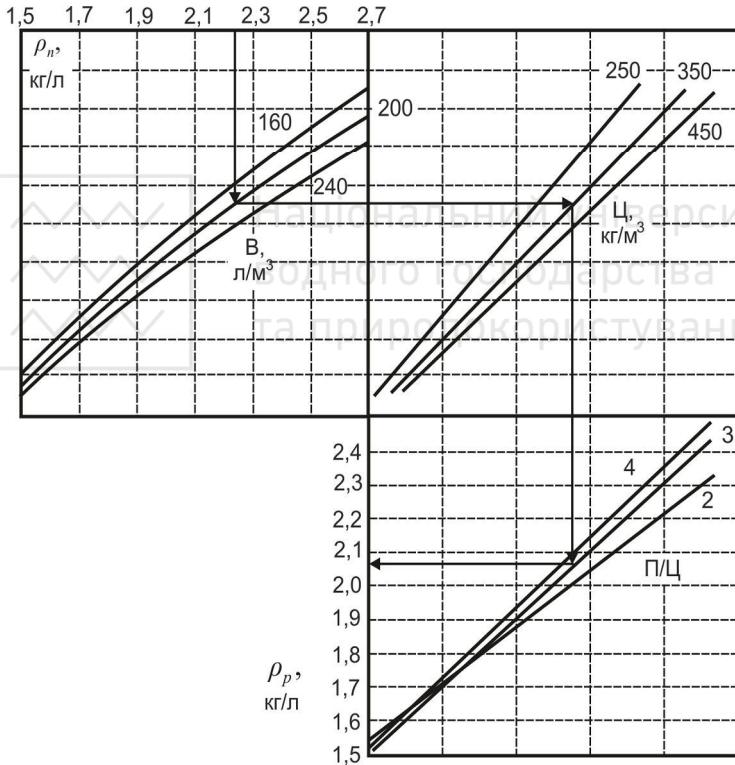


Рис. 5.6. Номограма для визначення необхідної густини розчину ρ_p в залежності від ρ_n , витрат води, цементу і співвідношення $\Pi / \text{Ц}$



З (5.42) при $\rho_u=3,1 \text{ г/см}^3$ впливає, що максимально допустима густина зерен піску:

$$\rho_n = \frac{\rho_p \Pi / \text{Ц}}{1,15 + \Pi / \text{Ц} - \rho_p (0,32 + B / \text{Ц})}. \quad (5.43)$$

Густина розчинової складової легкого бетону може бути зменшена її поризацією за рахунок введення повітрявтягуючої добавки. Необхідний об'єм повітря (V_{ns}) у % для доведення розчину з густиною ρ_p до ρ'_p знаходиться з умови:

$$V_{ns} = 100 - \frac{100\rho'_p}{\rho_p}. \quad (5.44)$$

Перехід від V_{ns} до необхідного вмісту повітрявтягуючої добавки виконується за допомогою відповідних емпіричних залежностей.

Для бетонів на щільному піску витрата останнього знаходиться з умови абсолютних об'ємів (5.19) після визначення з рівняння (5.32) витрати цементу.

З урахуванням виду матеріалів, що використовують, і заданого показника легкоукладальності призначається витрата води. Статистичною обробкою відомих довідкових даних отримані базові рівняння регресії для визначення витрати води в л/м³ для бетону на керамзитовому гравії і кварцовому піску:

$$B_0^{OK} = 2,33OK - 0,04\rho_k^H + 230, \quad (5.45)$$

$$B_0^{\mathcal{K}} = 258 - 21,87 \ln(\mathcal{K}) - 0,04\rho_k^H, \quad (5.46)$$

де OK і \mathcal{K} – відповідно рухомість (см) і жорсткість (с) бетонної суміші.

Базові значення витрати води уточнюються із урахуванням крупності крупного і дрібного заповнювачів, виду цементу, добавок та ін.

При застосуванні поряд зі щільним (Π) пористого піску ($\Pi_{пор}$) для визначення їх вмісту в бетонній суміші при певних значеннях



витрат цементу, початкового вмісту води, об'ємної концентрації крупного заповнювача необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$\Pi / \rho_n + \Pi_{нор} / \rho_{нор.n} + B_0 = 1000(1 - \varphi) + \text{Ц} / \rho_{\text{ц}}; \quad (5.47)$$

$$\Pi + \Pi_{нор} = \rho_b - 1,15\text{Ц} - 1000\varphi\rho'_{\text{к}} \quad (5.48)$$

Загальну витрату цементу знаходять за наступним виразом:

$$\text{Ц}' = \text{Ц} \cdot K_{\text{Ц}} \cdot K_{\text{ОК}(Ж)}, \quad (5.49)$$

де Ц – початкова витрата цементу, визначена з формули (5.32).

Поправку вводять на активність цементу, при використанні цементу з активністю, відмінною від $R_{\text{ц}}=40$ МПа (для $R_{\text{ц}}=40$ МПа $K_{\text{ц}}=1$). Для $R_{\text{ц}}=50$ $K_{\text{ц}}=0,89$; $R_{\text{ц}}=30$ – $K_{\text{ц}}=1,17$;

$K_{\text{ОК}(ж)}$ – поправка на легкоукладальність суміші:

- для пластичних сумішей:

$$K_{\text{ОК}} = (0,0164 \cdot \text{ОК}) + 1,054; \quad (5.50)$$

- для жорстких сумішей:

$$K_{\text{Ж}} = 1,038 - 0,094 \cdot \text{Ж}. \quad (5.51)$$

Розрахунок складів конструкційного керамзитобетону методом “приведеного Ц/В” може виконуватися за алгоритмом, схема якого наведена на рис. 5.7.

Даний алгоритм включає в себе послідовне визначення водопотреби бетонної суміші для досягнення необхідних значень рухомості або жорсткості, знаходження коефіцієнта розсунення зерен крупного пористого заповнювача цементно-піщаним розчином, розрахунок об'ємної концентрації і витрати керамзиту, витрат цементу і піску.

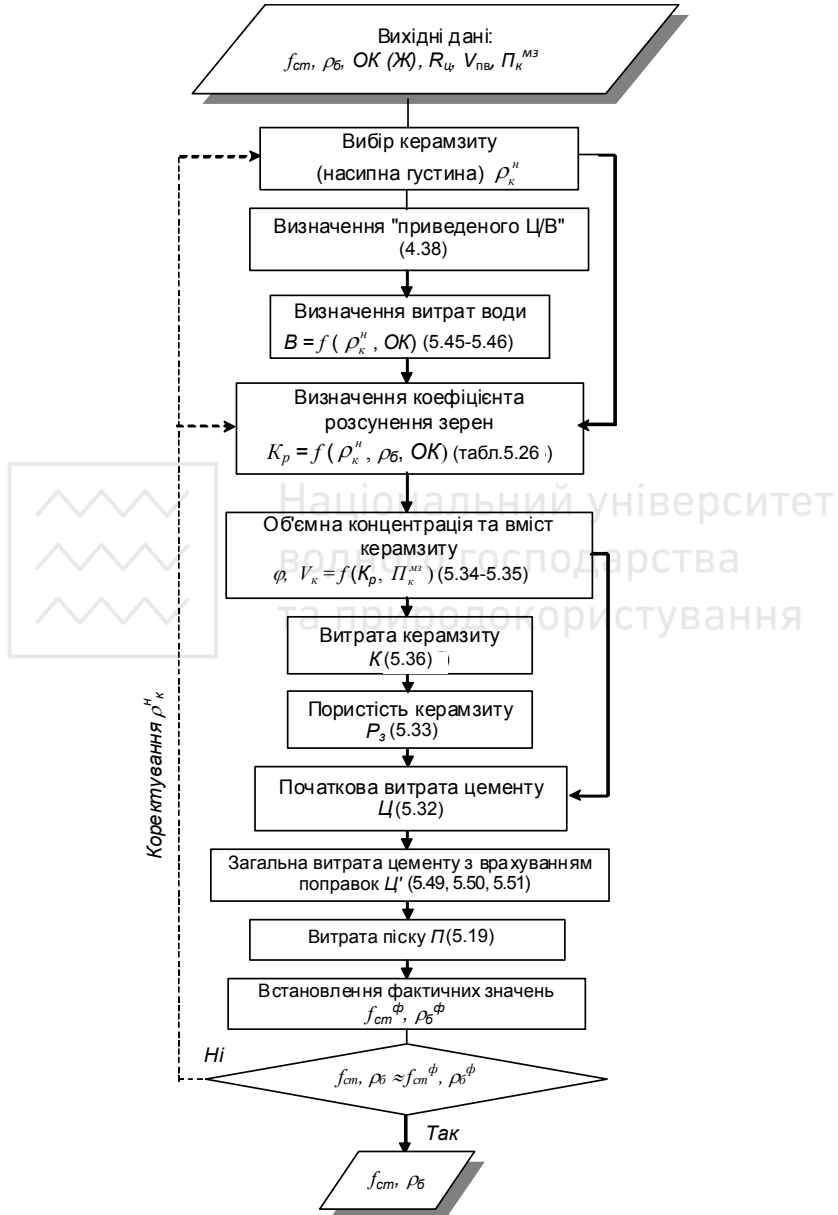


Рис. 5.7. Схема алгоритму розрахунку складу конструкційного керамзитобетону методом "приведеного Ц/В"



Полістиролбетон. Полістиролбетон можна віднести до перспективних будівельних матеріалів, які характеризуються рядом переваг: відносно високим коефіцієнтом конструктивної якості, доброю оброблюваністю, здатність зберігати сталеву арматуру від корозії та ін.. Виходячи з правила «приведеного Ц/В» і абсолютних об'ємів можна запропонувати алгоритм (рис. 5.8) розрахунку полістиролбетону з заданими міцністю та густиною.

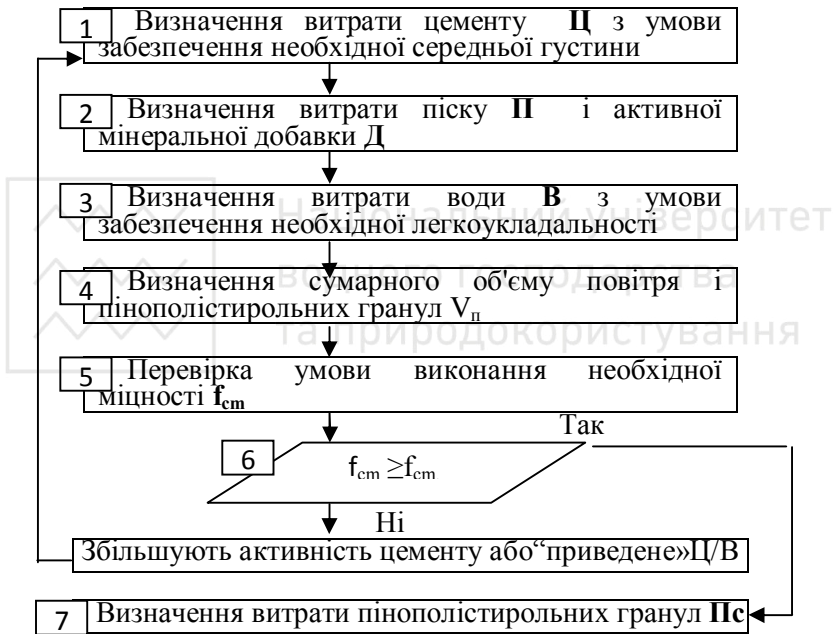


Рис.5.8. Алгоритм розрахунку полістиролбетону з заданими міцністю та густиною.

Нижче наведено методику розрахункового визначення складу полістиролбетону.

1. Визначаємо витрату цементу з умови заданої густини бетону.

Запишемо рівняння густини бетону:



$$\rho_o = 1,15Ц + П + Д + Пс = 1,15Ц + C_nЦ + C_\delta Ц + C_{Пс}Ц = Ц(1,15 + C_n + C_\delta + C_{Пс}) \quad (5.52)$$

де $П$ – витрата піску кг на 1 м³ бетону;

$C_n = П/Ц$ – співвідношення «пісок:цемент» за масою;

$C_\delta = Д/Ц$ – співвідношення «активна мінеральна добавка:цемент» за масою;

$C_{Пс} = Пс/Ц$ – співвідношення «пінополістирольні гранули:цемент» за масою.

Оскільки витрата пінополістирольних гранул складає 3...5% від маси цементу, то на стадії розрахунку складу можна прийняти $C_{Пс} \approx Пс/Ц \approx 0$.

Тоді витрата цементу з умови забезпечення необхідної густини:



$$Ц = \frac{\rho_o}{1,15 + C_n + C_\delta} \quad (5.53)$$

На стадії проектування складів значення C_n для теплоізоляційного бетону можна приймати в межах 0,25...0,5, для конструкційно-теплоізоляційного $C_n = 0,5...1,5$ з урахуванням заданих вимог до полістиролбетону. Коефіцієнт $C_\delta = 0,25...0,5$ для меленого доменного шлаку і $C_\delta = 0,5...1$ для золи винесення.

2. Визначасмо витрату піску і активної мінеральної добавки:

$$П = C_n Ц, \quad (5.54)$$

$$Д = C_\delta Ц. \quad (5.55)$$

3. Призначасмо за емпіричними даними витрату води для досягнення необхідної рухомості полістиролбетонної суміші. Можливе зменшення водопотреби при застосуванні добавок пластифікаторів в середньому складає 20...60 л/м³.



4. Визначаємо сумарний об'єм у бетоні пінополістирольних гранул і повітря методом абсолютних об'ємів.

$$V_{nc} + V_{ne} = 1000 - (Ц + П + Д) \quad (5.56)$$

5. Перевіряємо можливість досягнення необхідної міцності бетону за залежністю:

$$f_{cm} = pA_i R_u \left(\frac{V_u + K_{ц.е.} \cdot V_d}{V_г + V_{н.г}} + b \right), \quad (5.57)$$

де pA_i – мультиплікативний коефіцієнт, який враховує якість вихідних матеріалів, легкоукладальність суміші, вид і концентрацію добавок та ін.;

R_u – активність цементу, МПа;

V_u – витрата цементу на 1 м³ бетону, л;

$K_{ц.е.}$ – коефіцієнт цементуючої ефективності або «цементний еквівалент» активної мінеральної добавки;

D – витрата активної мінеральної добавки на 1 м³ бетону, л;

$V_г$ – витрата води на 1 м³ бетону, л;

V_{ne} – об'єм повітря залученого в бетонну суміш в т.ч. пористими заповнювачами.

Для розрахунку міцності полістиролбетону можна орієнтовно прийняти:

$$V_{ne} = V_{nc} + V_{з.н} + V_{г.н}, \quad (5.58)$$

де V_{nc} – об'єм пінополістирольних гранул, л;

$V_{г.н}$ – об'єм повітря, яке вводиться завдяки повітрятягуючої добавки або технічної піни,

$V_{з.н}$ – об'єм залишкового повітря.

Виходячи із метода абсолютних об'ємів, з достатньою точністю можна вважати, що

$$V_{ne} = 1000 - (Ц / \rho_u + Д / \rho_d + П / \rho_n + V_г), \quad (5.59)$$



де $\rho_{ц}$, $\rho_{д}$, $\rho_{п}$ – дійсна густина цементу, активної мінеральної добавки і піску відповідно.

Мультиплікативний коефіцієнт ρA_i у формулі (5.57) можна записати у вигляді:

$$\rho A_i = 0,5 A_1 A_2 A_3, \quad (5.60)$$

де множник A_1 залежить від діаметра полістирольних гранул, A_2 – враховує наявність або відсутність піску у складі полістиролбетону, A_3 – вплив хімічних добавок.

У міру накопичення експериментальних даних у мультиплікативний коефіцієнт ρA_i можна вводити і інші множники, які враховують вплив технологічних факторів, суттєво змінюючих міцність бетону при постійних значеннях активності цементу і “приведеного Ц/В” (наприклад добавок прискорювачів тверднення та ін.).

Статистична обробка результатів виконаних досліджень дозволила прийняти $A_1 = d^{-0.2}$, де d – середній діаметр гранул полістиролу, мм. Коефіцієнт A_2 при наявності у складі полістиролбетону кварцового піску можна прийняти рівним 1,19, при його відсутності $A_2=1$.

Середню густину легкого бетону можна описати відомою залежністю:

$$\rho_o = 1,15Ц + 3, \quad (5.61)$$

де 3 – сумарна витрата заповнювачів та активних наповнювачів на 1 м^3 бетону.

Співвідношення густини і міцності полістиролбетону залежить від параметрів його складу (табл. 5.27).

6. Перевіряємо можливість досягнення необхідної міцності за залежністю (5.57). Значення коефіцієнта “ e ” для найбільш поширених складів полістиролбетону можна прийняти “-0,05”.

Якщо умова міцності виконується, тобто розрахункове значення міцності полістиролбетону не менше нормованого, то можна переходити до наступного кроку. При суттєвому (більше 20%) перевищенні f_{cm} його нормованого значення



вживають заходів щодо економії цементу – замінюють його частину на пісок або активну мінеральну добавку, збільшивши коефіцієнти C_n і C_d у рівнянні (5.53).

У разі невиконання умови міцності (5.57) слід використовувати цемент з більш високою активністю або збільшити значення “приведеного цементно-водного відношення”, зменшивши вміст піску C_n або повністю замінивши його на активну мінеральну добавку.

Таблиця 5.27

Рекомендовані значення максимально можливої міцності полістиролбетону певної густини

Середня густина бетону, кг/м ³	Параметри складу					
	$C_d=C_n=0$	$C_d=0,5$ $C_n=0$	$C_d=0$ $C_n=1$	$C_d=0,5$ $C_n=0,5$	$C_d=0,5$ $C_n=1$	$C_d=0,5$ $C_n=1,5$
	Максимальна міцність полістиролбетону, МПа					
300	0,92	-	-	-	-	-
400	1,78	1,29	-	-	-	-
500	2,69	2,06	0,91	1,52	0,97	-
600	3,66	2,90	1,46	2,29	1,60	1,12
700	-	3,80	2,06	3,12	2,28	1,70
800	-	4,77	2,71	4,02	3,03	2,34
900	-	-	3,41	5,00	3,85	3,04
1000	-	-	4,19	6,08	4,74	3,81

7. Визначаємо витрату пінополістирольних гранул і повітрявтягуючої (піноутворюючої) добавки, якщо вона вводитьься:

-при дозуванні гранул за об’ємом (у насипному стані):

$$P_c^V = \frac{V_{nb} - V_{в.п} - V_{з.п.}}{1 - P_{nc}}, \quad (5.62)$$

де $V_{в.п}$ – об’єм втягнутого повітря (як правило $V_{в.п}$ становить 20...60 л),

$V_{з.п.}$ – об’єм залишкового повітря ($V_{з.п.}=10...20$ л),

P_{nc} – пористість полістирольних гранул у насипному стані.

- при дозуванні гранул за масою:

$$P_c^m = P_c^V \rho_{п,nc}, \quad (5.63)$$



$\rho_{н,пс}$ – насипна густина суміші пінополістирольних гранул.

Розрахункові склади полістиролбетону як і інших видів бетону підлягають експериментальному підтвердженню.

Крупнопористі бетони. Крупнопористі бетони відносяться до легких бетонів, головною особливістю яких є підвищений об'єм міжзернових порождин, що досягається відсутністю в їх складі дрібного заповнювача і обмеженим вмістом цементного тіста.

Орієнтовну витрату цементу при підборі складу крупнопористого бетону призначають залежно від його міцності, марки цементу та виду заповнювача (табл.5.28, 5.29).

Таблиця 5.28

Орієнтовні витрати портландцементу для крупнопористого бетону на щільних заповнювачах

Міцність бетону на стиск в 28 діб, МПа	Витрата портландцементу, кг/м ³ , марки					
	300		400		500	
	на гравії	на щебені	на гравії	на щебені	на гравії	на щебені
1,5	50	60	40	50	-	-
2,5	85	100	65	75	50	60
3,5	120	140	90	105	70	85
5,0	170	200	125	145	100	115
7,5	-	-	190	220	150	175
10	-	-	-	-	200	230

Таблиця 5.29

Орієнтовні витрати портландцементу для крупнопористого керамзитобетону

Міцність бетону на стиск, в 28 діб, МПа	Витрата портландцементу, кг/м ³ , при міцності керамзиту, МПа					
	0,5	1	2	3	4	5
0,5	150	75	40	-	-	-
1,0	300	150	75	50	-	-
1,5	-	225	115	75	60	-
2,5	-	-	190	125	95	75
3,5	-	-	270	175	135	105
5,0	-	-	-	250	190	150



Витрату крупного заповнювача K_p приймають залежно від його пустотності $\Pi_{кр}$:

при $\Pi_{кр} < 40\%$ $K_p = 1,05 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $\Pi_{кр} = 40\%$ $K_p = 1,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$,

$\Pi_{кр} = 50\%$ $K_p = 1,15 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $\Pi_{кр} = 60\%$ $K_p = 1,25 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Витрата води, $\text{л}/\text{м}^3$:

$$B = (НГ \cdot Ц + K_p \cdot W_{кр}) / 100, \quad (5.64)$$

де $НГ$ – нормальна густина цементного тіста, %, $W_{кр}$ – водопоглинання за масою крупного заповнювача за 30 хв, %.

Густина сухого бетону:

$$\rho_{\sigma} = 1,15Ц + K_p. \quad (5.65)$$

Ніздрюваті бетони. Розрахунок складу ніздрюватого бетону базується на двох рівняннях, що характеризують матеріальний баланс:

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{H_{к}}{\rho_{н}} + \frac{B}{\rho_{в}} + V_{пор} = 1000; \quad (5.66)$$

$$\rho_{\sigma} = 1,15Ц + H_{к}, \quad (5.67)$$

де $Ц$, $H_{к}$, B – відповідно витрати цементу, кремнеземистого наповнювача і води;

$\rho_{ц}$, $\rho_{н}$, $\rho_{в}$ – густина відповідних компонентів; ρ_{σ} – густина бетону;

$V_{пор}$ – об'єм пор за рахунок введення в суміш пороутворювача.

Орієнтовні значення співвідношень (C) маси кремнеземистого наповнювача до маси в'язучого приведені в табл. 5.30.

Відношення $C_{вцв}$ для вапняно-цементного в'язучого знаходять за формулою:

$$C_{вцв} = C_{ц}n + C_{в}(1 - n), \quad (5.68)$$

де $C_{ц}$ і $C_{в}$ – відношення маси кремнеземистого наповнювача відповідно до маси цементу і вапна (в розрахунку на 100% $\text{CaO} + \text{MgO}$);



n – частка цементу в змішаному в'язучому за масою ($n=0,35\dots0,7$).

Таблиця 5.30

Співвідношення між кремнеземистим компонентом і в'язучим

В'язуче	Значення С	
	для автоклавного бетону	для безавтоклавного бетону на золі-виносу
Цементне і цементно-вапняне	0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0	0,75; 1; 1,25
Вапняне	3; 3,5; 4; 4,5; 5,5	-
Вапняно-білігове	1; 1,25; 1,5; 2,0	-
Вапняно-шлакове	0,6; 0,8; 1,0	0,6; 0,8; 1,0
Високоосновне зольне	0,75; 1; 1,25	-
Шлако-лужне	0,1; 0,15; 0,2	-

З рівняння (5.67) отримаємо:

$$1,15C + C_u C = \rho_b \quad (5.69)$$

$$C = \frac{\rho_b}{1,15 + C_u} \quad (5.70)$$

Тверда фаза в ніздрюватобетонній суміші представлена сумішшю цементу або композиційного в'язучого і кремнеземистого наповнювача.

Вираз для розрахунку витрати води можна представити рівнянням:

$$B = \frac{B}{T}(C + H_k), \quad (5.71)$$

де B/T – водотверде відношення, яке орієнтовно приймається за табл. 5.31 і більш точно визначається експериментально за умови досягнення необхідної текучості бетонної суміші (табл. 5.32).



Таблиця 5.31

Орієнтовні значення В/Т

Середня густина ніздрюватого бетону, кг/м ³	В/Т
300	0,45
500	0,4
700	0,35

Таблиця 5.32

Текучість ніздрюватобетонної суміші

Середня густина бетону, кг/м ³	Діаметр розпливу суміші (за Суттардом), см		
	на цементному, вапняно-цементному, шлаколуужному в'язучому	на вапняному, вапняно-шлаковому в'язучому	на високоосновному зольному в'язучому
Литвева технологія			
300	38	30	-
400	34	25	25
500	30	23	23
600	26	21	21
700	22	19	20
800	18	17	18
Вібраційна технологія			
500	15	-	-
600	13	-	-
700	11	-	-
800	9	-	-

Рівняння (5.66) з врахуванням формули (5.71) можна привести приймаючи $\rho_s=1$ кг/л до виду:

$$C \left(\frac{1}{\rho_c} + \frac{C}{\rho_n} + \frac{(1+C)B}{T} \right) + V_{пор} = 1000 \quad (5.72)$$

і знайти об'єм пор в л :



$$V_{nop} = 1000 - Ц \left(\frac{1}{\rho_{ц}} + \frac{C}{\rho_{н.к}} + (1 + C)B / T \right). \quad (5.73)$$

Необхідна кількість порутворювача D :

- для газобетону, $\text{кг}/\text{м}^3$:

$$D = \frac{V_{nop}}{K_{в.г} \alpha}; \quad (5.74)$$

- для пінобетону, $\text{л}/\text{м}^3$:

$$D = \frac{V_{nop}}{K_{в.п} \alpha}, \quad (5.75)$$

де α – коефіцієнт, що враховує повноту використання газоутворювача – алюмінієвої пудри або водного розчину піноутворювача ($\alpha \approx 0,85$);

$K_{в.г}$ і $K_{в.п}$ – коефіцієнти виходу пор при введенні відповідно газо- або піноутворювача, ($K_{в.г} \approx 1390 \text{ л}/\text{кг}$; $K_{в.п} \approx 20 \text{ л}/\text{кг}$).

Приклади

5.12. Розрахувати склад конструкційно-теплоізоляційного керамзитобетону поризованої структури з необхідною міцністю 3,5 МПа, густиною в сухому стані $900 \text{ кг}/\text{м}^3$ із показником легкоукладальності бетонної суміші $OK=1 \dots 2 \text{ см}$.

Матеріали: портландцемент М400, керамзитовий гравій фракції 5...20 мм з насипною густиною $500 \text{ кг}/\text{м}^3$, густиною зерен в цементному тісті 0,9 $\text{кг}/\text{л}$; подрібнений керамзитовий пісок з насипною густиною $640 \text{ кг}/\text{м}^3$ і густиною зерен в цементному тісті 1,4 $\text{кг}/\text{л}$.

1. За даними табл. 5.13 визначаємо, що на даних матеріалах можна отримати керамзитобетон із заданою середньою густиною.



2. Орієнтовну витрату керамзитового гравію приймаємо (табл. 5.18) 1 м^3 на 1 м^3 бетону (500 кг/м^3).

3. Приблизна витрата цементу М400 складає (табл. 5.19) 210 кг/м^3 . Однак для армованих конструкцій з умови корозійної стійкості арматури витрату цементу приймаємо 220 кг/м^3 .

4. Витрату піску знайдемо за формулою (5.19):

$$П = 900 - (500 + 1,15 \cdot 220) = 147\text{ кг};$$

$$V_n = 147/640 = 230\text{ л.}$$

5. Витрата води з урахуванням рекомендацій табл. 5.23 і поправки на застосування подрібненого керамзитового піску складе:

$$B = 190 + 10 = 200\text{ л.}$$

6. Розраховуємо необхідну ступінь поризації (аерації) бетонної суміші:

$$V_{пор} = \frac{1000 - \left(\frac{220}{3,1} + \frac{147}{1,4} + \frac{500}{0,9} + 200 \right)}{10} = \frac{1000 - 932}{10} = 6,8\%.$$

5.13. Підібрати склад керамзитобетону з заданою міцністю 25 МПа , густиною в сухому стані 1700 кг/м^3 при рухомості бетонної суміші за осадкою конуса $ОК=3\dots 7\text{ см}$.

Матеріали: цемент М500; пісок щільний із $\rho_n=2,65\text{ кг/л}$ і водопотребою $6,5\%$; керамзитовий гравій двох фракцій $5\dots 10\text{ мм}$ і $10\dots 20\text{ мм}$ у співвідношенні $40:60\%$ з середньою густиною зерен в цементному тісті $\rho'_{з.к}=1,22\text{ кг/л}$ та маркою за міцністю зерен П250.

За своїми властивостями керамзитовий гравій задовольняє вимогам, необхідним для отримання заданих властивостей бетону (табл. 5.16).



1. За табл. 5.21 орієнтовна витрата цементу складає 310 кг/м^3 .
З урахуванням поправочних коефіцієнтів на цемент М500 – 0,85 і осадку конуса 3...7 см – 1,15, (табл. 5.22). Витрата цементу:

$$Ц = 310 \cdot 0,85 \cdot 1,15 = 305 \text{ кг/м}^3.$$

2. За табл. 5.23 початкова витрата води $V_0=205 \text{ л/м}^3$.

3. Об'ємна концентрація керамзиту (табл. 5.24) $\varphi=0,38$.
Витрата керамзиту за масою: $K=1000 \cdot 0,38 \cdot 1,22=465 \text{ кг/м}^3$.

4. Витрата піску (за формулою 5.29):

$$П = 1700 - 1,15 \cdot 305 - 465 = 885 \text{ кг/м}^3.$$

Загальна витрата води з урахуванням поправок на водопотребу піску (5.21) і об'ємну концентрацію крупного заповнювача (5.31):

$$B = 205 + 0,025 \cdot 885 / 2,65(65 - 7) + 2000(0,38 - 0,37)^2 = 221 \text{ л/м}^3.$$

Розрахунковий склад керамзитобетону:

$$Ц = 305 \text{ кг/м}^3, K = 465 \text{ кг/м}^3, П = 885 \text{ кг/м}^3, B = 221 \text{ л/м}^3.$$

5.14. *Запроектувати склад конструкційного керамзитобетону міцністю 25 МПа і густиною 1800 кг/м^3 на керамзитовому ґравії з насипною густиною $\rho_k^H = 700 \text{ кг/м}^3$ і кварцовому піску. Рухомість суміші ОК=5 см. Активність цементу $R_c=50 \text{ МПа}$. Міжзернова пористість керамзиту $\Pi_k^{M3} = 0,44$. Кількість втягнутого повітря в бетоні $V_{пв}=2\%$. Дійсна густина керамзиту: $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$. Об'ємне водопоглинання керамзиту $W_k^0 = 20\%$.*

1. Визначасмо необхідне “приведене Ц/В” для забезпечення заданої міцності бетону з формули (4.78):



$$Ц/B_{np} = \frac{25}{0,55 \cdot 50} = 0,9.$$

2. Визначаємо витрату води (ф-ла 5.45).

При $OK=5$ см і $\rho_n=700$ кг/м³: $B_{ок} = 2,33 \cdot 5 - 0,04 \cdot 700 + 230 = 214$ л.

3. Знаходимо значення коефіцієнта розсунення K_p . Для прийнятих значень густин бетону і заповнювача $K_p=1,45$ (табл. 5.26).

4. Розраховуємо об'ємну концентрацію й об'ємний вміст керамзиту в бетоні використовуючи формули (5.34, 5.35).

При міжзерновій пористості керамзиту $\Pi_k^{M3} = 0,44$:

$$\varphi = 1 - 0,44 \cdot 1,45 = 0,362.$$

Тоді об'ємний вміст керамзиту:

$$V_3 = 1000 \cdot 0,362 = 362 \text{ л.}$$

5. Знаходимо витрату керамзиту (ф-ла 5.36):

$$K = 1,89 \cdot 0,362 \cdot 700 = 479 \text{ кг.}$$

6. Знаходимо пористість керамзиту (ф-ла 5.33):

$$P_3 = 1 - \frac{1,8 \cdot 700}{2700} = 0,53.$$

7. Визначаємо початкову витрату цементу з рівняння “приведеного Ц/В” (5.32):

$$Ц = 0,91 \cdot (214 + (0,53 - 0,2) \cdot 362 + 20) = 322 \text{ кг.}$$

8. Розраховуємо поправки на:



- активність цементу, для $R_c=50$ МПа; $K_c=0,89$;
- для пластичних сумішей (ф-ла 5.50):

$$\Delta C = 0,0164 \cdot 5 + 1,054 = 1,136.$$

9. Загальну витрату цементу визначаємо за формулою (5.49):

$$C' = 322 \cdot 0,89 \cdot 1,136 = 326 \text{ кг.}$$

10. З формули (5.19) знаходимо витрати піску:

$$П = 1700 - 1,15 \cdot 326 - 479 = 846 \text{ кг.}$$

Розрахунковий склад конструктивного керамзитобетону:

$$C=322 \text{ кг/м}^3; B=214 \text{ кг/м}^3; K=479 \text{ кг/м}^3; П=846 \text{ кг/м}^3.$$

5.15. *Запроектувати конструкційно-теплоізоляційний полістиролбетон з середньою густиною у висушеному стані $\rho_0 \leq 800$ кг/м³ і міцністю $f_{cm} \geq 2,5$ МПа. В'яжуче – портландцемент з активністю 51 МПа, заповнювач – кварцовий пісок і пінополістирольні гранули з густиною 15 кг/м³ і пористістю у насипному стані 41%, відповідно, середнім діаметром 2,5 мм. Застосовується активна мінеральна добавка – мелений доменний шлак ($\rho_{ш}=2,7$ кг/л) з коефіцієнтом цементуючої ефективності $K_{ц,е}=0,33$ і повітрявтягуюча добавка СНП. Необхідний об'єм втягнутого повітря 40 л. Витрата води для досягнення необхідної рухомості 210 л/м³.*

1. Приймавши $C_{II}=1$, $C_D=0,5$ визначаємо витрату цементу за формулою (5.53):

$$C = \frac{800}{1,15 + 1 + 0,5} = 302 \text{ кг/м}^3.$$

2. Витрата піску $П=C_{II}C=1 \times 302=302$ кг/м³.



3. Витрата шлаку $D=C_0C=0,5 \times 302=151 \text{ кг/м}^3$.

4. Витрата води без застосування пластифікатора $B=210 \text{ л/м}^3$.

5. Сумарний вміст пінополістирольних гранул, втягнутого і залишкового повітря за формулою (5.59):

$$V_{n,в} = 1000 - (302/3,1 + 151/2,7 + 210) = 522,7 \text{ л/м}^3$$

6. Умова міцності за формулою (5.57) виконується:

$$f_{cm} = 0,5 \cdot 1,19 \cdot 2,5^{-0,2} \cdot 51 \cdot \left(\frac{302/3,1 + 0,33 \cdot 151/2,7}{210 + 522,7} - 0,05 \right) = 2,75 \text{ МПа} \geq 2,5 \text{ МПа}$$

7. Витрата пінополістирольних гранул у насипному стані (об'єм залишкового повітря приймаємо 15 л/м^3).

За формулою 5.62:

$$P_c^V = \frac{522,7 - 40 - 15}{1 - 0,41} \approx 793 \text{ л/м}^3.$$

Для забезпечення втягування 40 л повітря згідно рекомендаціям для добавки СНП вводимо її в кількості $0,02\%$ від маси цементу.

Розрахунковий склад 1 м^3 полістиролбетонної суміші: цемент -302 кг ; доменний шлак -151 кг ; пісок -302 кг ; пінополістирольні гранули $-0,793 \text{ м}^3$; вода -210 л/м^3 ; добавка СНП $-0,0002 \times 302 = 0,060 \text{ кг}$.

5.16. Розрахувати склад крупнопористого бетону з міцністю на стиск в 28 діб $7,5 \text{ МПа}$ та густиною 1800 кг/м^3 .

Матеріали: портландцемент $M400$ з нормальною густиною 27% , природний гравій з насипною густиною 1450 кг/м^3 , густиною зерен 2030 кг/м^3 та водопоглинанням $2,5\%$.

За табл. 5.28 орієнтовна витрата цементу 190 кг/м^3 .

Пустотність гравію:



$$P_{gp} = \frac{2,03 - 1,45}{2,03} 100 = 28,6\%$$

Витрату крупного заповнювача приймаємо: $K_p = 1,05 \text{ м}^3/\text{м}^3$
або $1,05 \times 1450 = 1522,5 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Витрата води за формулою (5.64):

$$B = (27 \cdot 190 + 1522 \cdot 2,5) / 100 = 89,35 \text{ л}$$

Густина сухого бетону (5.65): $1,15 \times 190 + 1522,5 = 1741 \text{ кг}/\text{м}^3$.

5.17. Розрахувати склад ніздрюватого бетону неавтоклавного тверднення з середньою густиною $500 \text{ кг}/\text{м}^3$ і введенням в якості кремнеземистого наповнювача меленого піску з $\rho_n = 2,65 \text{ кг}/\text{л}$. Визначити витрату газоутворювача.

1. Приймаємо співвідношення між кремнеземистим компонентом і в'язучим (табл. 5.30) $C=1$. За формулою (5.70) витрата цементу:

$$Ц = 500 / (1,15 + 1) = 232,5 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

2. Витрата кремнеземистого:

$$H_k = CЦ = 1 \cdot 232,5 = 232,5 \text{ кг}/\text{л}.$$

3. Водотверде відношення $B/T=0,4$ (табл. 5.31).

4. Витрата води за формулою (5.71):

$$B = 0,4 \cdot 232,5(1 + 1) = 186 \text{ л}/\text{м}^3.$$

5. Потрібний об'єм пор знайдемо виходячи з рівняння (5.73):

$$V_{пор} = 1000 - 232,5 \left(\frac{1}{3,1} + \frac{1}{2,65} + 0,4(1 + 1) \right) = 347,5 \text{ л}/\text{м}^3.$$



6. Необхідна кількість пороутворювача для газобетону (5.74), кг/м³:

$$D = \frac{347,5}{1390 \cdot 0,85} = 0,294.$$

Розрахунковий склад газобетону. кг/м³: Ц=232,5; H_к=235,5; В=186; Д=0,294,

Вправи

5.11. Легкий бетон з нормованою маркою по густині D800 мав фактичні наступні значення середньої густини в кг/м³: 730, 745, 751, 754, 760, 765, 758, 761, 755, 765. Визначити який повинен бути середній рівень густини бетону з врахуванням його однорідності.

5.12. Тонкостінна конструкція з бетону на пористому ґравії з максимальною крупністю 20 мм та водопоглинанням 15% повинна бетонуватися у вертикальному положенні. Яку необхідно призначити витрату води для нормального ущільнення бетону а) без введення пластифікуючої добавки б) з введенням пластифікуючої добавки, що має водоредукуючий ефект 12%.

5.13. Для полістиролбетонної суміші була отримана експериментально-статистична модель рухомості – показника занурення стандартного конусу, см.

$$y = 5,56 - 2,56x_1 + 1,11x_2 + 0,69x_3 + 0,36x_4 - 0,81x_1x_2 + 0,012x_1x_3 + 0,037x_1x_4 + 0,037x_2x_3 + 0,0125x_2x_4 - 0,8125x_3x_4 \quad (5.76)$$

де $x_1 = (Ц - 300)/100$; $x_2 = (В - 90)/10$;

$x_3 = (ПД - 0,25)/0,15$; $x_4 = (СП - 2,5)/1,5$.

У наведених вище формулах переходу від натуральних перемінних до кодових Ц – витрата цементу, кг/м³; В – витрата води, л/м³; ПД – повітрявтягуюча добавка, кг/м³; СП – витрата суперпластифікатору С-3, кг/м³.



За допомогою графічного аналізу визначити вплив кожного з факторів врахованих в моделі та ефектів їх взаємодії на рухомість полістиролбетонної суміші.

5.14. Для керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому отримані експериментально-статистичні моделі міцності бетону на стиск у віці 28 діб та його середній густині

$$\ln f_{cm}^{28} = 3,078 + 0,185x_1 + 0,091x_2 - 0,045x_3^2 + 0,055x_4 - 0,048x_1x_2 + 0,039x_2x_3, \quad (5.77)$$

$$\ln \rho = 7,258 + 0,036x_1 + 0,016x_2 + 0,088x_5 + 0,012x_1^2 - 0,018x_3^2 + 0,052x_4 + 0,005x_1x_2 - 0,007x_1x_3 - 0,005x_2x_3, \quad (5.78)$$

де $x_1 = (Ц - 300) / 50$; $x_2 = (З - 120) / 40$; $x_3 = (П - 350) / 100$;

$x_4 = (K - 650) / 150$.

У наведених вище формулах переходу від натуральних перемінних до кодованих Ц, З, П і К – відповідно витрати цементу, золи, піску та керамзиту, кг/м³.

За допомогою графічного аналізу визначити вплив кожного з факторів, врахованих в моделях на міцність та густину керамзитобетону.

5.15. За допомогою наведених вище експериментально-статистичних моделей визначити склади керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому міцністю 15...25 МПа з середньою густиною 1400...1700 кг/м³.

5.16. Вибрати необхідні матеріали та розрахувати склад конструктивно-теплоізоляційного бетону з міцністю на стиск 7,5 МПа та густиною 800 кг/м³, легкоукладальність бетонної суміші Р2. В бетонну суміш повітрявтягуючі добавки не вводяться.

5.17. Розрахувати необхідну ступінь поризації бетонної суміші для отримання легкого бетону з міцністю

5 МПа, густиною в сухому стані 800 кг/м³ з маркою по легкоукладальності Р3.

Вихідні матеріали: портландцемент М500, керамзитовий гравій крупністю до 20 мм з насипною густиною 500 кг/м³, густиною зерен в цементному тісті 0,95 кг/л, подрібнений



керамзитовий пісок з насипною густиною 700 кг/м^3 і густиною зерен в цементному тісті $1,5 \text{ кг/л}$.

5.18. Розрахувати склад конструкційного легкого бетону з міцністю на стиск 30 МПа , густиною в сухому стані 1600 кг/м^3 при рухомості бетонної суміші Р1.

Вихідні матеріали: портландцемент М500, пісок пористий $\rho_n=1,9 \text{ кг/м}^3$, з водопотребою 13% , керамзитовий гравій крупністю до 20 мм з середньою густиною зерен в цементному тісті $1,2 \text{ кг/л}$ та маркою за міцністю П300.

5.19. Запроектувати методом «приведеного В/Ц» склад конструкційного керамзитобетону міцністю 30 МПа і густиною 1600 кг/м^3 на керамзитовому гравію з насипною густиною $\rho_k=800 \text{ кг/м}^3$ і кварцовому піску. Рухомість суміші відповідає марці Р3. Марка цементу М500. Міжзернова пористість керамзиту $0,42$. Кількість втягнутого повітря 3% . Густина керамзитового гравію $2,7 \text{ кг/л}$, об'ємне водопоглинання 18% .

5.20. Розрахувати теплоізоляційний полістиролбетон з міцністю на стиск $f_{cm}=2 \text{ МПа}$ і густиною у висушеному стані 450 кг/м^3 .

Вихідні матеріали: портландцемент М500, заповнювачі – зола-винесення і пінополістирольні гранули з густиною і пористістю в насипному стані 20 кг/м^3 і 45% відповідно. Застосовується повітрявтягуюча добавка. Коефіцієнт цементуючої ефективності золи $K_{ц,е}=0,25$, її дійсна густина $\rho_3=2,4 \text{ г/см}^3$.

5.21. Розрахувати склад крупнопористого керамзитобетону з міцністю на стиск в 28 діб 5 МПа .

Матеріали: портландцемент М500 з нормальною густиною 26% , керамзитовий гравій з насипною густиною 600 кг/м^3 , густиною зерен $1,2 \text{ кг/л}$ та водопоглинанням 35% .

5.22. Розрахувати склад автоклавного газобетону на цементному в'язучому з середньою густиною 600 кг/м^3 .

Матеріали: портландцемент М500, кремнеземистий компонент – мелений кварцовий пісок з $\rho_n=2,67 \text{ кг/л}$, газоутворювач – алюмінієва пудра.

Співвідношення між кремнеземистим компонентом і в'язучим $S=1$.



5.4. Багатопараметричне проектування складів бетону (БПСБ)

В найбільш загальному вигляді рішення задачі проектування складу бетонної суміші полягає в розв'язанні системи рівнянь:

$$\begin{aligned} P_x &= f(P_1 P_2 \dots P_m, X_1, X_2 \dots X_k) \rightarrow \text{opt}; \\ P_1 &= f_1(X_1 X_2 \dots X_k) > P_1^0 (aa\bar{b} < P_1^0); \\ P_2 &= f_2(X_1 X_2 \dots X_k) > P_2^0 (aa\bar{b} < P_2^0); \\ &\dots\dots\dots \\ P_m &= f_m(X_1, X_2 \dots X_k) > P_m^0 (aa\bar{b} < P_m^0), \end{aligned} \quad (5.79)$$

де P_x – критерій оптимізації (витрата цементу, вартість та ін.);
 P_1, P_2, \dots, P_m – параметри показників властивостей бетонної суміші і бетону;

$P_1^0, P_2^0, \dots, P_m^0$ – їхні нормовані значення;

X_1, X_2, \dots, X_k – параметри складу суміші.

У будівельно-технологічній практиці найбільше поширення одержали методи проектування складів бетону з необхідною міцністю при стиску. Це обумовлено, по-перше, тим, що при конструктивних розрахунках міцність бетону є основним його параметром, і, по-друге, припущенням, що з міцністю однозначно зв'язані й інші необхідні властивості бетону. Останнє припущення, однак, не є досить загальним. Дійсно, з міцністю бетону при стиску однозначно зв'язані багато з його властивостей: міцність при згині, розтягу, зносостійкість, кавітаційна стійкість та ін. Однак, не є однозначними залежності міцності і морозостійкості, міцності і повзучості і т.д, а їх розрахункове визначення повинне бути засноване на використанні комплексу спеціальних кількісних залежностей.

Проектування складів бетону може розглядатися як ізольована система (*перший тип задач*) і як підсистема більш загальних систем, наприклад проектування бетонних і залізобетонних конструкцій і технології їх виробництва (*другий тип задач*). У першому випадку задача полягає лише в оптимальному рецептурному забезпеченні заданих параметрів, а в другому – вирішуються додатково і задачі оптимізації самих



параметрів, що задаються, (легкоукладальності суміші, міцності бетону та ін.) (рис. 5.9).

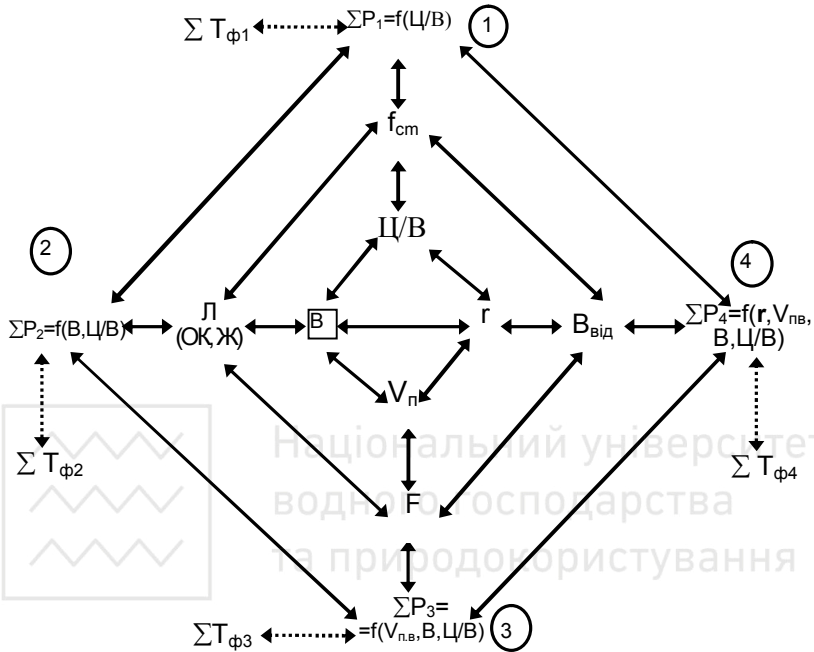


Рис. 5.9. Блок-схема багатопараметричного проектування складів бетону

ΣP – група властивостей бетону, пов'язаних з певними сумішевими параметрами,

ΣT_{ϕ} – група технологічних факторів, що впливають на властивості бетону;

Л – легкоукладальність бетонної суміші; f_{cm} – міцність бетону на стиск; F – морозостійкість бетону; Ц/В, В, γ , $V_{п.в}$, $V_{від}$ – відповідно цементно-водне відношення, вміст води, частка піску в суміші заповнювачів, об'єм втягнутого повітря; об'єм води, що відділилась з бетонної суміші.

1. Визначення f_{cm} для досягнення $\Sigma P_1 = f(\text{Ц} / \text{В})$ і необхідного Ц / В.

2. Визначення витрати води В для досягнення $\Sigma P_2 = f(\text{В}, \text{Ц} / \text{В})$.

3. Визначення об'єму втягнутого повітря $V_{п.в}$ для досягнення

$\Sigma P_3 = f(V_{п.в}, \text{В}, \text{Ц} / \text{В})$.

4. Визначення параметра γ для досягнення $\Sigma P_4 = f(\gamma, V_{п.в}, \text{В}, \text{Ц} / \text{В})$



Існуюча практика передбачає, в основному, рішення задач першого типу, що не завжди може виявитися достатнім. Наприклад, прагнення технологів домогтися максимальної економії цементу при проектуванні бетону заданої міцності не є продуктивним, якщо сам показник міцності неоптимальний як з позицій експлуатаційної надійності, так і з позицій вартості конструкцій. Зокрема, застосування бетону підвищеної міцності може дозволити зменшити переріз конструкцій і, таким чином, з позицій витрати цементу на одиницю виробів (конструкцій) а не на кубометр бетону, може виявитися більш вигідним. Аналогічно, не завжди економічно обґрунтованими є показники легкоукладальності бетонних сумішей, від яких істотно залежать їх склади. Наприклад, якщо критерієм оптимізації складів є вартість конструкції, застосування жорсткої бетонної суміші може виявитися менш вигідним, з огляду на трудовитрати на укладання бетону, ніж застосування литої суміші, хоча остання містить більшу кількість цементу. У зв'язку з цим представляється раціональним, там де це можливо, поєднувати зусилля конструкторів, технологів і економістів для комплексного рішення задач технологічного проектування бетону та конструкцій на його основі.

При проектуванні складів бетону можлива їх багатоваріантність. Вибір того або іншого складу визначають в конкретних умовах, виходячи з прийнятого критерію оптимальності. Такими критеріями можуть бути мінімальна витрата цементу, мінімальна середня густина бетону, максимальний коефіцієнт конструктивної якості, мінімальна вартість бетону та ін. Може бути обраний більш складний критерій, наприклад, вартість конструкцій або навіть усієї споруди в цілому з врахуванням не тільки вартості бетону але і трудомісткості, вартості виготовлення, перевезення і монтажу конструкцій.

В задачах другого типу в якості факторів складу бетонної суміші, що оптимізуються, розглядаються не тільки рецептурні (співвідношення заповнювачів, витрата добавки), але технологічні і конструктивні параметри.



В тих випадках, коли, крім міцності при стиску, виникає необхідність нормування ряду інших його будівельно-технічних властивостей, задачі проектування складу істотно ускладнюються. Такі задачі *багатопараметричного проектування* виникають при проектуванні складів різних, і особливо, спеціальних видів бетону (гідротехнічного, дорожнього, корозійностійкого та ін.).

На рис. 5.10 показаний приклад взаємозв'язку повзучості і вмісту цементного каменю в бетоні при $f_{cm} = \text{const}$. Міру повзучості бетону розраховували за формулою (4.93), запропоновану Європейським Комітетом з бетону.

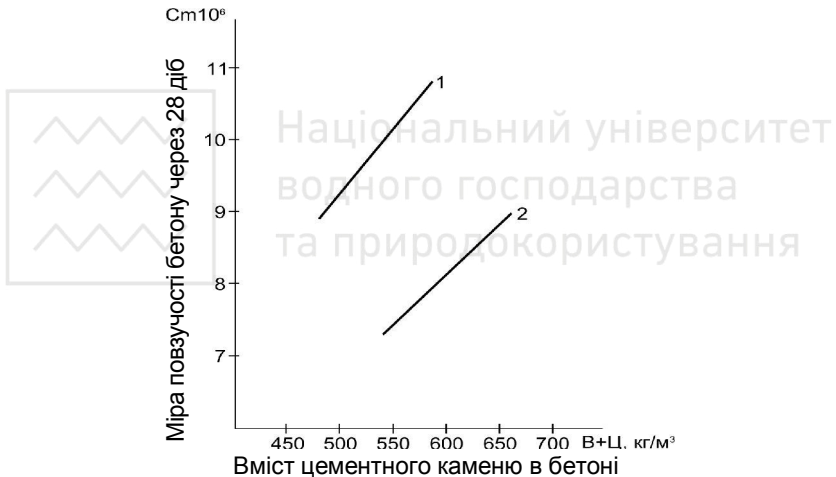


Рис. 5.10. Вплив вмісту цементного каменю в бетоні на міру повзучості: 1 – $f_{cm} = 20$ МПа; 2 – $f_{cm} = 30$ МПа

З формули (4.93) і рис. 5.10 випливає, що при постійному В/Ц і отже міцності бетону, повзучість його може істотно відрізнятись залежно від вмісту цементного каменю в бетоні. Аналогічно, можна показати неоднозначність залежності міцності бетону з групою властивостей, обумовлених в основному, капілярною пористістю (водопоглинання, морозостійкість та ін.).



Для рішення задач даного типу встановлюється область В/Ц або Ц/В, що забезпечує нормовані параметри, розглядаються технологічні шляхи її звуження й остаточно необхідне значення нормованого В/Ц. Регулювання нормованого В/Ц в цих задачах доцільно при одночасній зміні інших факторів складу, зокрема кількості цементного тіста, об'єму втягнутого повітря та ін.

Наприклад, нормуються середня міцність бетону при стиску $f_{cm}=65$ МПа і повзучість $C_m \times 10^6=3,5$. Рухомість бетонної суміші на гранітному щебені і середньозернистому кварцовому піску прийнята $OK=2$ см. Активність цементу $R_c=50$ МПа. По розрахунковій формулі міцності бетону $f_{cm}=AR_c(\text{Ц/В} - 0,5)$ при $A=0,6$, $\text{Ц/В}=2,63$ ($\text{В/Ц}=0,38$). При витраті води $V=175$ л/м³ і відповідно витраті цементу $\text{Ц}=460$ кг/м³, міра повзучості не забезпечується ($C_m \times 10^6=4,5$). Для досягнення нормованого значення $C_m \times 10^6$ необхідно збільшити Ц/В і відповідно зменшити значення В/Ц. Практичний збіг В/Ц з умов міцності і повзучості можна досягти переходом на більш жорстку суміш, яка потребує меншого водовмісту і відповідно забезпечує менше В/Ц.

Потужним засобом зменшення “ножиців” по В/Ц в морозостійких бетонах є залучення повітря. Характерно при цьому, що значно збільшуючи можливі значення В/Ц для досягнення заданої морозостійкості, втягнуте повітря в той же час зменшує необхідне В/Ц з умови міцності. При цьому загальний позитивний ефект зменшення витрати цементу може бути досить значним особливо в бетонах з високими значеннями морозостійкості при помірному нормованому значенні міцності. З рис. 5.11, зокрема впливає, що $f_{cm}=20$ МПа і F200 забезпечуються без добавки втягнутого повітря при $\text{В/Ц}=0,5$ із введенням втягнутого повітря – $\text{В/Ц}=0,62$. При цьому величина “ножиців” за В/Ц, що необхідна для забезпечення заданої міцності і морозостійкості бетону в першому випадку складає $1,15-0,5=0,65$, а в другому $0,92-0,62=0,3$.



Національний університет
водного господарства
та проєктування

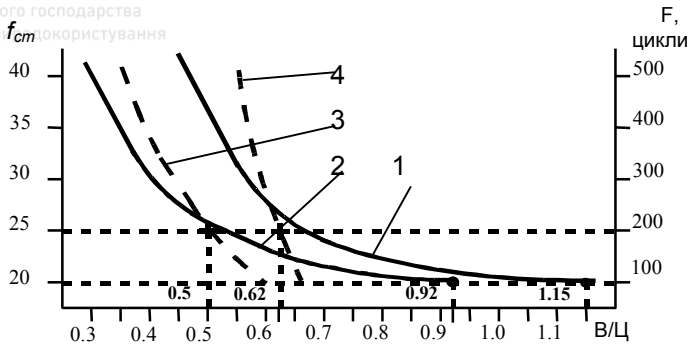


Рис. 5.11. Зміна В/Ц залежно від заданих значень міцності і морозостійкості бетону:

1. Крива f_{cm} без втягнутого повітря;
2. 3 20 л. втягнутого повітря
3. Крива морозостійкості бетону без втягнутого повітря;
4. 20 л втягнутого повітря

Аналогічно, “ножиці” по витраті води утворюють, наприклад, показники легкоукладальності бетонної суміші й усадка бетону (рис. 5.12). Це вимагає включення в алгоритми задач багатопараметричного проєктування складів бетону спеціальних обчислень, зв'язаних з визначенням таких складів, що забезпечують весь комплекс нормованих властивостей. Зменшення “ножиць” по Ц/В, В, г, вмісту добавок, що обумовлені нормованими параметрами якості бетону і зрушення їх в бік, що забезпечує найкращі значення вибраного критерія (витрати цементу, вартості бетону та ін.) є метою оптимізації при багатопараметричному проєктуванні складів бетонних сумішей.

Алгоритми рішення задач багатопараметричного проєктування складів бетону базуються на основних закономірностях, що лежать в основі розрахунково-експериментальних методів проєктування складів бетонів з заданими значеннями міцності і легкоукладальності і використовують додаткові емпіричні залежності.

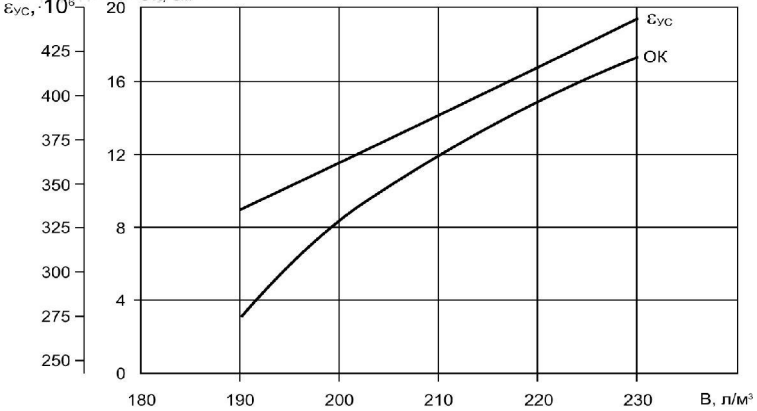


Рис.5.12. Вплив водовмісту на рухомість бетонної суміші і усадку:

Примітка. Залежність ОК від В прийнята для рядових матеріалів; усадка бетону $\epsilon_{с}$ розрахована по формулі $\epsilon_{с} \cdot 10^6 = 0,125V\sqrt{B}$

При цьому загальна схема методу наступна:

1. З урахуванням проектних вимог до бетону, технологічних умов і техніко-економічного аналізу вибираються вихідні компоненти бетонної суміші та її легкоукладальність.

2. У тих випадках, коли нормуються властивості бетону, однозначно зв'язані з міцністю бетону при стиску f_{cm} (міцність при розтягу, згині, модуль пружності, умовна розтяжність та ін.), визначається значення останньої, що забезпечує задані властивості.

3. З урахуванням активності цементу, якісних особливостей заповнювачів, умов твердіння й інших факторів визначається Ц/В, що забезпечує задані властивості.

4. Для досягнення необхідного показника легкоукладальності і при необхідності інших властивостей бетонної суміші і бетону (наприклад, усадки) при використанні даних вихідних матеріалів і добавок визначається витрата води (В). При цьому у випадку виходу за межі правила сталості водопотреби витрата води коректується з врахуванням Ц/В.

5. При нормуванні морозостійкості бетону розраховується необхідний об'єм емульгованого повітря й уточнюється необхідне Ц/В.



6. При знайдених значеннях V і C/V перевіряється можливість досягнення нормованих властивостей, що визначаються цими двома технологічними параметрами. У випадку недосягнення нормованих параметрів здійснюється додаткове коректування V і C/V з використанням при необхідності спеціальних технологічних прийомів (введення добавок та ін.).

7. Розраховується на основі остаточно знайдених C/V і V витрата цементу і перевіряється виконання обмежень, зв'язаних з витратою цементу (тепловиділення, стійкість до корозії й ін.).

8. Розраховується необхідний зерновий склад дрібного і крупного заповнювача при введенні декількох фракцій, а потім їх витрати. При виборі співвідношення заповнювачів поряд з досягненням найкращої легкоукладальності і міцності приймаються до уваги й інші умови (підвищена водонепроникність, товщина конструкції, ступінь армування та ін.).

9. Розглядається можливість використання різних технологічних рішень, спрямованих на економію цементу, зниження енерговитрат, зменшення вартості бетонної суміші.

Математичне планування експериментів (МПЕ) як метод математичного моделювання дає можливість розв'язувати задачі проектування складів бетонів і розчинів із різноманітністю вихідних умов і факторів.

Математичні (експериментально-статистичні) моделі, які отримані при реалізації МПЕ, дають можливість розв'язувати задачі проектування складів бетонів і розчинів разом із вибором режимних параметрів для різних технологічних операцій і за допомогою системного аналізу оцінювати альтернативні рішення. З цією метою можлива реалізація різноманітних алгоритмів, використання аналітичних, графоаналітичних і графічних методів.

При зміні заданих умов, моделі слід застосовувати обережно і враховувати можливість суттєвого збільшення похибки для отримуваних рішень. При необхідності врахування зміни факторів, які безпосередньо не враховуються в моделях, доцільно за допомогою спеціальних адаптивних алгоритмів періодично здійснювати корегування коефіцієнтів моделей.

Рішення задач багатопараметричного проектування складів бетонів і розчинів із застосуванням комплексів математичних



моделей доцільно виконувати з допомогою комп'ютерних програм, що дозволяють розрахувати базові склади і корегувати їх із врахуванням виробничої інформації, проводити статистичний контроль показників нормованих властивостей матеріалів.

Багатофакторні поліноміальні моделі дають можливість знаходити оптимальні значення таких факторів як співвідношення заповнювачів, вміст добавок та ін., і, таким чином, оптимізувати розрахункові склади бетону, що враховують задану сукупність факторів і область їх варіювання. При цьому можливі два підходи:

- фактори, що оптимізуються, визначаються з рівнянь, де вони виконують роль залежних змінних, наприклад, частка піску в суміші заповнювачів r знаходиться з рівняння осадки конуса або жорсткості бетонної суміші;

- одержують окремі рівняння для факторів, що оптимізуються (рівняння r_{opt} , добавки суперпластифікатора та ін.), які разом з рівняннями нормованих параметрів використовують в розрахунках складів бетонних сумішей.

Поряд із диференціальним аналізом для отримання оптимізаційних рішень можливе застосування канонічного, ізопараметричного аналізу, лінійного програмування та інших методів.

В табл. 5.33 приведені приклади алгоритмів задач проектування оптимальних складів бетону.

Таблиця 5.33

Приклади алгоритмів розв'язування задач оптимізації
складів бетону

1. *Розрахувати склади бетону з заданими значеннями міцності і легкоукладальності бетонної суміші при застосуванні цементів з різною активністю.*

Фактори складу: витрата води, кг/м^3 (x_1); витрата цементу, кг/м^3 (x_2); частка піску в суміші заповнювачів (x_3); активність цементу, МПа (x_4).

Вихідні параметри: легкоукладальність бетонної суміші, ОК або s (y_1); міцність бетону на стиск, МПа (y_2).

Схема розрахунку:

- в результаті реалізації алгоритмізованих експериментів отримують квадратичні поліноміальні моделі y_1 і y_2 ;
- знаходиться лінійне рівняння $\partial y_1 / \partial x_3 = 0$;
- при заданих значеннях x_4 , y_1 і y_2 рішенням трьох рівнянь знаходять необхідні параметри суміші: x_1 , x_2 , x_3 .



2. Розрахувати склади бетону з заданими значеннями міцності на стиск і легкоукладальності бетонної суміші на цементях з різною активністю і нормальною густиною, а також піску з різним вмістом фракції 0,63...5 мм.

Фактори складу: витрата води, $\text{кг}/\text{м}^3$ (x_1); витрата цементу, $\text{кг}/\text{м}^3$ (x_2); частка піску в суміші заповнювачів (x_3); частка фракції 0,63-5,0 мм в піску (x_4); активність цементу, МПа (x_5); нормальна густина цементу, % (x_6).

Вихідні параметри: легкоукладальність бетонної суміші, ОК або с (y_1); міцність бетону на стиск, МПа (y_2).

Схема розрахунку:

- отримують квадратичні поліноміальні моделі y_1 і y_2 ;
- знаходять лінійні рівняння $\partial y_1 / \partial x_3 = 0$ і $\partial y_2 / \partial x_4 = 0$;
- при заданих значеннях x_5 і x_6 знаходять x_1 і x_2 ;
- з відповідних лінійних рівнянь визначають x_3 і x_4 .

3. Розрахувати склади гідротехнічного бетону з заданими показниками міцності, легкоукладальності, морозостійкості, водонепроникності.

Фактори складу: витрата води, $\text{кг}/\text{м}^3$ (x_1); цементно-водне відношення (x_2); максимальна крупність щебеню, мм (x_3); витрата повітрявтягувальної добавки, $\text{кг}/\text{м}^3$ (x_4); нормальна густина цементу, % (x_5); активність цементу, МПа (x_6); легкоукладальність, ОК або с (x_7); тривалість нормального тверднення, діб (x_8).

Вихідні параметри: Об'єм емульгованого повітря, % (y_1); водопотреба суміші, $\text{кг}/\text{м}^3$ (y_2); оптимальна частка піску (y_3); міцність при стиску, МПа (y_4); морозостійкість, цикли (y_5); водонепроникність, МПа (y_6).

Схема розрахунку:

- отримують квадратичні поліноміальні моделі $y_1 \dots y_6$;
- моделі y_4 , y_5 , y_6 розв'язують відносно C/B , фіксуючи інші фактори на необхідних рівнях, при заданих значеннях міцності, морозостійкості і водонепроникності. Вибирають більше значення C/B ;
- за моделями y_1, y_2, y_3 знаходять необхідні значення витрат добавки і води, а також частки піску;
- по знайдених параметрах суміші остаточно встановлюють склад бетонної суміші.



4. Розрахувати склад литого шлаковмісного бетону з заданою проектною міцністю і міцністю при пропарюванні і максимально можливим коефіцієнтом ефективності (відношенням міцності до витрат цементу).

Фактори складу: частка щебеню в суміші заповнювачів (x_1); частка шлаку в дрібному заповнювачі (x_2); водопотреба щебеню, % (x_3); водопотреба шлаку, % (x_4); водопотреба піску, % (x_5); цементно-водне відношення (x_6).

Вихідні параметри: водопотреба суміші, кг/м^3 (y_1); міцність бетону на стиск після пропарювання, МПа (y_2); коефіцієнт ефективності бетону після пропарювання (y_3).

Схема розрахунку:

- одержують квадратичні поліноміальні моделі $y_1 \dots y_3$;
- знаходять лінійні рівняння $\partial y_3 / \partial x_1 = 0$ і $\partial y_3 / \partial x_2 = 0$;
- розв'язують систему 3-х рівнянь з визначенням x_1, x_2 і x_6 при заданих значеннях інших факторів і необхідному y_3 ;
- по знайдених параметрах суміші розраховують остаточно склад бетону.

Приклади

5.18. Визначити цементно-водне відношення та витрату води в наведених (табл. 5.34) задачах

Таблиця 5.34

Приклади визначення Ц/В та В у задачах БПСВ

Визначити необхідне Ц/В, $(\text{Ц/В})_н$ для одержання бетону на рядових матеріалах ($R_{ц}=50$ МПа):

1) з границею міцності при стиску в 28 діб $f_{cm}=30$ МПа і розтязі при згині $f_{c,t,f} = 4$ МПа

Основні розрахункові формули:

$$f_{cm} = 0,6R_{ц} \cdot (\text{Ц} / \text{В} - 0,5)$$

$$f_{c,t,f} = 0,08(10 f_{cm})^{2/3}$$

Розрахункові Ц/В:

$$\text{Ц} / \text{В}_{f_{cm}} = 1.50$$

$$\text{Ц} / \text{В}_{f_{c,t,f}} = 1.86$$

$$\text{Ц} / \text{В}_{t,f} > \text{Ц} / \text{В}_{f_{cm}}, \quad (\text{Ц} / \text{В})_н = 1,86$$



2) з границею міцності при стиску у 28 діб $f_{cm}=30$ МПа і тепловиділенням $Q=68000$ кДж ($V=190$ л/м³)

Основні розрахункові формули:

$$f_{cm} = 0,6R_c \cdot (C/B - 0,5)$$

$$Q = g_7 C$$

$$g_7 = 26,15R_c^{2/3}$$

$$C/B_{f_{cm}} > C/B_Q \quad (C/B)_n = 1,50$$

Розрахункові Ц/В:

$$C/B_{f_{cm}} = 1,50$$

$$C/B_Q = 1,01$$

Визначити необхідну водопотребу (V_n) для бетонної суміші на кварцовому піску з $V_n=7\%$ і гранітному щебеню фракції 5...20 мм з рухомістю ОК=20 см і усадкою бетону $\varepsilon_{yc}=0,3$ мм/м

Основні розрахункові формули:

$$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125V\sqrt{B}$$

$$V = f(\text{ОК})$$

(табл. 5.5)

$$B_{OK} > B_{yc}$$

Розрахункові витрати води:

$$B_{OK} = 220 \text{ л/м}^3$$

$$B_{yc} = 179 \text{ л/м}^3$$

$$B_n = 179 \text{ л/м}^3$$

Для досягнення необхідної рухомості в бетонну суміш без збільшення усадки бетону слід ввести пластифікуючу добавку

5.19. Розрахувати склад бетону з проектною міцністю $f_{cm}=30$ МПа, рухомістю бетонної суміші ОК=8...10 мм граничною розтяжністю $\varepsilon_{zp}=1 \cdot 10^{-4}$, усадочними деформаціями $\varepsilon_{yc}=0,3 \cdot 10^{-3}$.

Вихідні матеріали: портландцемент з активністю $R_c=42,5$ МПа, границею міцності при згині $R_{ц,з}=5,6$ МПа, нормальною густиною НГ=27,5%; кварцовий пісок з модулем крупності $M_k=1,7$, вмістом пилюватих і глинистих домішок 1,5%, густиною $\rho_n=2,67$ г/см³; щебінь фракції 5...70 мм з вмістом пилюватих і глинистих домішок 1,2%, густиною $\rho_{щ}=2,65$ г/см³.

1. Знайдемо за формулою (4.25) і табл. 5.4 необхідні значення В/Ц, витрату води В і цементу Ц для забезпечення заданої міцності бетону і рухомості бетонної суміші:



$$B/C = 1,85, B = 200 \text{ л/м}^3, C = 370 \text{ кг/м}^3.$$

2. Знайдемо за формулою (4.98) чи забезпечується нормована усадка бетону при вмісті води $B=200 \text{ л/м}^3$:

$$\varepsilon_{yc} = 0,125 \cdot 200 \cdot 14,4 \cdot 10^{-6} = 0,36 \cdot 10^{-3}.$$

Враховуючи, що нормована усадка $\varepsilon_{yc}=0,3 \cdot 10^{-3}$, введемо для зниження витрати води добавку пластифікатор ЛСТ, що дозволяє при дозуванні 0,25% маси цементу зменшити витрату води на 10%. Тоді:

$$B = 180 \text{ л/м}^3, \quad \varepsilon_{yc} = 0,125 \cdot 180 \cdot 13,4 \cdot 10^{-6} = 0,3 \cdot 10^{-3}.$$

Приймаючи, що введення ЛСТ не знижує проектної міцності, уточнюємо витрату цементу:

$$C = 180 \cdot 1,85 = 333 \text{ кг/м}^3.$$

3. Знайдемо $\varepsilon_{гр}$ як відношення міцності бетону при згині $f_{t,f}$ до модуля пружності E .

За формулою $f_{c,tf} = AR_{u,ze}(C/B - 0,2)$, при $A=0,4$

$$f_{c,tf} = 0,4 \cdot 5,6 \left(\frac{1}{0,54} - 0,2 \right) = 3,7 \text{ МПа}.$$

Модуль пружності бетону знайдемо за формулою (4.79):

$$E_{\sigma} = \frac{52000 \cdot 30}{23 + 30} = 2,94 \cdot 10^4 \text{ МПа}$$

Тоді



$$\varepsilon_{cp} = \frac{3,7}{2,94 \cdot 10^4} = 1,25 \cdot 10^{-4}$$

Таким чином розрахункове значення ε_{cp} виявилось вище нормованого. Введення ЛСТ може дещо зменшити фактичне значення ε_{cp} , що повинно позитивно вплинути на ε_{cp} .

5.20. Розрахувати за допомогою номограм (5.13...5.16), що побудовані за відповідними експериментально-статистичними моделями склад бетону з проектною міцністю $f_{cm}=20$ МПа з рухомістю бетонної суміші $OK=1...4$ см. Застосовується портландцемент з мінеральними добавками М400 ($N_f=27\%$, $\rho_c=3,1$ кг/л), кварцовий пісок ($B_n=9\%$, $\rho_n=2,6$ кг/л), гранітний щебінь ($B_{щ}=4\%$, $\rho_{щ}=2,65$ кг/л), суперпластифікатор С-3 у кількості 0,7% від маси цементу. Бетон пропарюється ($\tau=10$ год, $T=65$ °С). Необхідно забезпечити після пропарювання 70% проектної міцності.

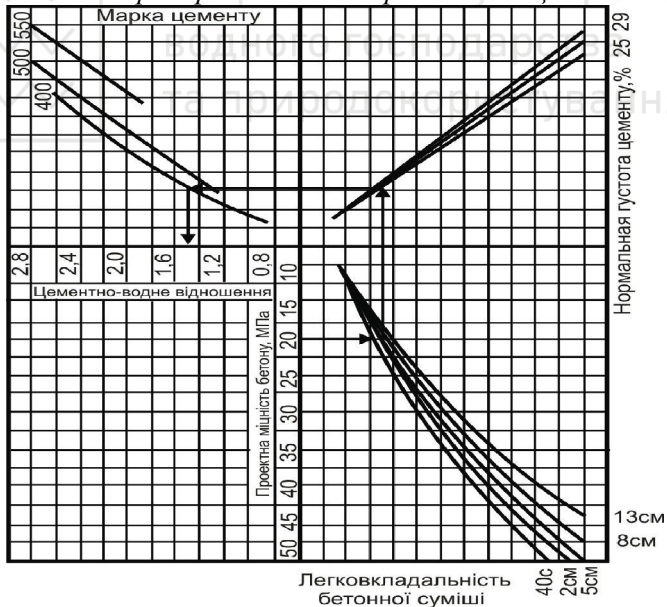


Рис. 5.13. Номограма для бетону з необхідної проектної міцності



За номограмою (рис.5.13) встановлюємо, що необхідне $(Ц/В)$ для забезпечення 28-добової міцності $(Ц/В)_1 = 1.4$.

За номограмою (рис.5.14) визначаємо $Ц/В$, що необхідно для забезпечення 70% проектної міцності бетону після пропарювання. $(Ц/В)_2=2.1$. Оскільки $(Ц/В)_2 > (Ц/В)_1$ приймаємо його для подальших розрахунків.

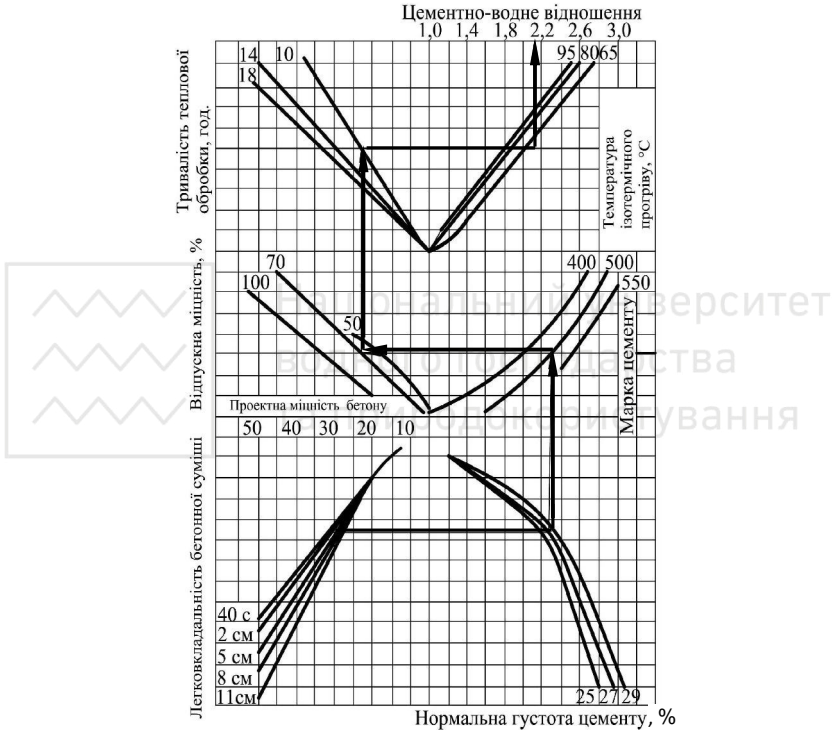


Рис.5.14. Номограма визначення цементно-водного відношення бетону, що піддається тепловій обробці

Витрата води $В$ (рис.5.15) становить 190 л/м^3 . З врахуванням поправочного коефіцієнта на застосування добавки суперпластифікатора (табл. 5.35) становить $В=190 \cdot 0,82=156 \text{ л/м}^3$.



Таблиця 5.35

Значення поправочних коефіцієнтів до водовмісту бетонних сумішей при застосуванні пластифікуючих добавок

Легкоукладальність суміші		Цементно-водне відношення				
Рухомість, см	Жорсткість, с	1,40	1,80	2,20	2,60	3,0
-	30...50	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92
		0,88	0,85	0,83	0,81	0,80
1...4	-	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91
		0,86	0,84	0,82	0,80	0,79
5...9	-	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
		0,82	0,80	0,79	0,78	0,77
10...15	-	0,90	0,89	0,88	0,87	0,87
		0,80	0,78	0,77	0,76	0,75

Примітка. Над рисою наведені значення при застосуванні добавки ЛСТ у кількості 0,25% від маси цементу, під рисою - суперпластифікатор С-3 у кількості 0,7% від маси цементу.

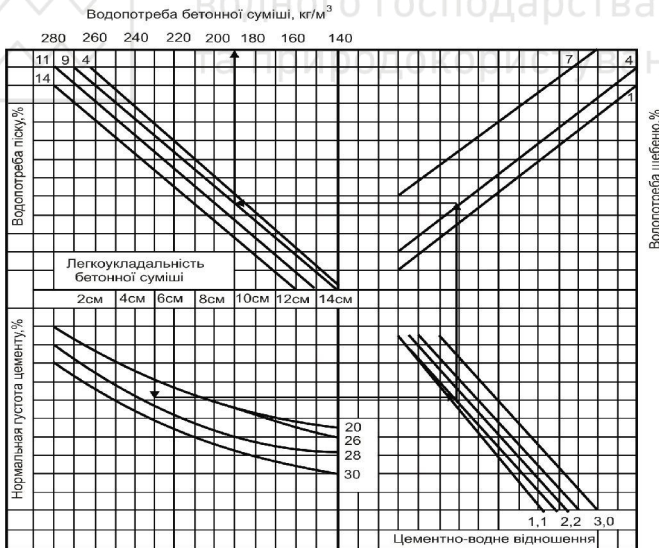


Рис. 5.15. Номограма визначення водопотреби бетонної суміші



Витрата цементу:

$$Ц = 156 \cdot 2,1 = 328 \text{ кг/м}^3.$$

Оптимальну частку піску в суміші заповнювачів установлюємо за рис. 5.16 $r=0,36$.

Витрата піску і щебеню:

$$П = \left(1000 - \frac{328}{3,1} - \frac{156}{1}\right) \cdot 0,36 \cdot 2,6 = 691 \text{ кг/м}^3;$$

$$Щ = \left(1000 - \frac{328}{3,1} - \frac{156}{1} - \frac{691}{2,6}\right) \cdot 2,65 = 1236 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата цементу, кг/м³
200 250 300 350 400 450

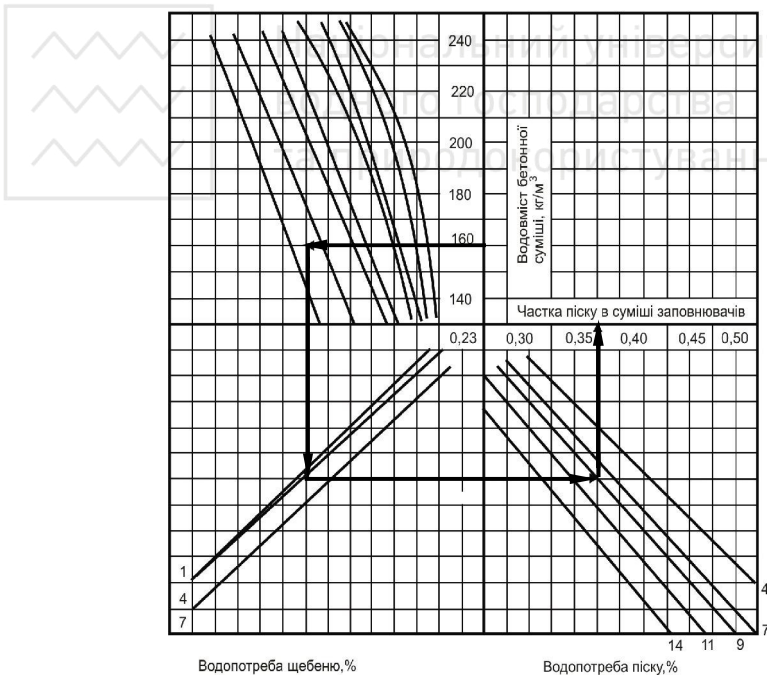


Рис. 5.16. Номограма визначення оптимальної частки піску



5.21. Розрахувати за допомогою експериментально-статистичних моделей (табл. 5.36) склад золовмісного піщаного бетону з міцністю на стиск в 28 діб 10 МПа і міцністю зчеплення з основою не менше 0,2 МПа. Бетонна суміш має ОК=10 см. Золо-цементне відношення (З/Ц) – 0,4, добавки: суперпластифікатор (СП) – 0,25%, повітрявтягувальна ПАР (ПД) – 0,04% від маси цементу.

Таблиця 5.36

Математичні моделі для розрахунків складів піщаного бетону

Вихідний параметр	Модель	Фактори
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	$f_{cm,28} = 24,8 - 8,04x_1 + 1,207x_2 + 2,49x_3 - 2,03x_4 + 1,04x_1^2 - 0,458x_2^2 + 0,342x_3^2 - 2,71x_4^2 + 0,33x_1x_2 + 0,66x_1x_3 + 0,23x_2x_3 + 0,44x_2x_4 - 0,18x_3x_4 \quad (5.80)$	$x_1 = (B/C - 0,8)/0,2$ $x_2 = (3/C - 0,35)/0,35$ $x_3 = (СП - 0,35)/0,35$ $x_4 = (ПД - 0,025)/0,025$ $x_5 = (B - 270)/30$
Міцність зчеплення з основою, 28 діб, МПа	$f_{ad,28} = 0,639 - 0,028x_1 + 0,018x_2 + 0,057x_3 + 0,026x_4 - 0,0792x_1^2 - 0,074x_2^2 - 0,0542x_3^2 - 0,0542x_4^2 + 0,004x_1x_2 + 0,004x_1x_4 + 0,011x_2x_3 \quad (5.81)$	В/Ц – водоцементне відношення; З/Ц – золоцементне відношення; СП – добавка суперпластифікатора, %; ПД – повітрявтягувальна добавка;
Рухомість бетонної суміші, см	$P = 9,73 + 0,62x_2 + 2,2x_3 + 1,08x_4 + 1,25x_5 + 0,37x_1^2 + 0,62x_2^2 + 0,37x_3^2 - 1,14x_4^2 + 0,37x_5^2 + 0,41x_1x_2 - 0,59x_1x_5 + 0,28x_3x_4 + 0,28x_3x_5 \quad (5.82)$	В – витрата води кг/м ³

1. Знайдемо з рівнянь $f_{cm,28}$ і $f_{ad,28}$ значення необхідного В/Ц. Приймаємо:

$$x_2 = \frac{0,4 - 0,35}{0,35} = 0,14; \quad x_3 = \frac{0,25 - 0,35}{0,35} = -0,28; \quad x_4 = \frac{0,04 - 0,025}{0,025} = 0,6.$$

Розв'язавши рівняння для $f_{cm,28}$ і $f_{ad,28}$ відносно x_1 та перейшовши від кодованих до натуральних значень факторів, отримаємо з умови міцності на стиск $(B/C) = 1,07$, адгезійної міцності $(B/C)_2 = 1,03$. Остаточоно приймаємо $B/C = 1,03$.



2. З моделі рухомості, прийнявши $OK=10$ см при

$$x_1 = \frac{1,03 - 0,8}{0,2} = 1,15; \quad x_2 = 0,14; \quad x_3 = -0,28; \quad x_4 = 0,6 \quad \text{знайдемо, що}$$

$x_5 = -0,03$. Перейшовши до натурального значення, отримаємо $B=269$ кг/м³.

3. Витрата цементу:

$$Ц = B : B/Ц = 269 : 1,03 = 261 \text{ кг/м}^3.$$

4. Витрата золи:

$$З = 0,4Ц = 0,4 \times 261 = 104 \text{ кг/м}^3.$$

5. Витрата повітрявтягувальної добавки:

$$ПД = 0,0004Ц = 0,0004 \times 261 = 0,104 \text{ кг/м}^3.$$

Об'єм втягнутого повітря (знайдено експериментально) V_n
= 6 %

6. Витрата суперпластифікатора:

$$СП = 0,0025Ц = 0,0025 \times 261 = 0,653 \text{ кг/м}^3.$$

7. Витрата піску:

$$П = \left(1000 - \frac{Ц}{\rho_ц} - \frac{З}{\rho_з} - B - V_n \right) \rho_n.$$

При $\rho_ц = 3,1$ г/см³, $\rho_з = 2,4$ г/см³:

$$П = \left(1000 - \frac{261}{3,1} - \frac{104}{2,4} - 269 - 60 \right) \times 2,65 = 1439 \text{ кг/м}^3.$$



Розрахунковий номінальний склад бетонної суміші
(кг/м³):

$$Ц=269; 3=104; П=1439; В=269; ПД=0,104; СП=0,653.$$

5.22. Розрахувати склад важкого бетону, виготовленого на малоклінкерному шлакопортландцементі (МШПЦ), що характеризуватиметься міцністю при стиску 35 МПа після проходження тепловологісної обробки та 70 МПа через 28 днів подальшого нормального твердіння. Рухомість бетонної суміші: ОК=15 см. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор (СП) Sika VC 225 в кількості 0,6% від маси цементу.

Бетон виготовлений із застосуванням кварцового піску з $M_k=1,9$, $\rho_p=2,65$ кг/м³ і гранітного щебеню з максимальною крупністю зерен 20 мм, $\rho_{щ}=2,85$ кг/л, $\rho_{н.щ}=1,65$ кг/л.

В результаті реалізації експериментів були отримані необхідні експериментально-статистичні моделі (табл. 5.37) у кодо-ваних перемінних:

$$x_1 = (B / Ц - 0,45) / 0,2; \quad x_2 = (СП - 1,5) / 1,45.$$

Таблиця 5.37

Експериментально-статистичні моделі водопотреби та міцності бетонів на активованому МШПЦ

Водопотреба бетону, л/м ³	
$B=145,3+1,667x_1-32,507x_2+5,894x_1^2+11,894x_2^2-7,0x_1x_2$	(5.83)
Міцність на стиск у після ТВО*, МПа	
$f_{cm}^{TBO}=26,9-12,5x_1+0,1(x_1)^2+0,01(x_2)^2$	(5.84)
Міцність на стиск у після ТВО та 28 днів нормального твердіння, МПа	
$f_{cm}^{TBO28}=38,5-31,9x_1+0,1x_2+8,3(x_1)^2+1,89(x_2)^2-0,1x_1x_2$	(5.85)

*Тепловологісна обробка бетонів (ТВО) здійснювалась при температурі 80° С. Швидкість підйому температури та охолодження складала 30° С за годину. Тривалість ізотермічної витримки – 6 год.



1. За графіком наведеним на рис.5.17 при заданому значенні рухомості бетонної суміші ($OK=15$ см) та визначеному виді та кількості пластифікатора (0,6% від маси цементу), знаходимо витрату води: $V=135$ л/м³.

2. Преводимо вміст пластифікуючої добавки в кодований вигляд:

$$x_2 = (0,6 - 0,3)/0,3 = 1.$$

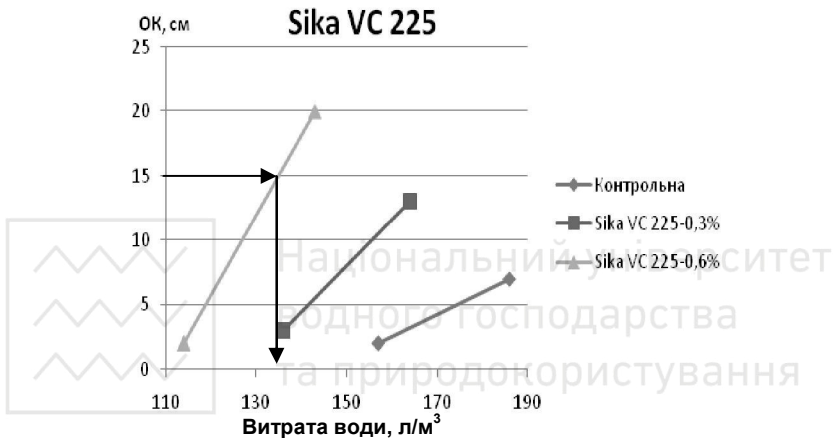


Рис. 5.17. Графік залежності рухомості бетонної суміші виготовленої на МШПЦ залежно від витрати води на м³

3. З відповідних рівнянь (табл. 5.37.) при $x_2=1$ визначаємо В/Ц (x_1'), яке забезпечить необхідну міцність бетону:

– після проходження тепловологісної обробки ($f_{cm}^{TBO} \geq 35$ МПа) $x_1' = -0,64$.

– після проходження тепловологісної обробки та 28 діб нормального твердіння ($f_{cm}^{TBO28} \geq 70$ МПа) $x_1' = -0,86$.

4. Переводимо отримані значення водоцементного відношення в натуральний вид:

– необхідне В/Ц для досягнення заданої міцності бетону після ТВО:



$$(B/C)_1 = X_1 \times 0,2 + 0,45 = -0,64 \times 0,2 + 0,45 = 0,32 ;$$

– необхідне В/Ц для досягнення заданої міцності бетону в 28 діб:

$$(B/C)_2 = X'_1 \times 0,2 + 0,45 = -0,86 \times 0,2 + 0,45 = 0,28 .$$

Для забезпечення необхідних міцнісних характеристик бетону приймаємо мінімальне значення водоцементного відношення, $(B/C=0,28)$.

5. Визначаємо необхідну витрату цементу:

$$Ц = \frac{135}{0,28} = 482 \text{ кг} / \text{м}^3 .$$

6. Знаходимо витрати заповнювачів при коефіцієнті розсіву зерен $\alpha=1,46$, (табл. 5.8) і пустотності щебеню $(2,85-1,65)/2,85=0,42$.

$$Щ = \frac{1000}{1,46 \frac{0,42}{1,65} + \frac{1}{2,8}} = 1388 \text{ кг} / \text{м}^3 ;$$

$$П = (1000 - (\frac{482}{3,1} + 135 + \frac{1388}{2,8})) \times 2,65 = 590 \text{ кг} / \text{м}^3 .$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 482 кг/м³; вода – 135 л/м³; щебінь – 1388 кг/м³; пісок – 590 кг/м³. Витрата суперпластифікатора Sika VC 225 складає 2,91 кг/м³.

5.23. *Визначити склад дрібнозернистого фібробетону з міцністю при стиску 60 МПа та міцністю на розтяг при згині 15 МПа із виходом суміші 15 см.*

Матеріали: портландцемент М500, сталева фібра з густиною $\rho_f=7,8 \text{ кг/м}^3$, кварцовий пісок з $M_k=2,1$, $\rho_n=2,65 \text{ кг/л}$.



Передбачається використання добавки Melflux 2651 f 0,5% від маси щебеню.

1. Розраховуємо необхідне значення В/Ц за допомогою загальної формули $f_{cm} = A_1 AR_u (C / B - v)$, приймаючи емпірично встановлені значення $A=0,48$ і $b=0,65$ (табл. 5.38) та $A_1=1,15$ (для добавки Melflux 2651 f):

$$B/C = 1,15 \cdot 0,48 \cdot 50 / (60 + 0,65 \cdot 1,15 \cdot 0,48 \cdot 50) = 0,35.$$

Таблиця 5.38

Значення коефіцієнтів А і b у формулі міцності для дрібнозернистого бетону

Вид заповнювачів	Пластичні бетонні суміші	Жорсткі бетонні суміші	Наджорсткі (напівсухі) бетонні суміші
Заповнювач високої якості	$A=0,52,$ $b=0,65$	$A=0,52,$ $b=0,55$	$A=0,52,$ $b=0,2$
Заповнювач середньої якості	$A=0,48,$ $b=0,65$	$A=0,48,$ $b=0,55$	$A=0,48,$ $b=0,2$
Заповнювач низької якості	$A=0,44,$ $b=0,65$	$A=0,44,$ $b=0,55$	$A=0,44,$ $b=0,2$

2. Перевіряємо за табл. 5.39 можливість забезпечення заданої міцності на розтяг при згині.

За даними табл. 5.39 при міцності дрібнозернистого фібро бетону 60 МПа, В/Ц=0.35 і витраті сталевोї фібри 100...120 кг/м³ необхідна міцність на розтяг при згині 15 МПа забезпечується.

Таблиця 5.39

Очікувані значення міцнісних характеристик сталевібробетону у віці 28 діб

Витрата фібри, кг/м ³	В/Ц	$f_{c,tf}^{28}$	f_{cm}^{28}
80...100	0,3...0,35	11...20	77...92
	0,35...0,4	9...17	63...79
100...120	0,3...0,35	16...20	78...92
	0,35...0,4	14...17	60...78



3. Без введення пластифікуючи добавок за емпіричними даними орієнтовно можна прийняти витрату води $V_0=265 \text{ л/м}^3$.

Враховуючи, що водоредукуючий ефект добавки полікарбоксилатного суперпластифікатора Melflux при витраті його 0,5% від маси цементу становить 30...35%, розрахункова витрата води становить

$$V = 0,7 \cdot 265 = 185 \text{ л/м}^3.$$

4. Витрата цементу:

$$C = 185 : 0,35 = 529 \text{ кг/м}^3.$$

5. Витрата піску з урахуванням введення в бетонну суміш 100 кг сталеві фібри:

$$П = \left(1000 - \frac{529}{3.1} - 185 - \frac{100}{7.8} \right) \cdot 2.65 = 1673 \text{ кг/м}^3$$

6. Витрата суперпластифікатору:

$$СП = (529 \cdot 0,5) / 100 = 2,64 \text{ кг/м}^3.$$

Вправи

5.23. Розрахувати склад бетону з міцністю на стиск у 28 добовому віці не меншою ніж 30 МПа і міцністю на розтяг при згині 7.5 МПа. Рухомість бетонної суміші відповідає марці Р3.

Матеріали: Портландцемент М500 з НГ=28,5%, кварцовий пісок з водопотребою 8,5% і $\rho_n=2,62 \text{ кг/л}$, гранітний щебінь з водо потребою 2,5%, з максимальною крупністю 40 мм, з густиною зерен $\rho_{щ}=2,67 \text{ кг/л}$ та насипною густиною $\rho_{н,щ}=1,65 \text{ кг/л}$.



5.24. Розрахувати склад бетону з міцністю на стиск у 28 добовому віці не меншою ніж 50 МПа і міцністю на осьовий розтяг 5.5 МПа. Осадка конуса бетонної суміші 7...9 см.

Матеріали: Портландцемент М500 з НГ=26,5%, кварцовий пісок з $M_k=2.1$, $\rho_n=2,64$ кг/л, $\rho_{н.п}=1,51$ кг/л вмістом пиловидних та глинистих домішок 3%, щебінь крупністю 5...20 мм з водопотребою 2%. В бетонну суміш вводиться полікарбоксилатний суперпластифікатор з водоредукуючим ефектом 30%.

5.25. Розрахувати склад бетону класу за міцністю не нижче С25/30 з динамічним модулем крупності $E_d=5 \cdot 10^4$ МПа і нормативною усадкою $\varepsilon_{yc}=15 \cdot 10^{-5}$. Рухомість бетонної суміші Р2.

Матеріали: Портландцемент М500 з НГ=28%, кварцовий пісок з водопотребою 6%, $\rho_n=2,63$ кг/л, гранітний щебінь з водопотребою 2%, крупністю до 20 мм, $\rho_{щ}=2,65$ кг/л, $\rho_{н.щ}=1,48$ кг/л. В бетонну суміш вводиться суперпластифікатор нафталін-формальдегідного типу з водоредукуючим ефектом 20%.

5.26. Розрахувати склад бетону з міцністю на стиск у 28 добовому віці не нижче 30 МПа, міцністю на розтяг при згині – 8 МПа та морозостійкістю – F200, марка бетонної суміші за рухомістю Р2. Визначити ефективність введення в бетонну суміш суперпластифікатора та повітрявтягуючої добавки.

Матеріали: Портландцемент М500 з НГ=28%, кварцовий пісок з водопотребою 8% , $\rho_n=2,61$ кг/л, гранітний щебінь з водопотребою 1.5%, фракції 5...20 мм, $\rho_{щ}=2,65$ кг/л та $\rho_{н.щ}=1,61$ кг/л. В бетонну суміш вводиться суперпластифікатор С-3, повітрявтягуюча добавка СНП.

5.27. Розрахувати склад золовмісного бетону класу за міцністю не нижче С20/25, міцністю після пропарювання не нижче 50%, а через 1 добу – 70% проектною міцністю. Морозостійкість бетону повинна бути не нижче F150. Марка бетонної суміші за рухомістю Р3. Режим пропарювання: $T=80^\circ\text{C}$, $\tau_{13}=7$ год.

Матеріали: Портландцемент М500, кварцовий пісок з водопотребою 9%, $\rho_n=2,65$ кг/л, гранітний щебінь з водопотребою 2.5%, фракції 5...20 мм, $\rho_{щ}=2,68$ кг/л та насипною густиною $\rho_{н.щ}=1,57$ кг/л. Кам'яновугільна зола-винесення.



Витрата золи – 100 кг/м^3 , коефіцієнт цементуючої ефективності – $0,21$, $\rho_3=2,34 \text{ кг/л}$. В бетонну суміш вводиться повітрявтягуюча добавка СНП.

5.28. Розрахувати за допомогою номограм (рис.5.13...5.16) склад бетону класу С20/25 з міцністю після пропарювання 70% від проектної. Марка бетонної суміші за рухомістю Р3.

Режим пропарювання: температура ізотермічного прогріву – 80°C , тривалість ізотермічного витримування 14 год.

Матеріали: цемент М500, нормальна густота 25%, водопотреба піску 9%, щебеню – 2%.

5.29. Розрахувати за приведеними нижче експериментально-статистичними моделями міцності бетону на стиск після пропарювання (y_1) і проектної міцності в 28 діб (y_2) значення: Ц/В для досягнення 50 та 70% міцності бетону класу С40/50 при тривалості теплової обробки 9 і 14 год. та застосуванні портландцементу з активністю $R_{ц}=52,5 \text{ МПа}$;

Експериментально-статистичні моделі:
проектна міцність бетону:

$$y_1 = 42,8 + 7x_1 + 3,12x_2 + 3,75x_3 + 0,88x_1x_2 + 1,0x_1x_3, \quad (5.86)$$

відпускна міцність після пропарювання:

$$y_2 = 59,3 + 9,44x_1 + 3,44x_2 + 3,06x_3 + 1,06x_1x_2, \quad (5.87)$$

де $x_1=(\text{Ц/В}-2,8)/0,4$; $x_2=(R_{ц}-62,5)/5,5$; $x_3=(\lg t-\lg 12)/0,1249$.

5.30. Розрахувати склад бетону класу С25/30 з марками за морозостійкістю та водонепроникністю F200 і W6. Для зниження витрат цементу при забезпеченні проектних вимог в бетонну суміш вводяться суперпластифікатор нафталінформальдегідного типу С-3 і повітрявтягуюча добавки СНП. Рухомість суміші Р2.

Матеріали: Портландцемент М500 з НГ=28%, кварцовий пісок з водо потребою 8%, $\rho_{п}=2,65 \text{ кг/л}$, гранітний щебінь з водопотребою 2,5%, фракції 5...20 мм, $\rho_{щ}=2,67 \text{ кг/л}$ та $\rho_{н.щ}=1,61 \text{ кг/л}$.



5.5. Коригування розрахункових складів. Робочі склади бетонних сумішей

Властивості бетонів і розчинів формуються в результаті складних фізико-хімічних процесів під впливом багатьох факторів, які в повній мірі врахувати в розрахункових методиках практично неможливо. Тому розрахункові номінальні склади бетонів і розчинів потребують експериментальної перевірки і уточнення. З цією метою в лабораторних умовах виконуються т.зв. *пробні заміси* і за результатами відповідних випробувань визначають уточнені склади бетонних сумішей, які забезпечують задані вимоги.

Залежно від конкретних можливостей будівельної лабораторії і графіка проведення робіт, об'єм лабораторних робіт при експериментальному уточненні складів бетонів може бути різним. Повне корегування досягається при експериментальному уточненні всіх параметрів складу суміші: водовмісту, водоцементного відношення, вмісту окремих фракцій у складі заповнювача, об'єму втягнутого повітря та ін. В окремих випадках можливе неповне лабораторне корегування (наприклад, лише водовмісту бетонної суміші, що забезпечує задану легкоукладальність, з подальшим уточненням інших параметрів суміші випробуванням бетону чи розчину виробничого виготовлення).

Експериментальна перевірка і корегування розрахункового складу. Для звичайного *важкого бетону* розрахунковий склад перевіряють на пробному замісі об'ємом 10 л або більше залежно від крупності заповнювачів і обсягу випробувань та визначають рухомість або жорсткість, а також середню густину бетонної суміші після її ущільнення у формі. Поряд з початковим розраховують додаткові склади при параметрах, що відрізняються в меншу і більшу сторону до 15% і більше. Кількість додаткових складів за кожним з параметрів має бути не менше двох.

Підвищення осадки конусу (*OK*) або зниження жорсткості суміші (*Ж*), якщо вони не відповідають заданим значенням, досягають послідовним додаванням у пробний заміс води і



цементу з забезпеченням прийнятого C/V . Зменшення OK або підвищення $Ж$ можна досягти послідовним додаванням піску і щебеню у співвідношенні, що знайдене розрахунком. Легкоукладальність бетонної суміші відповідає заданій, якщо осадка конусу має відхилення від неї не більше ± 1 см, а жорсткість – не більше ± 3 с.

У підбраному за легкоукладальністю номінальному складі бетону фіксують фактичну витрату кожного матеріалу на заміс (g_i) і визначають середню густину бетонної суміші ($\rho_{б.с.}$). Фактичні витрати матеріалів у кг на 1 м^3 суміші розраховують за формулами:

$$C_1 = \frac{\rho_{б.с.}}{\sum g} g_c; \quad П_1 = \frac{\rho_{б.с.}}{\sum g} g_n; \quad Ш_1 = \frac{\rho_{б.с.}}{\sum g} g_{ш}; \quad B_1 = \frac{\rho_{б.с.}}{\sum g} g_s, \quad (5.88)$$

де $g_c, g_n, g_{ш}, g_s$ – відповідно фактичні витрати цементу, піску, щебеню, води на заміс, кг,

$\sum g$ – сумарна маса всіх матеріалів у замісі, кг.

При введенні в бетонну суміш тонкодисперсних мінеральних наповнювачів їх фактичні витрати знаходять за аналогічними формулами.

Оптимізацію співвідношення заповнювачів досягають, змінюючи показник r – частку піску в суміші заповнювачів до встановлення мінімально можливої на даних матеріалах водопотреби бетонної суміші (рис. 5.18).

Для оптимізації розрахункового r при значеннях C_1 і B_1 , що забезпечують задану легкоукладальність суміші розраховують два допоміжні склади бетону з $r_1 = r + (0,03 \dots 0,05)$ і $r_2 = r - (0,03 \dots 0,05)$. (При необхідності число допоміжних складів може збільшуватись до чотирьох). Для цих складів перевіряють легкоукладальність. При її збільшенні і відсутності помітного водовідділення зменшується при заданому значенні OK або $Ж$ водовміст бетонної суміші і відповідно витрата цементу.

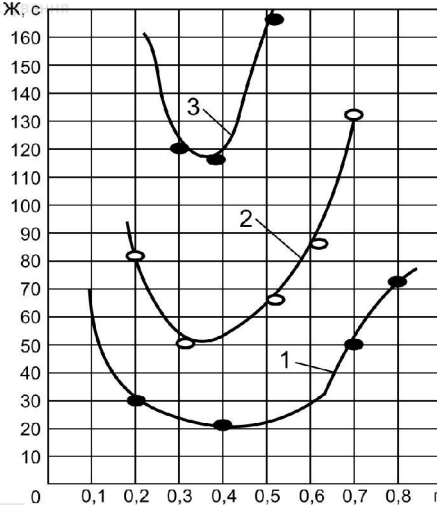


Рис. 5.18. Вплив частки піску на легкоукладальність бетонної суміші (за О. А. Гершбергом):
1. Номінальний склад 1:1 (цемент: суміш дрібного і крупного заповнювача). 2. Те ж, 1:1,5. 3. Те ж, 1:2

Наступною стадією експериментального корегування складів бетону є перевірка міцності в заданому віці, а при необхідності і після теплової обробки, залежно від цементно-водного відношення. За результатами визначення міцності бетону на початковому і додаткових складах будують при необхідності графічні залежності міцності бетону від Ц/В, або користуються інтерполяційними розрахунками. За цими залежностями визначають значення Ц/В, яке забезпечує отримання бетону з заданими показниками міцності.

Знайдені значення Ц/В, середньої густини бетонної суміші, витрати води і крупного заповнювача дають можливість розрахувати кількість цементу і дрібного заповнювача для номінального складу бетону.

На відміну від лабораторних (номінальних) складів бетону, що приводяться для сухих матеріалів, у виробничих умовах враховують, що пісок і щебінь (гравій) мають деяку вологість.



У робочих складах витрати дрібного (Π_p , кг/м^3) і крупного (Π_p , кг/м^3) заповнювачів збільшують на масу води, що знаходиться в них:

$$\Pi_p = \Pi \cdot (1 + W_n), \quad (5.89)$$

$$\Pi_p = \Pi \cdot (1 + W_{щ}), \quad (5.90)$$

де Π , Π - витрата піску і щебеню в номінальному складі;

W_n , $W_{щ}$ - вологість піску і щебеню, частки одиниці.

Відповідно виробничу витрату води ($B_{вр}$) зменшують на масу води, що знаходиться в заповнювачах:

$$B_p = B - \Pi \cdot W_n - \Pi \cdot W_{щ}. \quad (5.91)$$

У деяких випадках робочий склад бетону доцільно виражати в відносних масових частинах, при цьому частку цементу приймають рівній одиниці. В цьому випадку для робочого складу:

$$1 : \Pi : \Pi = \frac{\Pi}{\Pi} : \frac{\Pi_p}{\Pi} : \frac{\Pi_p}{\Pi} \quad (5.92)$$

Дозування матеріалів, кг на заміс обчислюють за формулою:

$$P_3 = V_3 P_i, \quad (5.93)$$

де V_3 - об'єм замісу, м^3 ,

P_i - витрата матеріалу в робочому складі, кг/м^3 .

Якщо бетонозмішувач, що використовується для приготування суміші, характеризується місткістю по об'єму сухих матеріалів, тоді попередньо визначається коефіцієнт виходу бетонної суміші (β_6) і об'єм замісу $V_3 = \beta_6 V_{6с}$, де $V_{6с}$ - об'єм бетонозмішувача. Коефіцієнт виходу звичайно знаходиться в межах 0,55-0,75 і характеризується відношенням



об'єму бетонної суміші до суми об'ємів цементу і заповнювачів в насипному стані:

$$\beta_{\delta} = \frac{1}{\frac{Ц}{\rho_{н.ц}} + \frac{П_p}{\rho_{н.п}} + \frac{Щ_p}{\rho_{н.щ}}}, \quad (5.94)$$

де $\rho_{н.ц}$, $\rho_{н.п}$, $\rho_{н.щ}$ – відповідно насипні густини цементу, піску і щебеню (гравію), кг/м^3 .

Призначення нового робочого складу бетонної суміші проводять, якщо за показниками вхідного контролю встановлена зміна якості матеріалів, що поступили в порівнянні з використаними раніше більш ніж на: 2,5 МПа фактичної міцності цементу; 1,5% нормальної густоти цементного тіста і вмісту глинистих, мулистих і пиловидних частинок; 2% вмісту піску в щебені або щебеню в піску; 50 кг/м^3 насипної густини пористого заповнювача; 0,5% вологості заповнювачів.

Коригування робочого складу проводять, якщо за показниками операційного контролю виробництва встановлено зміна на 2 см осадки конуса або 5 с жорсткості бетонної суміші. Враховують також зміну фактичної міцності і середньої густини (для легких і ніздрюватих бетонів) порівняно з необхідною у відповідності з нормативними вимогами.

Адаптація робочих складів. Задача адаптації складів полягає в їх корекції з уточненням емпіричних коефіцієнтів усереднених розрахункових залежностей, що використовуються, на основі "зворотного зв'язку" тобто результатів поточних випробувань бетону виробничого виготовлення. Періодичність адаптації залежить від стабільності вихідних матеріалів і виробничих параметрів і спрямована на досягнення проектних показників якості бетону при мінімально можливому коефіцієнті їх варіації. Для адаптації складів можливе використання звичайних, експресних і автоматичних способів визначення нормованих показників і технологічних параметрів.

Склади бетонної суміші можуть регулюватися за допомогою різних алгоритмів і вимірювальних комплексів при зміні таких технологічних параметрів як активність цементу,



вологість і гранулометрія заповнювачів, температура і тривалість теплової обробки й ін. Адаптація складів і їх регулювання дозволяють радикально підвищити ефективність статистичного контролю якості бетону, направити його не тільки на забезпечення надійності продукції, що виготовляється, але і на істотну економію цементу й інших ресурсів.

Найважливішою задачею адаптації розрахункових і лабораторних складів бетону є досягнення необхідних показників легкоукладальності виробничих складів бетонних сумішей і реєстрація їхньої фактичної водопотреби. На першому етапі до одержання інформації про міцність і інші властивості затверділого бетону в залежності від фактичної водопотреби перераховується витрата цементу при $C/V = \text{const}$ і співвідношення заповнювачів при відповідній зміні розрахункових значень частки піску в суміші заповнювачів g або коефіцієнта розсунення α .

Водопотреба (B_0) бетонної суміші, як показує обробка численних експериментальних даних, пов'язана з показником легкоукладальності (рухомості або жорсткості) P_y параболічною функцією типу:

$$B_0 = a + vP_y + cP_y^2 \quad (5.95)$$

де a, v, c – емпіричні коефіцієнти.

Фактичну водопотребу бетонної суміші (B_ϕ) у виробничих умовах можна визначити з умови:

$$B_\phi = B_0 + \Delta B, \quad (5.96)$$

де ΔB – показник збіжності лабораторних і виробничих значень водопотреби.

Коректування C/V може бути одно- або багатоступінчастим. Останнє проводиться спочатку для досягнення необхідної відпускної, потім проектної міцності, водонепроникності і т.д.

При адаптації відповідних розрахункових формул для визначення C/V типу: $f_{cm} = AR_y(C/V - v)$, для умов



конкретного виробництва необхідне уточнення коефіцієнтів A і ϵ . Побудова адаптованої залежності $f_{cm}=f(C/B)$ можлива, якщо надходить інформація, як мінімум, про два фактичні значення f_{cm} при двох різних значеннях C/B , (рис. 5.19).

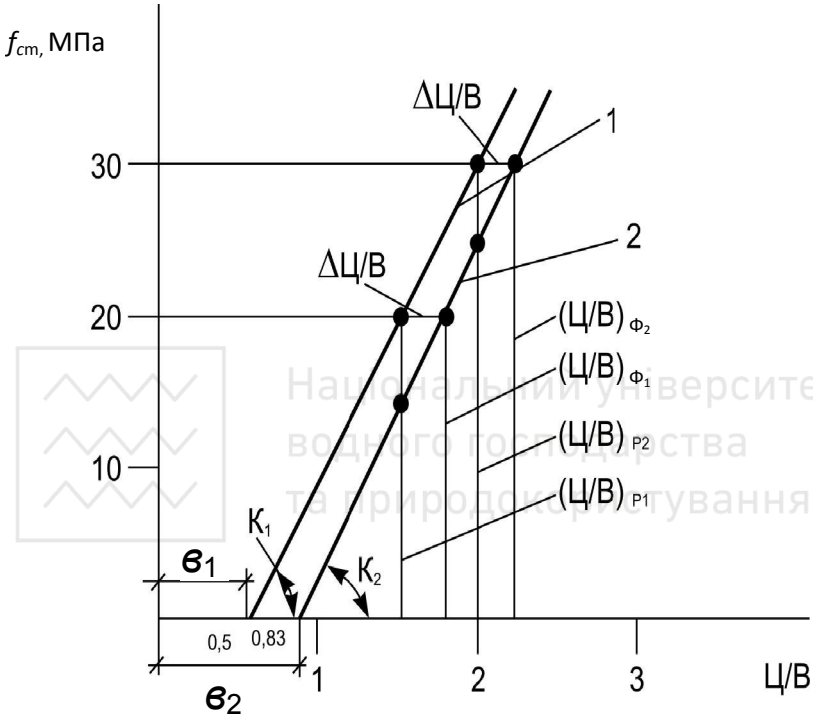


Рис. 5.19. Приклад графічної адаптації цементно-водного відношення:

1 – розрахункова залежність $f_{cm}=K(C/B-\epsilon)$;

2 – адаптована залежність $f_{cm}=f(C/B)$; $(C/B)_{p_1}$, $(C/B)_{\phi_1}$,

$(C/B)_{p_2}$, $(C/B)_{\phi_2}$ – відповідно розрахункові і фактичні значення C/B до і після коректування; ϵ_1 і ϵ_2 – значення коефіцієнта ϵ до і після коректування; K_1 і K_2 – значення коефіцієнта K до і після коректування



Тоді:

$$\epsilon = \frac{f_{cm_1} (C/B)_2 - f_{cm_2} (C/B)_1}{f_{cm_1} - f_{cm_2}}; \quad (5.97)$$

$$K = AR_u = \frac{f_{cm_1}}{(C/B)_1 - \epsilon} \text{ або } \frac{f_{cm_2}}{(C/B)_2 - \epsilon}. \quad (5.98)$$

Необхідне Ц/В можна знайти по формулі:

$$(C/B)^n = \frac{f_{cm}^n + \epsilon K}{K}. \quad (5.99)$$

Показники властивостей бетону, що досягаються фактично, дозволяють відкоригувати емпіричні коефіцієнти і в інших розрахункових формулах.

Коректування розрахункових залежностей, що застосовуються для визначення параметрів нестационарних технологічних процесів з урахуванням інформації “зворотного зв'язку”, є задачею *адаптивних систем керування*. В замкнутий контур сучасних адаптивних систем входять *оперативний ідентифікатор* – пристрій або програма обчислювального комплексу, що використовують дані поточних змін і спеціальні алгоритми для їхньої обробки. *Оперативна ідентифікація* – уточнення розрахункових залежностей і моделей – дає можливість як прогнозувати властивості функціонуючого об'єкта в міру зміни вихідних умов, так і керувати ними за допомогою спеціальних пристроїв-регуляторів.

Теорія ідентифікації має велику кількість алгоритмів, заснованих на настроюванні пропорційно градієнтові функції помилок, методі найменших квадратів, стохастичної апроксимації.

Системи управління складами бетону. На управління складами бетону, надійність забезпечення нормованих параметрів направлений статистичний контроль. Статистичний



контроль якості бетону полягає в коригуванні параметрів технології виробництва за допомогою вибіркового контролю продукції. У ході контролю перевіряють не всю заводську партію виробів або товарного бетону, а якусь частину, вибірку, об'єм якої повинен бути достатнім для того, щоб зробити висновок про якість усієї партії.

У процесі статистичного контролю з'ясовують, чи не вийшов контрольований показник якості виробу за допустимі межі, а також визначають розмір фактичного відхилення. Якщо контрольований показник знаходиться в допустимих межах, то технологічний процес протікає нормально, тобто знаходиться в допустимих межах, "у стані контролю". Як тільки контрольований показник наближається до верхньої або нижньої допустимої межі, виникає загроза появи дефектної продукції. У цьому випадку варто виявити причини порушення стабільності технологічного процесу і запобігти браку виробів.

Контрольованим показником якості важкого бетону звичайно є міцність на стиск, у деяких випадках визначають міцність на осьовий розтяг і на розтяг при згині. Контролюють нормовану міцність, тобто задане в проектній або нормативно-технічній документації значення міцності бетону у виробках і конструкціях. При цьому розрізняють наступні види нормованої міцності: відпускна міцність бетону в збірних конструкціях; передаточна міцність бетону в попередньо напружених конструкціях; проектна міцність бетону в збірних і монолітних конструкціях, яку необхідно досягти в проектному віці; міцність бетону в проміжному віці, встановлену проектною документацією для монолітних конструкцій.

Спочатку знаходять міцність бетону в кожній з партій, виготовлених на протязі початкового (*аналізованого*) періоду, потім обчислюють характеристики однорідності міцності за аналізований період. За цими характеристиками визначають середній рівень міцності бетону для наступного (*контрольованого*) періоду і параметри контрольної карти міцності.

Від кожної партії бетону відбирають з довільно обраних замісів не менше 2 проб бетонної суміші. За результатами



випробувань серій зразків обчислюють середні значення міцності бетону у вибірках f_{c_i} . За сукупністю середніх міцностей у вибірках обчислюють міцність бетону в партії f_{cm} , МПа за формулою:

$$f_{cm} = \sum_{i=1}^n \frac{f_{c_i}}{n}, \quad (5.100)$$

де n - загальне число вибірок у партії.

Однорідність бетону за міцністю характеризується середньоквадратичним відхиленням σ_m , коефіцієнтом варіації в одній окремій партії V_m (партійний) і коефіцієнтом варіації у всіх партіях аналізованого періоду $V_{m.n.}$ (міжпартійний). Для обчислення цих статистичних характеристик необхідно, щоб число вибірок у генеральній сукупності за весь аналізований період (від одного тижня до 2 міс.) було не меншим 30.

Міжпартійний коефіцієнт варіації обчислюють для N партій бетону, проконтрольованих на протязі аналізованого періоду:

$$V_{m.n.} = \sum_{i=1}^N V_m n_i / \sum_{i=1}^N n_i, \quad (5.101)$$

де $V_{m,i}$ - коефіцієнти варіації міцності бетону в проконтрольованих партіях;

n_i - число вибірок кожної i -тої із N партій бетону.

Протягом аналізованого періоду, до накопичення статистичної інформації, склад бетону підбирають виходячи з необхідної міцності:

$$f_{cm_T} = 1,1 \frac{C_n}{0,778} = 1,41 C_n \quad (5.102)$$

де C_n - нормований клас бетону.

На контрольований період, після накопичення необхідного статистичного матеріалу, установлюють середній рівень міцності :



$$f_{cm} = K_1 C_n, \quad (5.103)$$

де K_1 - коефіцієнт, величина якого залежить від $V_{м.п.}$:

$V_{м.п.}$	≤ 6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	≥ 16
K_1	1,1	1,12	1,14	1,19	1,22	1,29	1,34	1,43	1,49	1,59	1,64

Задовільна технологія характеризується коефіцієнтом варіації $V_{м.п.} \leq 14\%$.

Після накопичення статистичної інформації і обчислення середнього рівня міцності (контрольований період) проводять поточний аналіз результатів визначення міцності у вибірках і вносять, при необхідності, корективи до складу суміші або технологічного процесу. Такий аналіз прийнято проводити графічно на контрольних картах міцності бетону. Контрольна карта – це діаграма, на яку наносять результати вимірювання чи обчислення контрольованої характеристики продукції (рис. 5.20).

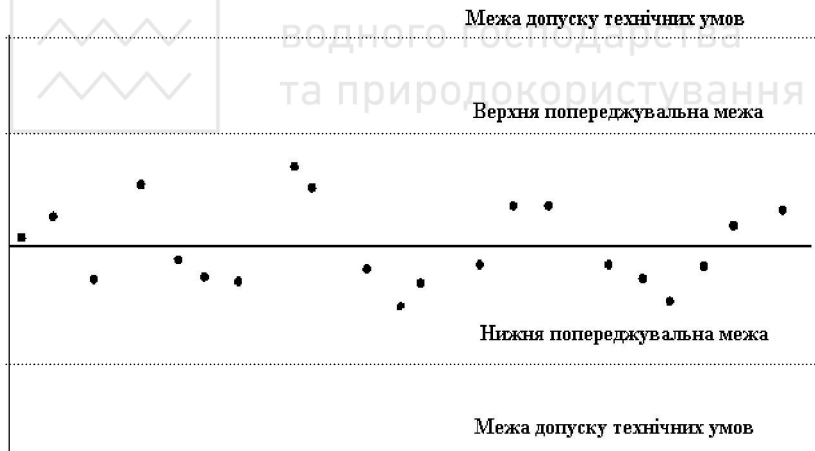


Рис. 5.20. Контрольна карта міцності бетону

Для розрахунку відповідних меж на контрольній карті користуються формулою:



$$\text{Межі карти} = f_{cm_y} \pm A\bar{W}, \quad (5.104)$$

де A – коефіцієнт, який залежить від середнього за контрольований період об'єму вибірки і заданої ймовірності (табл. 5.40);

\bar{W} – середній за аналізований період вибірковий розмах міцності, МПа.

Таблиця 5.41

Значення коефіцієнта A

Об'єм вибірки, n	Коефіцієнт попередження, $A_{0,025}$	Коефіцієнт коригування, $A_{0,001}$
2	1,229	1,937
3	0,668	1,054
4	0,476	0,750
5	0,377	0,594
6	0,316	0,498
7	0,274	0,432
8	0,244	0,384
9	0,220	0,347
10	0,202	0,317
11	0,185	0,294
12	0,174	0,274

\bar{W} визначають за формулою:

$$\bar{W} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_{m_i}}{N} \cdot K_2, \quad (5.105)$$

де N – кількість партій бетону в аналізованому періоді;

ρ_{m_i} – середньоквадратичне відхилення в кожній i -й з N партій;

K_2 – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від об'єму вибірки:



об'єм вибірки	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_2	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078

Для контрольованого періоду частота відбору виборок залежить від технологічного регламенту і від тієї швидкості, з якою зміна міцності може досягти контрольних меж технологічних карт, якщо відомо, що процес дрейфує. Швидкість дрейфу технологічного процесу виробництва товарного бетону і бетонних виробів залежить від ряду факторів, таких, як якість вихідних матеріалів, знос устаткування, продуктивність підприємства.

Для того, щоб уникнути погіршення якості продукції і сприяти своєчасному коригуванню, на картах повинні робитись оцінки про всі зміни умов виробництва бетону. Найбільш типові зміни:

- нове обладнання; нові партії сировини;
- переналагодження устаткування;
- регулювання технологічного процесу;
- зміна оператора; зміна контролера;
- ремонт і технічне обслуговування.

Вирішення основних задач управління складами бетону ефективно за допомогою комп'ютерних систем (КСУБС).

На рис. 5.21 приведена схема розробленої О.Л. Дворкіним комп'ютерної системи проектування і керування складами бетону (КСУБС) для Київського заводу ЗБВ ім. С.Ковальської. Як контрольовані параметри в цій системі приймаються середні значення фактичної міцності бетону на стиск в партії f_{cm}^{ϕ} визначені за результатами випробування проб в проміжному (3-добовому) і проектному віці.

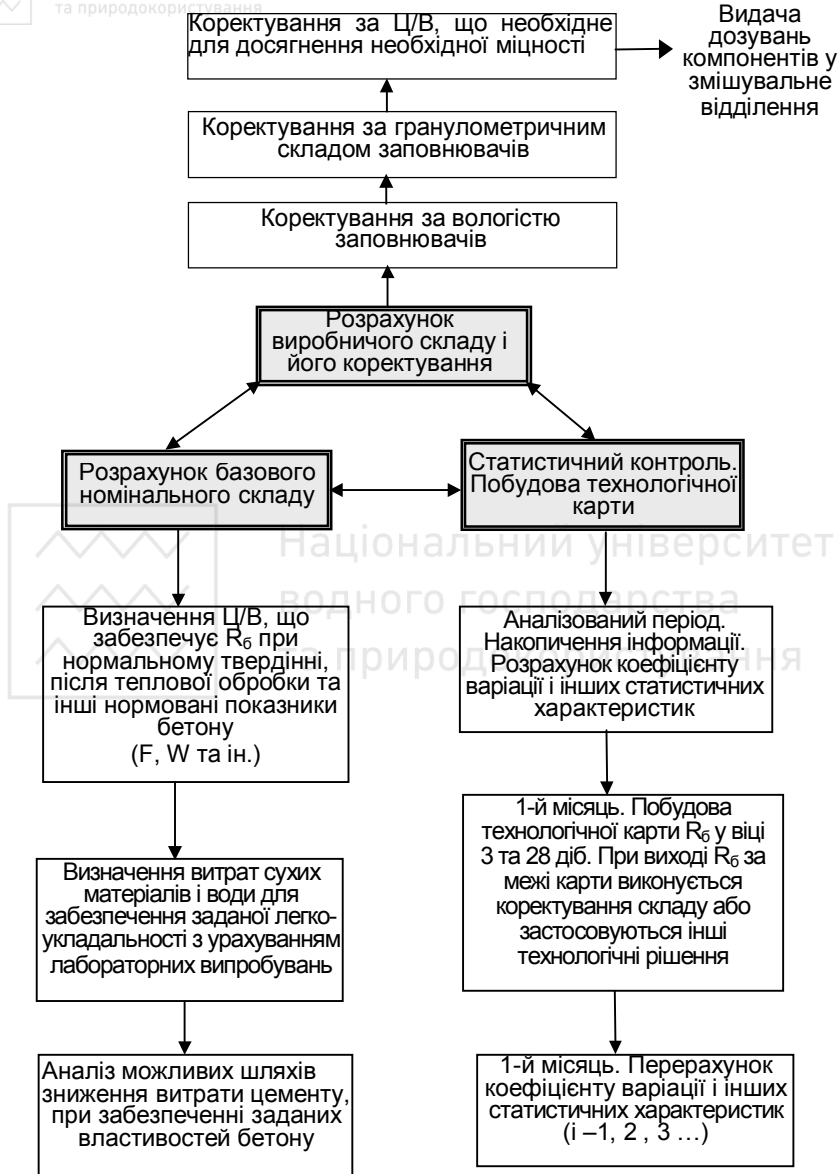


Рис. 5.21. Загальна схема роботи комп'ютерної системи КСУБС



Приклади

5.24. Експериментально перевірити і уточнити розрахунковий склад важкого бетону з рухомістю бетонної суміші $OK=5\dots 7$ см, міцністю на стиск у віці 28 діб 40 МПа та міцністю після теплової обробки 30 МПа.

Початковий розрахунковий склад: $C=380$ кг/м³; $B=190$ л/м³; $P=690$ кг/м³; $Щ=1140$ кг/м³; $r=0,37$; $\rho_{б.с.}=2385$ кг/м³.
Густина цементу, піску та щебеню: $\rho_{ц}=3,1$ кг/л; $\rho_{п}=2,65$ кг/л; $\rho_{щ}=2,70$ кг/л.

1. На пробному замісі об'ємом 10 л визначаємо, що фактична осадка конусу бетонної суміші розрахункового складу $OK=10$ см. При $r=0,37$ додаємо в суміш 34 кг/м³ піску (0,34 кг на заміс) 52 кг/м³ щебеню (0,52 кг на заміс) і визначаємо, що рухомість бетонної суміші зменшилась до $OK=5$ см.

Уточнюємо густину бетонної суміші ($\rho'_{б.с.}$) і за формулами (5.88) розраховуємо склад бетону:

$$\rho'_{б.с.} = 2375 \text{ кг/м}^3,$$

$$C_1 = \frac{2375}{3,8 + 1,9 + (6,9 + 0,34) + (11,4 + 0,52)} \cdot 3,8 = \frac{2375}{24,86} \cdot 3,8 = 363 \text{ кг/м}^3;$$

$$B_1 = \frac{2375}{24,86} \cdot 1,9 = 181 \text{ л/м}^3; \quad P_1 = \frac{2375}{24,86} \cdot 7,24 = 692 \text{ кг/м}^3;$$

$$Щ_1 = \frac{2375}{24,86} \cdot 11,92 = 1139 \text{ кг/м}^3.$$

2. Знаходимо оптимальне значення r , що забезпечує мінімальну водопотребу бетонної суміші. З цією метою розраховуємо два додаткових складу бетонів : №2 – $r=0,34$;
№ 3 – $r=0,41$.



Склад №2:

$$\text{– об'єм цементного тіста: } V_{ц.т.} = \frac{363}{3,1} + 181 = 298 \text{ л / м}^3 ;$$

$$\text{– об'єм заповнювачів: } V_3 = 702 \text{ л / м}^3 ;$$

$$\text{– витрата піску: } П = (702 \cdot 0,34) \cdot 2,65 = 632 \text{ кг / м}^3 ;$$

$$\text{– витрата щебеню – Щ} = (702 \cdot 0,68) \cdot 2,70 = 1288 \text{ кг / м}^3 .$$

$$\text{Приймаємо: } Ц_2 = 363 \text{ кг/м}^3 , B_2 = 181 \text{ л/м}^3 ;$$

Склад №3:

$$V_{ц.т.} = 298 \text{ л / м}^3 ; V_3 = 702 \text{ л / м}^3 ;$$

$$П = (702 \cdot 0,41) \cdot 2,65 = 763 \text{ кг / м}^3 ;$$

$$Щ = (702 \cdot 0,59) \cdot 2,70 = 1118 \text{ кг / м}^3 .$$

$$\text{Приймаємо: } Ц_3 = 363 \text{ кг/м}^3 , B_3 = 181 \text{ л/м}^3 ;$$

$$П_3 = 763 \text{ кг/м}^3 , Щ_3 = 1118 \text{ кг/м}^3 .$$

На пробному замісі встановлюємо, що для бетонної суміші складу №2 ОК=10 см, водовідділення не спостерігається, складу №3 – ОК=2 см.

В бетонній суміші складу №2 зменшуємо витрату води і цементу на 5% і переконаємося, що досягається ОК=5 см.

Приймаємо як оптимальний (до уточнення Ц/В) склад №4 бетонної суміші в кг/м³: Ц₄=345 кг/м³; B₄=172 л/м³; Ц/В=2; П₄=637 кг/м³; Щ₄=1300 кг/м³; ρ₆=2454 кг/м³.

Для уточнення Ц/В, що забезпечує як необхідну міцність після пропарювання, так і міцність в проектному віці розраховуємо два додаткових склади з Ц/В=2,3 і Ц/В=1,7.

$$\text{Склад №5: } Ц_5 = 396 \text{ кг/м}^3 ; B_5 = 172 \text{ л/м}^3 ;$$

$$П_5 = 586 \text{ кг/м}^3 ; Щ_5 = 1300 \text{ кг/м}^3 .$$

$$\text{Склад №6: } Ц_6 = 292 \text{ кг/м}^3 ; B_6 = 172 \text{ л/м}^3 ;$$

$$П_6 = 690 \text{ кг/м}^3 ; Щ_6 = 1300 \text{ кг/м}^3 .$$

Виготовляємо і випробовуємо контрольні зразки з бетонів складів №4, №5 і №6.



Результати випробувань наведені в табл. 5.41.

Таблиця 5.41

Результати випробувань контрольних зразків
бетонів складів №4, №5 і №6

Склад	Ц/В	Міцність на стиск через 4 год після пропарювання, МПа (f_{cm4})	Міцність на стиск через 28 діб, МПа (f_{cm28})
№4	2,0	26	36
№5	2,3	32	41
№6	1,7	19	29

Остаточню в якості номінального складу бетону з заданими показниками легкоукладальності бетонної суміші і міцністю приймаємо склад №5: $\rho_s=396 \text{ кг/м}^3$; $V_s=172 \text{ л/м}^3$; $\rho_s=586 \text{ кг/м}^3$; $\rho_s=1300 \text{ кг/м}^3$.

5.25. *Необхідно відкорегувати номінальний склад конструкційного керамзитобетону з міцністю в проектному віці 25 МПа, відпускною міцністю 70% проектною з середньою густиною в сухому стані 1630 кг/м^3 . Рухомість бетонної суміші $OK=1 \dots 4 \text{ см}$.*

Бетонна суміш виготовлена на портландцементі М500, II група ефективності при пропарюванні, керамзитовому ґравію з маркою 600 за насипною густиною і кварцовому піску з $M_k=2,5$.

Розрахунковий склад бетону: портландцемент – $C=350 \text{ кг/м}^3$; керамзитовий ґравій $K=377 \text{ кг/м}^3$; кварцовий пісок $\Pi=854 \text{ кг/м}^3$; вода: $V=200 \text{ л/м}^3$.

1. Відповідно до методики розраховуємо додатково два склади легкобетонної суміші з витратою цементу, що відрізняється на $\pm 20\%$. Розрахункові витрати матеріалів приведені в табл. 5.42. Об'єм замісу приймаємо 7 л і виготовляємо з нього зразки розміром $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ у кількості 6 шт.

2. В процесі виготовлення бетонної суміші відкорегуємо необхідну витрату води для досягнення заданої рухомості. Результати випробувань бетону приведені в табл. 5.42.



Таблиця 5.42

Склади керамзитобетону і результати випробувань

Показники	Склади		
	1	2	3
Розрахункові витрати матеріалів на 1м ³ бетонної суміші:			
цемент, кг	350	280	420
пісок, кг	854	940	768
керамзит, кг	377	367	388
вода, л	200	199	201
Витрата матеріалів на 7-літровий заміс:			
цемент, кг	2,45	1,96	2,94
пісок, кг	6,0	6,6	5,38
керамзит, кг	2,64	2,57	2,72
вода, л	1,4	1,39	1,41
Середня густина бетонної суміші, кг/м ³	1790	1790	1780
Осадка конуса через 20 хв після виготовлення, см	3	2	4
Фактичні витрати матеріалів на 1м ³ бетонної суміші:			
цемент, кг	351	280	420
пісок, кг	859	943	769
керамзит, кг	378	367	389
вода, л	203	200	204
Міцність при стиску, МПа:			
після теплової обробки (відпускна)	20,3	13,0	24,2
в 28-добовому віці(проектна)	29,2	21,0	34,0
Середня густина бетону після теплової обробки, кг/м ³	1728	1726	1729
Вологість бетону, %	6,0	6,0	5,8
Середня густина бетону в сухому стані, кг/м ³	1630	1628	1635



Графіки міцності бетону після пропарювання і в 28-добовому віці залежно від витрати цементу приведені на рис. 5.22.

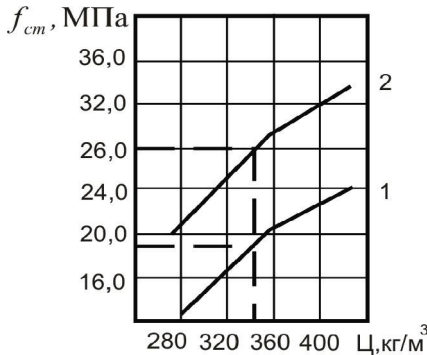


Рис. 5.22. Графіки залежності проектної (1) і відпускну (2) міцності керамзитобетону від витрати цементу

3. За рис. 5.22 знаходимо, що відпускна міцність 18 МПа відповідає витраті цементу 340 кг/м³. При цій витраті цементу проектна міцність відповідає заданій.

4. За формулою (5.106) знаходимо витрати піску, керамзиту та води:

$$M = M_1 + \frac{(C_0 - C_1)(M_2 - M_1)}{C_2 - C_1}; \quad (5.106)$$

$$П = 859 + \frac{(340 - 351)(943 - 859)}{280 - 351} = 862;$$

$$K = 378 + \frac{(340 - 351)(367 - 378)}{280 - 351} = 376;$$

$$B = 203 + \frac{(340 - 351)(200 - 203)}{280 - 351} = 202 \text{ л},$$

де M_1, M_2 – фактичні витрати матеріалів, кг/м³;

C_1 і C_2 – фактичні витрати цементу в пробних замісах, між якими знаходиться встановлена витрата цементу C_0 , кг/м³.

Остаточний склад керамзитобетону:

$$Ц=340 \text{ кг/м}^3; П=862 \text{ кг/м}^3; K=376 \text{ кг/м}^3; B=202 \text{ кг/м}^3.$$



5.26. В лабораторії підібрали наступний номінальний склад бетону: цемент (Ц) – 217 кг/м³, пісок (П) – 642 кг/м³. Щебінь (Щ) – 1258 кг/м³, вода (В) – 163 л/м³. Середня густина бетонної суміші – 2280 кг/м³. У виробничих умовах щебінь має вологість $W_{щ}=1\%$ за масою; пісок – 4%. Використовується бетонозмішувач з ємністю за об'ємом силових матеріалів – 500 л. Насипна густина цементу. Піску і щебня, кг/м³, відповідно: $\rho_{н.ц}=1200$; $\rho_{н.п}=1550$; $\rho_{н.щ}=1500$. Розрахувати виробничий склад бетону і витрату матеріалів на заміс бетонозмішувача.

1. За формулами (5.89), (5.90) та (5.91) розрахуємо витрати піску, щебеню та води:

$$P_p = 642 + 642 \cdot 0,04 \approx 668 \text{ кг/м}^3,$$

$$\text{Щ}_p = 1258 + 1258 \cdot 0,01 \approx 1270 \text{ кг/м}^3,$$

$$B_p = 163 - 642 \cdot 0,04 - 1258 \cdot 0,01 \approx 125 \text{ л/м}^3.$$

Робочий склад бетонної суміші:

$$\text{Ц}=217 \text{ кг/м}^3; \text{П}=668 \text{ кг/м}^3; \text{Щ}=1270 \text{ кг/м}^3; \text{В}=125 \text{ л/м}^3.$$

2. Розрахуємо коефіцієнт виходу бетонної суміші:

$$\beta = \frac{1}{\frac{217}{1200} + \frac{668}{1550} + \frac{1270}{1500}} = 0,68.$$

3. Знайдемо дозування матеріалів на заміс бетонозмішувача:

$$\text{Ц}_з = 217 \cdot 0,5 \cdot 0,68 = 74 \text{ кг/м}^3,$$

$$\text{П}_з = 668 \cdot 0,5 \cdot 0,68 = 227 \text{ кг/м}^3,$$

$$\text{Щ}_з = 1270 \cdot 0,5 \cdot 0,68 = 432 \text{ кг/м}^3,$$

$$\text{В}_з = 125 \cdot 0,5 \cdot 0,68 = 42 \text{ л/м}^3.$$



5.27. Запроектований склад бетону класу C20/25 при $V/C=2,0$. Міцність на стиск лабораторних зразків у 28-добовому віці 32,7 МПа.

При виробничій перевірці даного складу встановлено, що при незмінній активності цементу міцність на стиск зразків становила 25 МПа. Необхідно скорегувати розрахункову формулу для розрахунку C/V з врахуванням виробничих факторів, що впливають на міцність.

Для адаптації розрахункової залежності отримані результати випробувань міцності бетону при $C/V=1,6$. Вона становила 14 МПа.

Для коректування C/V на основі отриманих експериментальних даних необхідно встановити реальні значення коефіцієнтів в рівнянні міцності бетону (4.24).

Позначивши узагальненим коефіцієнтом $K=AR_c$, де R_c – активність цементу, рівняння міцності бетону можна записати:

$$f_{cm} = K(C/V - \epsilon).$$

За формулою (5.97) знайдемо значення коефіцієнта « ϵ » в розрахунковому рівнянні міцності:

$$\epsilon = \frac{25 \cdot 1,6 - 14 \cdot 2}{25 - 14} = 1,09$$

Значення коефіцієнту K знаходимо з формули (5.99):

$$K = \frac{25}{2,0 - 1,09} = 27,5$$

Необхідне C/V для забезпечення міцності 32,7 МПа знайдемо з врахуванням виконаного коректування з формули (5.99):

$$C/V = \frac{32,7 + 1,09 \cdot 27,5}{27,5} = 2,27.$$



Вправи

5.31. Номінальний склад бетонної суміші:

$\text{Ц}=355\text{кг/м}^3$; $\text{В}=185\text{ л/м}^3$; $\text{П}=650\text{ кг/м}^3$; $\text{Щ}=1130\text{ кг/м}^3$.

Розрахувати робочий склад бетонної суміші і витрати матеріалів на заміс бетонозмішувача. Вологість піску $W_{\text{п}}=4\%$, щебеню – $W_{\text{щ}}=2,5\%$. Ємкість барабана бетонозмішувача 500 л, насипна густина цементу $\rho_{\text{н.ц}}=1,35\text{ кг/л}$, піску – $\rho_{\text{н.п}}=1,63\text{ кг/л}$, $\rho_{\text{н.щ}}=1,47\text{ кг/л}$.

5.32. Відкорегувати розрахунковий склад бетону з міцністю бетону на стиск 40 МПа у 28-добовому віці та не менше 30 МПа у 7-добовому віці та рухомістю бетонної суміші ОК=10...15 см.

Початковий розрахунковий склад: $\text{Ц/В}=1,74$, $\text{Ц}=340\text{кг/м}^3$; $\text{В}=195\text{ л/м}^3$; $\text{П}=680\text{ кг/м}^3$; $\text{Щ}=1180\text{ кг/м}^3$; $r=0,36$; $\rho_{\text{б.с}}=2395\text{ кг/м}^3$. Густина цементу, піску та щебеню: $\rho_{\text{ц}}=3,1\text{ кг/л}$; $\rho_{\text{п}}=2,67\text{ кг/л}$, $\rho_{\text{щ}}=2,65\text{ кг/л}$.

Експериментальна перевірка початкового складу показала, що він забезпечує необхідну рухомість бетонної суміші і є задовільним за часткою піску в суміші заповнювачів. Фактична густина бетонної суміші – 2373 кг/м^3 .

Для уточнення складу бетонної суміші за умови міцності зі зміною Ц/В на $\pm 0,3$ при збереженні витрат щебеню і води, розраховані два додаткових складу бетонної суміші.

З бетонних сумішей трьох розрахованих складів бетонних сумішей виготовлені контрольні зразки, які випробувані на міцність при стиску у 3, 7 та 28 добовому віці нормального твердіння.

Результати випробувань наведені нижче:

Бетон	Ц/В	Міцність при стиску, МПа		
		3	7	28
№1	1,74	15,2	25,8	35,4
№2	1,44	10,5	19,7	26,3
№3	2,04	19,7	36,3	54,5

5.33. Відкорегувати водовміст бетонної суміші і необхідну частку піску в суміші заповнювачів. Рухомість бетонної суміші



3...5 см. Початковий розрахунковий склад бетонної суміші:
 $\rho=280 \text{ кг/м}^3$; $V=205 \text{ л/м}^3$, $P=750 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{ц}}=1150 \text{ кг/м}^3$.

Фактична осадка конуса бетонної суміші розрахункового складу 9 см. При $r=0,40$ після додавання в суміш по 5% піску та щебеню без зміни r та відповідного зменшення витрати води, осадка конуса зменшилась. Уточнена густина бетонної суміші 2390 кг/м^3 .

Для знаходження оптимального значення r розраховані два додаткових склади : №2 з $r=0,36$ і №3 з $r=0,42$, з рухомістю 10 см і 1 см. Зменшення в складі №2 витрати води і цементу відповідно на 6% привели до зниження осадки конусу до 4 см.

5.34. Відкоригувати номінальний склад конструкційного керамзитобетону з міцністю на стиск 28 добовому віці 20 МПа і середньою густиною в сухому стані 1630 кг/м^3 . Рухомість бетонної суміші 3...5 см.

Початковий розрахунковий склад бетонної суміші: портландцемент М500 $\rho=320 \text{ кг/м}^3$, керамзитовий гравій 390 кг/м^3 , кварцовий пісок – 880 кг/м^3 , вода – 200 л/м^3 . Додаткові два склади бетонної суміші відрізняються на 20% витратами цементу при однаковій густині бетону.

Випробувані склади керамзитобетону і результати випробувань наведені нижче:

Показники	Склади		
	1	2	3
Розрахункові витрати матеріалів, кг/м^3 :			
цемент	320	256	384
керамзитовий гравій	390	378	400
кварцовий пісок	880	960	806
вода	200	200	200
Середня густина бетонної суміші, кг/м^3	1790	1794	1790
Осадка конуса бетонної суміші, см	4	5	3
Міцність бетону на стиск в 28-добовому віці, МПа	25,2	18,3	32,5
Середня густина бетону в сухому стані, кг/м^3	1625	1636	1620



5.35. Запропонований номінальний склад бетону класу С16/20 з Ц/В=1.4. При виробничій перевірці даного складу встановлено, що при незмінній активності цементу міцність бетону на стиск становила 22 МПа. При Ц/В=1.7 міцність бетону досягла 29 МПа. Відкорегувати розрахункову формулу для знаходження цементно-водного відношення бетонної суміші з врахуванням впливу виробничих факторів.

5.36. Розрахувати, побудувати і проаналізувати карту статистичного контролю міцності за результатами випробувань 9 партій бетону класу С25/35 протягом роботи бетонного заводу в аналізованому періоді. В кожній партії було випробувано три вибірки зразків. Значення міцності бетону в кожній вибірці приведені нижче.

Номер партії	f_{cm_i}	Номер партії	f_{cm_i}	Номер партії	f_{cm_i}
1	45,5	4	46,4	7	48,4
	45,3		48,2		42,3
	41,5		42,3		44,5
2	44,8	5	45,4	8	46,8
	46,3		47,3		41,5
	42,8		48,5		43,6
3	49,3	6	47,2	9	47,4
	47,2		43,5		42,3
	44,5		46,4		42,9



6. ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ ОКРЕМИХ ВИДІВ БЕТОНІВ

Бетон є універсальним будівельним матеріалом, але особливості експлуатації його в конкретних умовах потребують і забезпечення відповідних властивостей. Залежно від комплексу нормованих властивостей для конкретних видів бетону розробляються необхідні алгоритми проектування їх складів. Для кожного виду спеціальних бетонів нормується комплекс характерних для нього будівельно-технічних властивостей, забезпечення якого потребує, зазвичай, застосування багатопараметричного проектування складів.

6.1. Дорожні та гідротехнічні бетони

Дорожні бетони «підрозділяють» на бетони для одношарових, верхнього та нижнього шарів двошарового покриття; основ доріг і аеродромів. За умовами тверднення дорожні бетони поділяють на бетони, що тверднуть у природних умовах і вкладаються при зведенні об'єкту (*монолітні бетони*) та бетони прискореного тверднення, які використовуються на заводах і полігонах для виробництва різних бетонних та залізобетонних виробів (*бетони для бетонних та залізобетонних виробів*). Цементні дорожні бетони підрозділяють також за видом і крупністю заповнювачів, консистенцією бетонних сумішей, показниками міцності й іншими ознаками.

Гідротехнічні бетони призначені для виготовлення конструкцій і зведення споруд, які постійно чи періодично знаходяться у воді. Конструкції із застосуванням гідротехнічного бетону поділяють на *масивні* та *немасивні*. Масивні конструкції вимагають спеціальних заходів для регулювання температурних напружень, які виникають при виділенні теплоти в бетоні.

Дорожні і гідротехнічні бетони поєднують жорсткі умови експлуатації і відповідно підвищені вимоги до властивостей, що визначають їхню довговічність.



Розрахунково-експериментальне проектування складів дорожніх і гідротехнічних бетонів може базуватися на рекомендованих обмеженнях значень В/Ц і інших параметрів їх складу (табл. 6.1...6.5), а також відповідних емпіричних залежностях, які дозволяють враховувати особливості вихідних матеріалів та інші технологічні фактори.

Таблиця 6.1
Граничні значення В/Ц залежно від марки бетону за морозостійкістю

Марка бетону за морозостійкістю, цикли (F)	Максимальне В/Ц
100	0,6
200	0,55
300	0,5
400	0,45
500	0,4

Водоцементне відношення для бетону одношарових і верхнього шару дорожніх та аеродромних покриттів повинно бути не більше 0,50; нижнього шару – не більше 0,60. Рекомендовані граничні значення В/Ц для гідротехнічного бетону приведені в табл. 6.2...6.4.

Таблиця 6.2
Рекомендовані гранично допустимі величини В/Ц для гідротехнічного бетону

Зона й умови експлуатації	Немасивні залізобетонні конструкції у воді		Зовнішня зона конструкцій масивних споруд у воді	
	морській	прісній	морській	прісній
Зона змінного рівня в кліматичних умовах: особливо суворих суворих помірних	0,42	0,47	0,45	0,48
	0,45	0,50	0,47	0,52
	0,50	0,55	0,55	0,58
Підводна зона: напірна безнапірна	0,55 0,60	0,58 0,62	0,56 0,62	0,58 0,62
	0,55	0,60	0,65	0,65
Надводна зона, частково омивана водою	0,55	0,60	0,65	0,65



Таблиця 6.3

Максимально допустимі величини водоцементного відношення для бетону різних споруд за рекомендаціями Американського інституту бетону

Тип споруд	Умови служби бетону					
	Суворий клімат із різкими коливаннями температури або частими змінами заморозування та відтавання (використовується бетон лише із втягнутим повітрям)			М'який клімат з рідкими переходами температури через нуль, дощовий або сухий клімат		
	на повітрі	у зоні змінного рівня води		на повітрі	у зоні змінного рівня води	
у прісній воді		у морській воді	у прісній воді		у морській воді	
Парапети, бордюри, пороги шлюзів і доків, армовані палі, труби	0,49	0,44	0,40*	0,53	0,49	0,40*
Підпірні стінки, контрфорси, мостові опори, прогони, балки	0,53	0,49	0,44*	**	0,53	0,44*
Зовнішні частини масивних споруд	0,58	0,49	0,44*	**	0,53	0,44*
Бетон для підводного бетонування	-	0,44	0,44	-	0,44	0,44

Примітки.* При використанні сульфатостійкого цементу максимально допустимі величини водоцементного відношення можуть бути підвищені на 0,045. ****** Величина водоцементного відношення повинна прийматися, виходячи з вимог до міцності та легкоукладальності.



Таблиця 6.4

Показники водонепроникності бетону і В/Ц

Вид бетону за проникністю	Показники проникності			
	прямі		непрямі	
	марка бетону за водонепроникністю	коефіцієнт фільтрації, см/с (при рівноважній вологості)	водопоглинання, % за масою	водоцементне відношення В/Ц не більше
Н-бетон нормальної проникності	W4	вище $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$	вище 4,7 до 5,7	0,6
П-бетон пониженої проникності	W6	вище $6 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$	вище 4,2 до 4,7	0,55
О-бетон особливо низької проникності	W8	вище $1 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-10}$	до 4,2	0,45

Таблиця 6.5

Граничні витрати цементу залежно від виду споруд

Зони споруди	Витрата цементу		
	Масивні гравітаційні греблі	Аркові греблі	Збірні гідроспоруди
Бетон змінного рівня води і на водозливі	275	290	300
Бетон зовнішньої зони в підводних частинах	240	-	290
Бетон внутрішньої зони	160	-	-
Бетон аркових гребель	-	280	-
Бетон фундаментних частин у підшві гребель	230	240	250



Зони споруди	Витрата цементу		
	Масивні гравітаційні греблі	Аркові греблі	Збірні гідроспоруди
Бетон зуба гребель	260	260	260
Інші частини споруд			
Рисберми	210	-	-
Понур	260	-	-
Днища шлюзів	250	-	-

Вибір алгоритму для рішення задач проектування складів дорожнього та гідротехнічного бетонів залежить від умов їх роботи в конструкціях і спорудах.

Бетон у дорожніх покриттях піддається впливу багаторазового повторюваних статичних і динамічних навантажень від транспортних засобів, а також комплексному впливу навколишнього середовища – зволоженню і висушуванню, нагріванню і охолодженню, заморожуванню та відтаванню з одночасним впливом солей, які застосовуються для боротьби з ожеледицею. Вимоги для дорожнього бетону залежать від конструкції покриття, положення шару бетону, інтенсивності навантаження, кліматичних умов.

Як для дорожнього, так і для гідротехнічного бетону однією з найбільш важливих властивостей, що забезпечують їх довговічність є *морозостійкість*. Для забезпечення необхідної морозостійкості бетонів важливо правильно підібрати об'єм втягнутого повітря. Він може бути призначений за нормативними рекомендаціями або орієнтовно розрахований за емпіричними залежностями. Наприклад, для гідротехнічних споруд із нормованою морозостійкістю F200 і вище, які експлуатуються в умовах насичення морською або мінералізованою водою, об'єм втягнутого повітря в бетонній суміші згідно ДСТУ БВ.2.7.-43-96 повинен відповідати значенням зазначеним у табл. 6.6.

Орієнтовно об'єм необхідного втягнутого повітря може бути знайдений також із формули (4.123).



Таблиця 6.6

Об'єм втягнутого повітря, що рекомендується для
гідротехнічного бетону з підвищеною морозостійкістю ($F \geq 200$)

Максимальна крупність заповнювача, мм	Об'єм втягнутого повітря у бетонній суміші, % при В/Ц		
	менше 0,41	0,41...0,50	більше 0,50
10	2...4	3...5	5...7
20	1...3	2...4	4...6
40	1...3	1...3	3...5
60	1...3	1...3	2...4

Рекомендовані значення об'єму втягнутого повітря для
дорожніх бетонів приведені в табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Рекомендований об'єм втягнутого повітря
для дорожніх бетонів

Призначення бетону	Вид добавок	Об'єм втягнутого повітря, V_0
Для одношарових і верхнього шару двошарових покриттів	Повітрявтягуюча або комплексна	5...6
	Газоутворююча або комплексна	3...4
Для нижнього шару двошарових покриттів	Повітрявтягуюча або комплексна	3,5...4,5
	Газоутворююча або комплексна	2...2,5
Для основ під асфальтобетонні покриття	Пластифікуюча типу ЛСТ	1...1,5
	Без добавок ПАР	0,5...1

Необхідний об'єм втягнутого повітря забезпечується
введенням повітрявтягуювальних добавок, дозування яких
визначається експериментально залежно від складу бетонних
сумішей (рис. 4.30).



Бетонне покриття дороги працює на згин як плита на пружній основі. Тому основним показником механічних властивостей дорожніх бетонів є *міцність на розтяг при згині*.

Міцність бетону на розтяг при згині ($f_{c,tf}$) можна орієнтовно розрахувати за формулою (6.1), що встановлює її зв'язок з міцністю при стиску:

$$f_{c,tf} = 0,36 f_{cm}^{2/3}. \quad (6.1)$$

Вона, також як і міцність на стиск, призначається залежно від виду покриття і положення шару бетону в конструкції покриття та інтенсивності розрахункового навантаження (табл. 6.8, 6.9).

Таблиця 6.8

Мінімальна проектна міцність дорожнього бетону

Призначення шару	Інтенсивність розрахункового навантаження, од/дїб	Мінімальна проектна міцність бетону, МПа	
		на стиск	на розтяг при згині
Одношарове покриття або верхній шар двошарового покриття	більше 2000	45	5,5
	від 1000 до 2000	40	5,0
	від 500 до 1000	30	4,5
	менше 500	25	4,0
Нижній шар двошарового покриття	більше 2000	-	4,5
	від 1000 до 2000	-	4,0
	від 500 до 1000	-	3,5
	менше 500	-	3,0
Монолітна основа під покриття цементобетонне	-	5	10
		10	15
		15	20



Таблиця 6.9

Мінімальна проектна міцність бетону для аеродромних покриттів

Аеродромне покриття	Проектна міцність бетону, МПа	
	на розтяг при згині	на стиск
Верхній шар і одношарове монолітне бетонне і залізобетонне покриття із ненапруженою арматурою	5,0	50
Одношарове збірне покриття із залізобетонних попередньо напружених плит: із дротяною арматурою або арматурними канатами	5,0	35
з прутковою арматурою	3,5	30
нижній шар двошарового покриття	3,5	25

Таблиця 6.10

Розрахункові значення міцності бетону на розтяг при згині $f_{c,tf}$ при використанні різних формул

Міцність цементу, МПа		Ц/В	$f_{c,tf} = 0,36f_{cm}^{2/3}$	$f_{c,tf} = 0,4R_{ct,cr}(Ц/В - 0,2)$	$f_{c,tf} = 0,39R_{ct,cr}(Ц/В - 0,1)$	$f_{c,tf} = 0,42R_{ct,cr}(Ц/В - 0,3)$
на згин $R_{ct,zg}$	на стиск R_{ct}					
5,5	40	1,5	3,0	2,9	3,0	2,8
		2,5	4,8	5,1	5,1	5,1
6	50	1,5	3,5	3,1	3,3	3,0
		2,5	5,5	5,5	5,6	5,5
6,5	60	1,5	3,9	3,4	3,5	3,3
		2,5	6,2	6,0	6,1	6,0
7,5	60	1,5	3,9	3,9	4,1	3,8
		2,5	6,2	6,0	7,0	6,9



Для розрахунків складів дорожніх бетонів можна також застосовувати формули, що пов'язують міцність на розтяг бетону при згині і відповідно міцність цементу на згин ($R_{ц.зг.}$) при його стандартному випробуванні.

З них можна виділити формули:

- Ю.М. Баженова:

$$f_{c,tf} = AR_{ц.з}(\mathcal{C} / B - 0,2); \quad (6.2)$$

- СоюзДорНДІ:

$$f_{c,tf} = AR_{ц.з}(\mathcal{C} / B - 0,1) \quad (6.3)$$

- ХНАДУ:

$$f_{c,tf} = 0,42 A_1 A_2 R_{ц.з}(\mathcal{C} / B - 0,3). \quad (6.4)$$

У формулі (6.2) $A=0,42$ для високоякісних матеріалів, 0,4 – для рядових і 0,37 – пониженої якості. Значення A в формулі (6.3) для бетону без пластифікуючих добавок – 0,39, із пластифікуючими – 0,38, повітровтягувальними – 0,34, газоутворюючими добавками – 0,36.

Формула (6.4) дає можливість врахувати консистенцію суміші, вид щебеню і піску. При застосуванні рухомих і жорстких бетонних сумішей значення коефіцієнта A_1 при використанні вапнякового і шлакового щебеню відповідно рівні 1,17 і 1,22; фракціонованого гранітного щебеню 1,08 і 1,13; фракціонованого гравію – 1,0 і 1,05; рядового гравію – 0,90 і 0,95 і щебеню, який має пилувато-глиняну плівку – 0,85. Значення коефіцієнта A_2 залежать від виду піску: при застосуванні штучного піску (висівок) $A_2=1,15$; чистого кварцового піску – 1,0; піску з окатаними зернами, а також забрудненого – 0,93.

У табл. 6.10 наведені розрахункові значення $f_{c,tf}$ при використанні формул (6.1...6.4) і застосуванні рядових матеріалів.



Для визначення $f_{c,tf}$ за формулою (6.1) розраховували спочатку за виразом $f_{cm} = AR_u(C/B - b)$ міцність бетону на стиск f_{cm} , при цьому активність цементу R_u приймали рівною його марці при даному значенні $R_{u,зг}$.

Аналіз даних табл. 6.10 показує, що величини $f_{c,tf}$, обчислені за формулами (6.2...6.4) досить близькі. Відхилення дещо підвищується при використанні формули (6.1), однак залишається при цьому порівняно низьким (до 8...10%) при мінімально допустимих співвідношеннях $R_{u,зг}$ і R_u . У багатьох випадках фактичне співвідношення $R_{u,зг}$ і R_u є значно вище нормативного і тоді розрахункові значення $f_{c,tf}$ за формулою (6.1) є заниженими. Вибір формул для визначення $f_{c,tf}$ бетону також як і ряду інших його показників нормованих властивостей і відповідно водоцементного відношення значною мірою повинен визначатися наявною вихідною інформацією.

Для безпосереднього врахування впливу втягнутого повітря ($V_{n.в}$) на необхідне Ц/В та досягнення заданої міцності бетону на розтяг при згині може бути застосована формула СоюзДорНДЦ:

$$C/B = \frac{f_{ct.f}}{0,39R_{u,зг}(1 - 0,025V_{n.в})} + 0,1 \quad (6.5)$$

Врахування впливу втягнутого повітря здійснюється також формулами, що зв'язують міцність бетону з "приведеним" Ц/В.

Тріщиностійкість бетону в умовах розвитку усадочних і термічних напружень визначається багатьма властивостями: міцністю при розтягу, тепловідленням, повзучістю, модулем пружності, усадкою та ін. Для більшості цих властивостей розроблені наведені раніше залежності, що пов'язують їх з основними параметрами складу як прямо, так і через кореляцію з міцністю бетону.

Опір бетону виникненню тріщин значною мірою характеризується його граничною деформацією при розтягу або



граничною розтяжністю ε_{gr} . Прямі визначення ε_{gr} пов'язані з досить складними випробуваннями. За експериментальними даними ε_{gr} бетону складає $(5...15) \cdot 10^{-5}$. В конструктивних розрахунках усереднену величину ε_{gr} зазвичай приймають $1 \cdot 10^{-4}$. Найбільш близькі до експериментальних значення ε_{gr} , визначені зі співвідношення (4.87) міцності бетону на розколювання до динамічного модуля пружності.

При додатковому нормуванні властивостей бетону, що впливають на його експлуатаційну надійність, знаходження складу вимагає встановлення визначальних показників, досягнення яких забезпечує й всі інші властивості. При цьому при нормуванні граничної розтяжності, модуля пружності, тепловиділення, усадочних деформацій можливі обмеження по витраті цементу і водовмісту бетонної суміші. Відомо, наприклад, що збільшення вмісту цементу в бетоні підвищує його міцність при розтягу, але разом з тим призводить до росту тепловиділення; використання заповнювачів із більшою крупністю зерен дає можливість зменшити витрату цементу, але приводить до збільшення модуля пружності, застосування повітрявтягувальних добавок дозволяє знизити витрату цементу для морозостійких бетонів і модуль пружності, але знижує міцність бетону і зменшує теплопровідність бетону і т.п.

Вибір необхідних технологічних рішень обумовлений конкретними виробничими можливостями. Наприклад, одночасне підвищення міцності бетону на розтяг і зменшення тепловиділення можна досягти шляхом застосування пластифікуючих добавок, зниженням температури бетону, переходом на більш жорсткі суміші.

У табл. 6.11–6.13 наведені схеми деяких характерних алгоритмів розрахунків складів дорожніх і гідротехнічних бетонів із застосуванням емпіричних залежностей.



Таблиця 6.11

Схема алгоритму проектування складів дорожнього і немасивного гідротехнічного бетону з заданою морозостійкістю

1. Визначають необхідний середній рівень міцності (f_{cm_1}) бетону, що забезпечує заданий клас бетону за міцністю на стиск.
2. Визначають міцність бетону на стиск (f_{cm_2}), що забезпечує значення інших нормованих властивостей бетону.
3. Для подальшого розрахунку вибирають порівнянням f_{cm_1} і f_{cm_2} більше значення міцності бетону на стиск.
4. За формулою (4.123) або нормованих рекомендацій визначають об'єм втягнутого (емульгованого за допомогою повітрявтягувальної добавки) повітря V_{n_1} , що забезпечує при заданій міцності необхідну марку за морозостійкістю. З цією метою можуть бути застосовані і нормативні рекомендації.
5. Уточнюють необхідне значення міцності бетону з урахуванням впливу втягнутого повітря.
6. Розраховують В/Ц бетонної суміші, що забезпечує необхідну міцність бетону на стиск.
8. Знаходять витрату води з урахуванням легкоукладальності бетонної суміші й особливостей заповнювачів.
9. Визначають витрату цементу та інших компонентів бетонної суміші.

Таблиця 6.12

Схема алгоритму проектування складів масивного гідротехнічного бетону з обмеженням температури розігріву

1. Визначають середній рівень міцності бетону в проектному віці та в 28 діб.
2. Розраховують В/Ц бетонної суміші, що забезпечує задану міцність бетону на стиск.
3. Визначають витрату води для забезпечення заданої легкоукладальності бетонної суміші.
4. Визначають витрату цементу.



5. З урахуванням питомого тепловиділення і витрат цементу знаходять тепловиділення бетону (Q_{τ}).

6. Визначають необхідну температуру укладання бетонної суміші ($t_{\delta,n}$). З цією метою застосовують формулу:

$$t_{\delta,n} \leq t_{\delta,кр} - K \frac{Q_{\tau}}{c\rho_o}, \quad (6.6)$$

де $t_{\delta,кр}$ – лімітоване значення температури бетону для визначеного терміну тверднення (температура розігріву);

c – питома теплоємність бетону;

ρ_o – середня густина бетону, кг/м^3 ;

K – коефіцієнт, що залежить від умов охолодження ($K=0,8\dots 1,0$).

7. Витрату заповнювачів знаходять, визначивши коефіцієнт розсушення α залежно від витрати цементу і V/C .

8. При необхідності визначають можливі технологічні рішення для досягнення розрахункової температури вкладання бетонної суміші.

Таблиця 6.13

Схема алгоритму проектування складів гідротехнічного бетону з обмеженням ступеня вилугування

1. Визначають необхідну витрату цементу, що забезпечує несучу здатність бетону при допустимому ступені вилугування:

$$C = \frac{Q_{CaO}}{\alpha_s q_{CaO} L}, \quad (6.7)$$

де Q_{CaO} – кількість оксиду кальцію в розрахунку на 1 см^2 поверхні, що може бути винесена з бетону без втрати ім несучої здатності, г/см^3 ;

α_s – допустима ступінь вилугування CaO із цементу;

q_{CaO} – вміст оксиду кальцію на 1 г цементу;

L – товщина конструкції, м .



2. Знаходять необхідний коефіцієнт фільтрації бетону:

$$K_{\phi} = \frac{Q_{CaO}L}{C_{CaO}H\tau}, \quad (6.8)$$

де C_{CaO} – середня концентрація CaO в цементі за час вилуговування, г/см³;

H – напір води, м;

τ – розрахунковий термін служби споруди, роки.

3. Визначають міцність бетону, необхідну для забезпечення розрахункового коефіцієнта фільтрації:

$$f_{cm} = \left(\frac{K_{\phi}}{126} \right)^{-0,13}. \quad (6.9)$$

4. Визначають необхідне B/C для забезпечення розрахункової міцності бетону.

5. Визначають витрату води і заповнювачів бетону.

Приклади

6.1. Розрахувати склад бетону для одношарового покриття автомобільної дороги з заданими показниками міцності на стиск $f_{cm}=30$ МПа і згин $f_{c,t}=4,3$ МПа. Марка бетону за морозостійкістю F300. Бетонна суміш укладається в покриття бетоноукладальною машиною ($OK=2$ см).

Вихідні матеріали: портландцемент М500, НГ=25,5%; кварцовий пісок із модулем крупності $M_k=2,2$, вмістом відмулюваних домішок 2,5%, густиною $\rho_n=2,67$ кг/л; гранітний щебінь фракції 5...40 мм, $\rho_{щ}=2,7$ кг/л, $\rho_{н.щ}=1,4$ кг/л; вміст відмулюваних частинок 0,8%. Вводиться повітрявтягувальна добавка.

Для розрахунку використовуємо алгоритм, наведений в табл. 6.11.



1. Визначаємо за формулою (6.1) необхідну міцність при стиску (f_{cm_1}), що забезпечує нормовану міцність при згині:

$$f_{cm_1} = 40,8 \text{ МПа}.$$

2. Оскільки $f_{cm_1} > f_{cm}$ приймаємо її для подальших розрахунків.

3. За формулою (4.123) визначаємо необхідний об'єм втягнутого повітря, V_{n_1} , що забезпечує при заданій міцності необхідну марку бетону за морозостійкістю. Коефіцієнти A_1, A_2 вибираємо з урахуванням рухомості бетонної суміші:

$$V_{n_1} = \frac{\ln\left(\frac{F}{0,91 \cdot R_{cm}^{1,47}}\right)}{0,35} = \frac{\ln\left(\frac{300}{0,91 \cdot 40,8^{1,47}}\right)}{0,35} \approx 1\%.$$

4. Уточнюємо значення міцності бетону з урахуванням впливу втягнутого повітря:

$$f'_{cm} = 40,8 - 0,05 \cdot 1 \cdot 40,8 = 38,8 \text{ МПа}.$$

5. Необхідна міцність бетону на стиск, що забезпечує задані міцність при згині і морозостійкість із урахуванням втягнутого повітря:

$$f''_{cm} = 40,8 \frac{40,8}{38,8} \approx 43 \text{ МПа}.$$



6. Розраховуємо B/C бетонної суміші, що забезпечує розрахункову міцність бетону на стиск. Приймаємо коефіцієнт $A=0,55$:

$$B / C = \frac{AR_u}{R_{сж} + 0,5 AR_u} = \frac{0,55 \cdot 50}{43 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 50} = 0,49.$$

7. Витрата води для заданої рухомості бетонної суміші з урахуванням особливостей заповнювачів складе 180 л/м^3 (табл. 5.4).

8. Витрата цементу:

$$C = \frac{B}{B / C} = \frac{180}{0,49} = 368 \text{ кг/м}^3.$$

9. Витрата щебеню (коефіцієнт розсунення $\alpha_p=1,39$; пористість щебеню $\Pi_{щ} = \frac{\rho_{щ} - \rho_{н.щ}}{\rho_{щ}} = \frac{2,7 - 1,4}{2,7} = 0,48$):

$$\Pi_{щ} = \frac{1000}{\frac{1}{2,7} + 1,39 \cdot 0,48 \frac{1}{1,4}} = 1181 \text{ кг/м}^3.$$

10. Витрату піску знайдемо з урахуванням втягнутого повітря:

$$\Pi = \left(1000 - \frac{368}{3,1} - \frac{1181}{2,7} - 180 - 10 \right) \cdot 2,67 = 680 \text{ кг/м}^3.$$

Розрахунковий склад бетону: $C=368 \text{ кг/м}^3$; $B=180 \text{ кг/м}^3$; $\Pi_{щ}=1181 \text{ кг/м}^3$; $\Pi=680 \text{ кг/м}^3$; $V_{нс}=10 \text{ л/м}^3$.



6.2. Розрахувати склад цементного дорожнього бетону для монолітного одношарового покриття дороги II-ої категорії з інтенсивністю навантаження більше 2000 од/дїб з міцністю на розтяг при згині не менше $f_{c,tf}=5,5$ МПа, на стиск $f_{cm}=45$ МПа. Бетонна суміш має марку за рухомістю P1 ($OK=1...4$ см).

Для отримання бетонної суміші застосовують портландцемент М500, пісок з $B_n=7,5\%$, $\rho_n=2,65$ кг/л, щебінь крупністю 5...20 мм з $\rho_{ц}=2,6$ кг/л, $\rho_{н,ц}=1,45$ кг/л.

В бетонну суміш вводиться повітрявтягуюча добавка.

1. За табл.6.7 знаходимо рекомендований для бетону вміст втягнутого повітря: $V_{n,e}=5\%$.

2. Для розрахунку Ц/В застосовуємо формулу СоюзДорНДІ прийнявши міцність цементу на згин $R_{ц,зг}=6$ МПа (відповідно до його марки М500):

$$\begin{aligned}Ц / В &= \frac{f_{ct.f}}{0,39 R_{ц,зг} (1 - 0,025 V_{n,e})} + 0,1 = \\ &= \frac{5,5}{0,39 \cdot 6 (1 - 0,025 \cdot 5)} + 0,1 = 2,79\end{aligned}$$

Перевіряємо за формулою (4.26) чи забезпечується при знайденому Ц/В задана міцність на стиск:

$$f_{cm1} = 0,4 \cdot 50(2,79 + 0,5) = 65,8$$

$$f_{cm1} > f_{cm}$$



4. Витрата води для забезпечення ОК=1...4 см на заданих матеріалах (табл. 5.5):

$$B=190 \text{ л}$$

5. Витрата цементу:

$$Ц=190 \cdot 2,79=530 \text{ кг/м}^3$$

6. Витрату щебеню знаходимо за формулою (5.16). За умови досягнення підвищеної *легкооброблюваності*, достатньої рівної поверхні покриття, однорідності та нерозшаровуваності бетонної суміші під час транспортування значення коефіцієнта α приймаємо більш високим, ніж рекомендовано для звичайних важких бетонів. При застосуванні дрібних пісків СоюзДорНДІ рекомендовано приймати мінімальне значення α – 1,7, середніх – 1,8, крупних – 1,9...2,0. Для даного прикладу $\alpha=1,8$. Пустотність щебеню:

$$P_{щ} = \frac{2,6 - 1,45}{2,6} = 0,44.$$

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1,8 \cdot 0,44}{1,45} + \frac{1}{2,6}} = 1087 \text{ кг/м}^3$$

7. Витрата піску (враховуючи, що об'єм втягнутого повітря $V_{n.в}=50 \text{ л/м}^3$):

$$П = \left(1000 - \frac{530}{3,1} - \frac{1087}{2,6} - 190 - 50 \right) \cdot 2,65 = 453 \text{ кг/м}^3$$

Розрахунковий склад бетону: $Ц=511 \text{ кг/м}^3$; $B=190 \text{ л/м}^3$;
 $П=453 \text{ кг/м}^3$; $Щ=1087 \text{ кг/м}^3$; $V_{n.в}=50 \text{ л}$.



6.3. Розрахувати склад бетону для блока греблі ГЕС з міцністю на стиск 22 МПа у віці 180 діб із температурою розігріву у віці 28 діб не більше 28°C. Рухомість бетонної суміші ОК=2 см. Визначити необхідну температуру вкладання бетонної суміші при використанні:

а) портландцементу М400 ($q_{28}^{нц} = 315 \text{кДж / кг}$);

б) шлакопортландцементу М300 ($q_{28}^{шпц} = 250 \text{кДж / кг}$).

Заповнювачі: кварцовий пісок із модулем крупності $M_k=1,7$, $\rho_n=2,67 \text{ кг/л}$; гранітний щебінь фракції 5...40 мм; пористість щебеню $\Pi_{щ} = 0,49$; $\rho_{щ}=2,7 \text{ кг/л}$ і $\rho_{н.щ}=1,45 \text{ кг/л}$.

1. За логарифмічною формулою $f_{cm}^{28} = f_{cm}^{180} \frac{\lg 28}{\lg 180}$

знайдемо середній рівень міцності бетону в 28 діб:



$$f_{cm}^{28} = 22 \frac{\lg 28}{\lg 180} = 15 \text{ МПа.}$$

2. Необхідне В/Ц за формулою (4.25) приймаючи $A = 0,55$ при використанні:

– портландцементу ($R_c = 40 \text{ МПа}$):

$$B / Ц = \frac{0,55 \cdot 40}{15 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 40} = 0,85$$

– шлакопортландцементу ($R_c = 30 \text{ МПа}$):

$$B / Ц = \frac{0,55 \cdot 30}{15 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 30} = 0,71.$$

3. Витрата води (табл. 5.4) з врахуванням необхідної рухомості бетонної суміші і якості вихідних матеріалів: $B=180 \text{ л/м}^3$.

4. Витрата цементу при використанні:

- портландцементу $Ц=180:0,85=212 \text{ кг/м}^3$;



- шлакопортландцементу: $C=180:0,71=254 \text{ кг/м}^3$.

5. Розраховуємо витрати заповнювачів. Для бетонної суміші на:

- портландцементі ($\alpha=1,38$):

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1}{2,7} + 1,38 \frac{0,49}{1,4}} = 1176 \text{ кг/м}^3$$

$$П = \left(1000 - \frac{212}{3,1} - 180 - \frac{1176}{2,7} \right) \cdot 2,67 = 843 \text{ кг/м}^3;$$

- шлакопортландцементі ($\alpha=1,32$):

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1}{2,7} + 1,32 \frac{0,49}{1,4}} = 1204 \text{ кг/м}^3;$$

$$П = \left(1000 - \frac{254}{3,1} - 180 - \frac{1204}{2,7} \right) \cdot 2,67 = 780 \text{ кг/м}^3.$$

6. Розрахункові склади бетону:

- при застосуванні портландцементу:

$$C=212 \text{ кг/м}^3; Щ=1176 \text{ кг/м}^3; П=843 \text{ кг/м}^3; B=180 \text{ кг/м}^3; \\ \rho_6=2411 \text{ кг/м}^3;$$

- при застосуванні шлакопортландцементу:

$$C=254 \text{ кг/м}^3; Щ=1204 \text{ кг/м}^3; П=780 \text{ кг/м}^3; B=180 \text{ кг/м}^3; \\ \rho=2418 \text{ кг/м}^3.$$

7. Знаходимо за формулою (3.22) тепловиділення бетону:

- на портландцементі при питомому тепловиділенні

$$q_{28}^{тл} = 315 \text{ кДж/кг},$$



$$Q_{28}^{n.ч} = 315 \cdot 212 = 66780 \text{ кДж.}$$

– на шлакопортландцементі при $q_{28}^{шпч} = 250 \text{ кДж/кг}$

$$Q_{28}^{шпч} = 250 \cdot 254 = 63500 \text{ кДж.}$$

8. Температуру укладання бетонної суміші розрахуємо за формулою (6.6) при ($K=0,8$; $c=0,966 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$) і використанні:

$$\text{– портландцементу: } t_n = 28 - 0,8 \frac{66780}{0,966 \cdot 2400} \leq 5^\circ \text{C};$$

$$\text{– шлакопортландцементу: } t_n = 28 - 0,8 \frac{63500}{0,966 \cdot 2400} \leq 6^\circ \text{C}.$$

6.4. Розрахувати склад бетону гідротехнічної споруди з міцністю на стиск 30 МПа у 28 діб, експлуатованої в м'якій воді під напором $H=5 \text{ м}$, товщиною $L=0,50 \text{ м}$. Розрахунковий термін служби споруди $\tau=50 \text{ років}$. Застосовується портландцемент М500 з вмістом оксиду кальцію $q_{CaO}=0,65 \text{ г}$ на 1 г цементу. Допустимий ступінь вилугування СаО, що не приводить до істотного зниження міцності від сумарного вмісту цементу прийняти $\alpha_6=0,2$; середню концентрацію СаО за час вилугування $C_{CaO}=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$.

Експериментально встановлено, що кількість СаО, яка може бути винесена з бетону без втрати їм несучої здатності $Q_6=1,95 \text{ г/см}^3$.

Бетонна суміш має рухомість ОК=3...4 см. Заповнювачі: кварцовий пісок із водопотребою $B_n=8\%$, $\rho_n=2,67 \text{ кг/л}$, гранітний щебінь фракції 5-40 мм із $\rho_{щ} = 2,7 \text{ кг/л}$ і $\rho_{н.щ} = 1,4 \text{ кг/л}$.

Для розрахунку використовуємо алгоритм, наведений у табл. 6.13.

1. Мінімально необхідна витрата цементу при допустимому ступені вилугування, що забезпечує несучу здатність бетону за формулою (6.7):



$$\Pi = \frac{1,95}{0,2 \cdot 0,65 \cdot 50} = 0,3 \text{ г/см}^3 \text{ або } 300 \text{ кг/м}^3.$$

2. Необхідний коефіцієнт фільтрації (6.8):

$$K_{\phi} = \frac{1,95 \cdot 50}{(0,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (5 \cdot 100) \cdot (50 \cdot 368 \cdot 86400)} = 2,47 \cdot 10^{-10} \text{ см/с.}$$

3. Міцність бетону, що потребується для забезпечення розрахункового коефіцієнта фільтрації за (6.9):

$$f_{cm} = \left(\frac{2,47 \cdot 10^{-10}}{126} \right)^{-0,13} = 33 \text{ МПа}.$$

4. Необхідне В/Ц за умови міцності:

$$B / \Pi = \frac{0,55 \cdot 50}{33 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 50} = 0,59.$$

5. Витрата води, що забезпечує необхідну рухомість суміші $B=180 \text{ л/м}^3$ (табл. 5.5).

6. Витрата цементу з умови міцності:

$$\Pi_1 = \frac{B}{B / \Pi} = \frac{180}{0,59} = 305 \text{ кг / м}^3.$$

Оскільки $\Pi_1 > \Pi$ приймаємо витрату цементу $\Pi=305 \text{ кг/м}^3$.

7. Витрати щебеню і піску знайдемо з умов абсолютних об'ємів.

Розрахунковий склад бетону:

$$\Pi=305 \text{ кг/м}^3; \text{Щ}=1175 \text{ кг/м}^3; \text{П}=769 \text{ кг/м}^3; B=180 \text{ кг/м}^3.$$



6.5. Визначити за допомогою експериментально-статистичних моделей склади гідротехнічного бетону із заданими значеннями міцності при стиску, морозостійкості і водонепроникності.

При виконанні експериментів за допомогою математичних методів планування використовували портландцемент, гранітний щебінь і кварцовий пісок із $M_k=2,1$. Умови планування експериментів приведені в табл.6.14. Комплекс експериментально-статистичних моделей, отриманих при статистичній обробці результатів дослідів приведений в табл.6.15.

Таблиця 6.14

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервали варіювання
натуральні	кодовані	-1	0	+1	
Водовміст бетонної суміші, кг/м ³	X ₁	150	180	210	30
Цементно-водне відношення	X ₂	1,3	2,1	2,9	0,8
Максимальна крупність щебеню, мм	X ₃	10	40	70	30
Витрата повітрявтягувальної добавки СНП, кг/м ³	X ₄	0	0,06	0,12	0,06
Нормальна густина, %	X ₅	24,6	27,2	29,8	2,6
Активність цементу, МПа	X ₆	34,5	41,2	47,9	6,7
Умовний показник легкоукладальності*	X ₇	0	1	2	1
Тривалість нормального твердіння, діб	X ₈	lg28	lg71	lg180	0,40

* Легкоукладальність бетонної суміші, знаходять за шкалою:

умовний показник	0	0,6	1	1,4	1,8	2
жорсткість, с	40 с	2 см	5 см	8 см	11 см	13 см
				осадка конуса, см		



Таблиця 6.15

Поліноміальні моделі властивостей бетонної суміші і бетону

Властивість	Рівняння регресії
Водопотреба суміші, кг/м ³	$y_1 = 1792 + 264x_7 + 134x_2 - 20x_3 - 83x_4 + 9,3x_5 - 5,2x_7^2 + 5,8x_2^2 + 8,8x_3^2 + 2,8x_4^2 + 3,8x_5^2 + 1,0x_7x_3 + 2,6x_8x_5 - 1,0x_2x_3 + 3,1x_2x_4 + 2,25x_2x_5 - x_3x_5 + x_4x_5 \quad (6.10)$
Оптимальна частка піску в суміші заповнювачів	$y_2 = 0,284 + 0,03x_1 - 0,039x_2 - 0,02x_3 + 0,009x_4 + 0,007x_1^2 + 0,016x_2^2 + 0,08x_3^2 + 0,006x_4^2 - 0,005x_1x_2 + 0,01x_1x_3 + 0,09x_2x_4 - 0,004x_3x_4 + 0,007x_4x_3 \quad (6.11)$
Міцність при стиску, МПа	$y_3 = 36,93 - 1,883x_7 + 14,73x_2 - 3,62x_4 - 0,86x_5 + 4,97x_6 + 6,08x_8 - 0,05x_7^2 - 1,85x_2^2 - 0,2x_4^2 - 0,3x_5^2 + 0,5x_6^2 - 0,8x_8^2 - 0,61x_7x_4 - 0,45x_7x_5 + 1,23x_7x_6 + 0,97x_2x_4 - 0,63x_2x_5 + 2,12x_2x_6 + 2,14x_2x_7 + 0,99x_4x_6 - 0,46x_5x_6 + 0,88x_6x_7 \quad (6.12)$
Морозостійкість, цикли	$y_4 = 3789 - 67,8 + 1623x_2 + 147,7x_4 - 27,4x_5 + 21,8x_6 + 63,2x_8 + 9,7x_7^2 - 38,8x_7^2 + 6,7x_4^2 - 9,8x_5^2 + 11,7x_6^2 + 2,2x_8^2 + 29,4x_7x_2 + 15,2x_7x_4 - 8,7x_7x_5 - 16,6x_7x_8 + 26,6x_2x_4 - 15,8x_2x_5 + 18,7x_2x_8 + 7,1x_4x_6 + 23,7x_4x_8 + 13,8x_6x_8 \quad (6.13)$
Водонепроникність, МПа	$y_5 = 3,53 + 0,04x_7 + 5,84x_2 + 0,02x_4 + 0,01x_5 + 0,06x_6^2 + 0,25x_8^2 - 0,05x_7^2 + 2,8x_2^2 - 0,01x_4^2 + 0,004x_5^2 + 0,03x_6^2 - 0,02x_8^2 + 0,02x_7x_2 + 0,01x_7x_4 - 0,02x_7x_5 + 0,04x_2x_6 + 0,14x_2x_8 \quad (6.14)$



Отриманий комплекс моделей дозволяє розв'язувати ряд задач:

1. В широкому діапазоні складів бетонних сумішей прогнозувати міцність, морозостійкість і водонепроникність бетону.

2. Знаходити значення морозостійкості та водонепроникності бетону при відомих значеннях міцності і відповідних параметрах складу. Аналогічно можна знаходити значення міцності при відомих значеннях морозостійкості та водонепроникності.

3. Знаходити склади бетонних сумішей, що відповідають заданим показникам міцності, морозостійкості та водонепроникності бетону.

Наприклад, якщо необхідно розрахувати склади бетону при заданій міцності і визначити їх морозостійкість та водонепроникність, розрахунки проводять в наступній послідовності:

1. Визначають при заданих показниках врахованих факторів (табл.6.14) в кодованому виді (x_8 – легкоукладальність, x_4 – витрата добавки СНП, x_3 – нормальна густина цементу, x_6 – активність цементу, x_9 – тривалість твердіння) з рівняння u_2 значення C/B (x_2) для заданої міцності.

2. Обраховують при знайденому C/B (x_2) за моделями u_4 та u_5 показники морозостійкості та водонепроникності.

3. При розрахованому значенні C/B (x_2) та заданих значеннях інших факторів знаходять витрату води (B) і оптимальну частку піску (r) в суміші заповнювачів.

4. При визначених C/B , B і r , а також вмісті добавки, розраховують склади бетонної суміші.

Якщо показники міцності, морозостійкості та водонепроникності задані, для розрахунку складу бетону визначають C/B (x_2), яке забезпечує всі три показники. Для звуження знайденої області C/B розглядають доцільність застосування повітрявтягуючої добавки.

Приклади розрахункових складів бетонів з проектними показниками міцності, морозостійкості та водонепроникності наведені в табл.6. 16.



Таблиця 6.16

Розрахункові склади бетону

№	Властивості бетону			Розрахункові параметри складів бетону			Склад бетону			
	Марка бетону за морозостійкістю (F)	Клас бетону за міцністю на стиск (C)	Марка бетону за водонепроникністю (W)	Ц/В	В, л/м ³	г	Ц, кг/м ³	В, л/м ³	П, кг/м ³	Щ, кг/м ³
Бетон без повітрявтягувальної добавки СНП										
1	100	C20/25	2	1,88	187,9	0,330	355	188	610	1262
2	150	C25/30	4	2,22	192,0	0,278	427	192	494	1307
3	200	C30/35	8	2,57	198,1	0,234	508	198	396	1320
Бетон з повітрявтягувальною добавкою СНП (0,06 кг/м ³)										
1	100	C8/10	–	1,22	171,5	0,327	209	172	659	1383
2	150	C12/15	–	1,54	172,7	0,302	266	173	593	1398
3	200	C15/20	2	1,82	175,2	0,286	319	175	547	1392
4	250	C20/25	4	2,1	179,2	0,274	373	179	509	1373
5	300	C20/25	6	2,38	184,6	0,267	440	185	477	1333

Примітка: Склади бетонів розраховані для отримання бетонної суміші з рухомістю 5 см за осадкою конуса при використанні наступних матеріалів: портландцементу з активністю 41,2 МПа та нормальною густиною 27,2 %, а також щебеню з максимальною крупністю 40 мм.

Вправи

6.1. Розрахувати склад бетону для дорожнього покриття з міцністю на стиск $f_{cm}=35$ МПа і згин $f_{ctf}=5.5$ МПа. Марка бетону за морозостійкістю F200. Рухомість бетонної суміші повинна відповідати марці P3.

Вихідні матеріали: портландцемент М500, НГ=28,3%; кварцовий пісок із $M_k=2.5$, вмістом відмулюваних часток 3.5%, густиною $\rho_n=2,65$ кг/л, гранітний щебінь фракції 5...20 мм,



$\rho_{щ}=2,68$ кг/л, $\rho_{н.щ}=1,51$ кг/л, вміст відмулюваних часток 1.2%. Вводиться пластифікуюча добавка з водоредукуючим ефектом 12%.

6.2. Розрахувати склад бетону для одношарового покриття дороги з інтенсивністю розрахункового навантаження від 500 до 1000 од. за добу в районі із середньомісячною температурою повітря найбільш холодного місяця мінус 10°C (прийняти марку бетону за морозостійкістю F200). Марка бетонної суміші за рухомістю P1.

Вихідні матеріали: портландцемент М500, кварцовий пісок із $M_k = 2.5$, вмістом відмулюваних часток 2%, густиною $\rho_n=2,67$ кг/л, гранітний щебінь фракції 5...20 мм, $\rho_{щ}=2,63$ кг/л, $\rho_{н.щ}=1,71$ кг/л, вміст відмулюваних часток 1%. Є можливість введення повітрявтягуючої добавки.

6.3. Запроектувати склад литого бетону класу C25/30 для верхнього шару аеродромного бетонного покриття.

Вихідні матеріали: портландцемент М500, кварцовий пісок з водопотребою $V_n=8\%$, $\rho_n=2,66$ кг/л, промитий гранітний щебінь фракції 5...20 мм, $\rho_{щ}=2,68$ кг/л, $\rho_{н.щ}=1,55$ кг/л. Вводиться добавка суперпластифікатора з водоредукуючим ефектом 20%.

6.4. Визначити необхідну температуру укладання масивного бетону у блок греблі.

Вихідні умови: температура розігріву бетону 27° С, за умовами охолодження коефіцієнт $K=0,85$, питома теплоємність бетону $C=1.05$ кДж/кг, середня густина бетону $\rho_b=2380$ кг/м³, водоцементне відношення $V/C=0,62$. Витрата води – $V=185$ л/м³. Застосовується шлакопортландцемент М400 з питомим тепловиділенням $q=250$ кДж/кг.

6.5. Розрахувати склад масивного гідротехнічного бетону класом за міцністю C16/20 у проектному віці 180 діб з легкоукладальністю бетонної суміші P2.

Вихідні матеріали: портландцемент М400, кварцовий пісок з $V_n=9\%$, $\rho_n=2,65$ кг/л, гранітний щебінь крупністю до 40 мм, з вмістом відмулюваних часток до 1%, $\rho_{щ}=2,67$ кг/л, $\rho_{н.щ}=1,61$ кг/л. В бетонну суміш вводиться кам'яновугільна зола-виносу з $K_{ц.е}=0,18$ у кількості 100 кг/м³.



6.6. Визначити за допомогою експериментально-статистичних моделей (табл. 6.14, 6.15) склади гідротехнічних бетонів:

а) у віці 28 діб – з міцністю на стиск не нижче $f_{cm}=25$ МПа, осадкою конуса бетонної суміші ОК=8 см, морозостійкістю F150, водонепроникністю W4 при застосуванні портландцементу з НГ= 24,6%, активністю 45 МПа;

б) у віці 180 діб – з міцністю на стиск не нижче $f_{cm}=30$ МПа, осадкою конуса бетонної суміші ОК=5 см, морозостійкістю F200, водонепроникністю W6 при застосуванні портландцементу з НГ=28,5%, активністю 48 МПа та введенні повітрявтягуючої добавки СНП у кількості 0,06 кг/м³.

6.7. Розрахувати з допомогою експериментально-статистичних моделей (табл. 6.14, 6.15) витрати цементу для бетону з проектною міцністю у 28 діб 25 МПа:

а) без введення і з введенням повітрявтягуючої добавки при марках за морозостійкістю F150 і F300;

б) при морозостійкості F150 для марок по водонепроникності W4 і W8.

Прийняти максимальну крупність щебеню 40 мм, нормальну густоту портландцементу 27%, активність цементу 41 МПа, осадку конуса бетонної суміші ОК=5 см, витрату повітрявтягуючої добавки 0,06 кг/м³.

6.8. За умови попередньої вправи знайти витрату цементу для бетону у віці 180 діб з маркою по рухомості бетонної суміші P3 та витраті повітрявтягуючої добавки 0,12 кг/м³.

6.9. Проектна міцність бетону на стиск для конструкції товщиною L=0,4 м у 28 діб, що повинна експлуатуватися у м'якій воді під напором 4 м 40 років призначена 20 МПа. Допустимий ступінь вилуговування СаО з цементу, що не призводить до істотного зниження міцності бетону прийнято $K_b=0,2$, середня концентрація СаО у цементі за час вилуговування $C_{CaO}=0,5 \cdot 10^{-3}$ г/см³. Експериментально встановлено, що кількість СаО, яка може бути винесена з бетону без втрати ним несучої здатності $Q_b=1,9$ г/см³.

Розрахувати чи достатня проектна міцність бетону для забезпечення необхідного коефіцієнта фільтрації бетону.



Застосовується портландцемент М500 з вмістом оксиду кальцію $q_{CaO}=0,66$ г на 1 г цементу.

6.10. Розрахувати за умов, що наведені у попередній вправі, як впливає зміна товщини конструкції від 0,3 до 0,5 м, та строку її експлуатації від 20 до 50 років на мінімальну витрату цементу, необхідні коефіцієнт фільтрації та міцність бетону для забезпечення конструкцією несучої здатності.

6.2. Бетони для бетонування при низьких температурах та в умовах сухого жаркого клімату

Бетони для зимового бетонування. В умовах зимового бетонування застосовують різні технології: термосу, електропрогріву, паропрогріву, введення протиморозних добавок. Всі ці технології направлені на забезпечення температури суміші і води замішування достатньої для проходження процесів тверднення.

Для монолітних конструкцій міцність бетону до моменту можливого замерзання або охолодження нижче розрахункових температур (*критична міцність*) повинна бути вказана в завданні на проектування його складу.

В усіх випадках вихідною техніко-економічною задачею є призначення розрахункової температури тверднення бетону $t_{\delta,ср.}$, для визначення якої використовується формула:

$$t_{\delta,ср.} = t_{\delta,к.} + \frac{t_{\delta,н.} - t_{\delta,к.}}{1,03 + 0,181 \cdot M_n + 0,006(t_{\delta,н.} - t_{\delta,к.})}, \quad (6.15)$$

де $t_{\delta,н.}$ – початкова температура укладання бетонної суміші, °С;

$t_{\delta,к.}$ – кінцева температура тверднення бетону, °С;

M_n – модуль поверхні конструкції, що бетонується (відношення площі конструкції що охолоджується до її об'єму).

У конкретних виробничих умовах необхідне значення $t_{\delta,ср.}$ може досягатись як за рахунок регулювання початкової температури бетону, так і обмеженням кінцевої температури тверднення.

Для регулювання початкової температури бетонної суміші використовують вираз теплового балансу:



$$t_{\delta,n} = \frac{0,22(t_n \cdot \Pi + t_{щ} \cdot \text{Щ} + t_{ц} \cdot \text{Ц}) + t_{\delta} \cdot B}{0,22(\Pi + \text{Щ} + \text{Ц}) + B}, \quad (6.16)$$

де t_n , $t_{щ}$, $t_{ц}$, t_{δ} , Π , Щ , Ц , B – відповідно температури, ° С і витрати, кг/м³, піску, щебеню або гравію, цементу і води;

На вибір кінцевої температури впливають насамперед температурні умови навколишнього середовища і конструкція опалубки (табл. 6.17).

Таблиця 6.17

Типи опалубок і коефіцієнти їх теплопередачі
неопалубленої поверхні бетону

Тип опалубки	Матеріал опалубки	Товщина шару, мм	Коефіцієнт теплопередачі К, Вт/(м ² ·° С), при швидкості вітру, м/с		
			0	5	15
I	Дошка	25	2,44	5,2	5,98
II	Дошка	40	2,03	3,6	3,94
III	Дошка	25	1,8	3	3,25
	Толь	-			
	Дошка	25			
IV	Дошка	25	0,67	0,8	0,82
	Пінопласт	30			
V	Фанера	4	0,87	1,07	1,1
	Дошка	25			
	Толь	-			
	Вата мінеральна	50			
VI	Фанера	4	1,02	1,27	1,33
	Метал	3			
	Вата мінеральна	50			
VII	Фанера	4	2,44	5,1	5,8
	Фанера	10			
	Азбест	4			
VIII	Фанера	10	0,74	0,89	0,9
	Толь	-			
IX	Тирса	100	1,27	1,77	1,87
	Толь	-			
X	Шлак	150	1,01	1,31	1,37
	Толь	-			



Визначення необхідної $t_{б.ср.}$ повинно бути ув'язане з заданими значеннями нормованих властивостей і можливих обмежень у часі. При забезпеченні плюсової температури бетону, що твердне, ($t_{б.ср.} \geq 0, \text{ } ^\circ \text{C}$), вихід міцності $A_{\tau,t}$ (%) до моменту часу τ (днів) можна знайти за формулою:

$$A_{\tau,t} = f_{cm,\tau,t} / f_{cm,28} = k_y t \tau^{K_t}, \quad (6.17)$$

де $A_{\tau,t}$ – відношення міцності бетону $f_{cm,\tau,t}$, що твердне при температурі t ($^\circ \text{C}$), у віці τ (днів) до проектної міцності $f_{cm,28}$;

K_y – коефіцієнт, що залежить від виду цементу;

K_t – коефіцієнт, що залежить від температури тверднення.

Для портландцементу можна прийняти $K_y = 0,012$

$$K_t = 0,001(0,37 t^2 - 25,7t + 814). \quad (6.18)$$

Необхідна розрахункова тривалість тверднення бетону:

$$\tau = \left(\frac{A_{\tau,t}}{K_y t} \right)^{\frac{1}{K_t}}. \quad (6.19)$$

При плюсовій температурі тверднення $t_{б.ср.}$ хімічні добавки виступають у ролі прискорювачів тверднення, збільшуючи відповідно $A_{\tau,t}$ або зменшуючи при заданому виході міцності термін тверднення τ .

При від'ємному значенні температури ($t_{б.ср.}$) виникає необхідність у застосуванні *протиморозних добавок*. Усереднені дані щодо наростання міцності бетону з основними протиморозними добавками при від'ємних температурах приведені за даними НДІЗБ в табл. 5.4.

Концентрацію протиморозних добавок залежно від $t_{б.ср.}$ можна прийняти згідно табл. 6.18.



Рекомендовані концентрації протиморозних добавок, %

Вид добавки	Бетон із $B/C < 0,5$			Бетон із $B/C > 0,5$		
	Розрахункова температура тверднення бетону, °С					
	-5	-15	-25	-5	-15	-25
НН	4	8	-	6	10	-
ННХК	3	7	10	5	10	14
НК,ННК	5	12	-	7	14	-
П	5	8	12	6	10	15
ХН+ХК	3+0	3+4,5	-	3+2	3,5+5	-
НК+С; ННК+С	3+1	6+2	-	4+1,5	8+3	-
ННХК+С	2+1	6+2	8+3	4+1	8+3	10+4
ХК+НН; ХК+ННК	1,5+1,5	4+4	5,5+5,5	2,5+2,5	6+6	8+8

Примітка. НН – нітрит натрію; ННХК – нітрит-нітрат-хлорид кальцію; НК – нітрат кальцію; ННК – нітрит-нітрат кальцію; П – поташ; ХН – хлорид натрію; ХК – хлорид кальцію; С – сечовина.

Розрахункову проектну міцність бетону визначають за формулою:

$$f_{cm}^p = \frac{f_{cm}^{np} \cdot K_1}{K_2}, \quad (6.20)$$

де K_1 – необхідна міцність бетону, % від проектної;

K_2 – можливий вихід міцності бетону, % при застосуванні прийнятої кількості протиморозної добавки.

Для визначення коефіцієнта K_2 при суттєвих коливаннях середньодобових температур (t_c) на протязі заданого періоду твердіння бетону, його розділяють на інтервали з відносно близькими значеннями t_c . Загальне значення K_2 знаходять як сумарну величину, що характеризує вихід міцності бетону за встановлений період його твердіння.



Задачі проектування складу бетону при витримуванні конструкції *методом термоса* ставлять за мету визначення такого співвідношення компонентів бетонної суміші, яке дозволить забезпечити задані властивості бетону до моменту його замерзання за умови запобігання втрат теплоти, що виділяється при твердненні цементу. Залежно від характеру врахованих обмежень можна виділити три основні типи задач:

- 1) із заданими характеристиками вихідних матеріалів і параметрами термосного витримування бетону;
- 2) із заданими параметрами термосного витримування бетону і можливістю вибору виду і марки цементу;
- 3) з можливістю вибору виду і марки цементу і параметрів термосного витримування бетону.

Розрахунки складів бетону зводяться до вирішення оптимізаційних задач із використанням рівнянь:

- теплового балансу, при якому забезпечується необхідний тепловологісний режим тверднення бетону;
- зростання міцності бетону в часі для прийнятих температурно-вологісних параметрів режиму тверднення.

Критеріями оптимальності в задачах зазначених типів можуть бути мінімально можлива витрата цементу, енерговитрати або вартість бетону з врахуванням нагрівання суміші і виготовлення відповідної опалубки. Можлива постановка задач оптимізації з метою досягнення заданого критерію оптимальності, наприклад, мінімальної вартості при обмеженнях по енергоресурсах і витраті цементу.

При заданому значенні міцності бетону до моменту замерзання ($A_{\tau,t}$) необхідну тривалість ізотермічного витримування (τ) знаходять за відомими рекомендаціями з урахуванням температури тверднення та виду цементу. Необхідний термін витримування бетону способом термосу до замерзання можна знайти за формулою (6.19).

Модуль поверхні конструкції і коефіцієнт теплопередачі опалубки визначають за відомими формулами, і призначають конструкцію опалубки та при необхідності, для задач третього типу, вибирають і додатково розраховують товщину теплоізоляції.



Екзотермію бетону за весь період тверднення знаходять за формулою (3.22). Питоме тепловиділення цементу можна визначати за довідковими даними або використати формули, отримані апроксимацією експериментальних даних С. А. Миронова:

– для портландцементу:

$$q_{\tau} = -46,59 - 0,365R_{\text{ц}} + 7,11t + 212,98 \lg \tau + 0,038R_{\text{ц}}^2 - 0,054t^2 - 29,7(\lg \tau)^2 - 1,5t \cdot \lg \tau \quad (6.21)$$

– для шлакопортландцементу:

$$q_{\tau} = 12,24 + 4,886t + 130,47 \lg \tau - 18,33(\lg \tau)^2 - 0,046t^2 \quad (6.22)$$

де t – середня температура;

τ – тривалість тверднення.

Формули (6.21, 6.22) справедливі при використанні портландцементу марок М300...500 і шлакопортландцементу М300 при твердненні в діапазоні температур 5...60° С.

Рівняння теплового балансу бетону, який твердне при термосному витримуванні має загальний вид:

$$Q_n + Q_{e.ц} = Q_{on} + Q_{арм} + Q_{вт}, \quad (6.23)$$

де Q_n – початковий тепловміст бетонної суміші;

$Q_{e.ц}$ – тепло, що виділяється за рахунок екзотермії цементу;

Q_{on} , $Q_{арм}$, $Q_{вт}$ – теплові витрати на нагрівання опалубки й арматури і теплові втрати в навколишнє середовище.

Складові теплового балансу, що входять в рівняння розраховують за допомогою формул, які наведені в довідкових посібниках.

Приймаючи за температуру ізотермічного витримування бетону середню його температуру $t_{6,ср}$ за період охолодження $\tau_{ср}$, з формули теплового балансу можна знайти необхідну витрату цементу при термосному витримуванні бетону, що забезпечує при даному коефіцієнті теплопередачі опалубки (табл. 6.17) таку екзотермію, яка необхідна для підтримування $t_{6,ср}$:



$$C_m = [KM_n(t_{\delta,sp.} - t_{ne})\tau - c \cdot \rho_{\delta}(t_{\delta,n.} - t_{\delta,k.})] / q_{\tau}, \quad (6.24)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі опалубки, Вт/(м²·°C);

M_n – модуль поверхні конструкції, м⁻¹;

$t_{\delta,sp.}$ – середня температура бетону за період охолодження конструкції, °C;

t_{ne} – середня температура повітря за період охолодження бетону, °C;

τ – тривалість охолодження бетону, год;

c – питома теплоємність бетону, кДж/(кг·°C);

ρ_{δ} – середня густина бетону, кг/м³,

$t_{\delta,n.}$ – початкова температура бетону після укладання, °C;

$t_{\delta,k.}$ – кінцева температура бетону, до якої розраховують тривалість охолодження, °C;

q_{τ} – питома тепловиділення цементу, кДж/кг.

Витрата цементу, прийнята з умови теплового балансу, може суттєво перевищувати необхідну витрату цементу з умови міцності. У цьому випадку фактичні значення міцності бетону як на момент замерзання, так і в 28 діб будуть значно завищені. Тому оптимальну витрату цементу можна визначити шляхом спільного вирішення рівнянь (6.19), (6.24) і рівняння проектною міцності бетону. Розрахунок вважають завершеним, коли різниця між значеннями витрати цементу з умов міцності та теплового балансу стає мінімально можливим.

Критерієм ефективності вибраного складу бетону з точки зору витрати цементу може бути показник Δ :

$$\Delta = |C_{n,m} - C_m| / C_{n,m}, \quad (6.25)$$

де C_m і $C_{n,m}$ – необхідні витрати цементу для досягнення заданої міцності відповідно при термосному витримуванні і нормальному твердненні (базовий склад) бетону.

Для задач першого типу Δ можна зменшити за рахунок добавок прискорювачів тверднення, переходу на більш жорсткі суміші, застосуванням ефективних пластифікаторів. Для задач другого типу додатковим ресурсом зменшення Δ може бути перехід на цементі підвищеної екзотермії, а третього –



збільшення термічного опору опалубки або різниці між початковою і кінцевою температурами витримування бетону.

У випадку, коли критерієм оптимальності термосного витримування бетону виступають енергетичні витрати на будівельному майданчику Q , для цільової функції можна використовувати рівняння:

$$Q = KM_n(t_{\delta.cp} - t_{ne})\tau - q_\tau \Pi. \quad (6.26)$$

При електропрогріві цільова функція буде додатково включати енерговитрати на електропрогрів бетону Q_{el} :

$$Q = KM_n(t_{\delta.cp} - t_{ne})\tau + Q_{el} - q_\tau \Pi. \quad (6.27)$$

За умови, що міцність бетону після термосного витримування повинна бути не нижче заданої, за рівняннями (6.25, 6.26) можна визначити енергетичну ефективність різних можливих технологічних прийомів зменшення Δ у межах кожного із зазначених типів задач, у тому числі і доцільності деякої перевитрати цементу.

Найбільш складними є задачі з використанням критерію оптимальної вартості ($Vm_{заг}$), особливо завдання третього типу, коли оптимізація складу бетону розглядається нерозривно з оптимізацією параметрів термосного витримування бетону. У цьому випадку цільова функція:

$$Vm_{заг} = Vm_{\delta.c.} + Vm_{on} + Vm_{нагр}, \quad (6.28)$$

де $Vm_{\delta.c.}$ – вартість бетонної суміші на момент закінчення укладання;

Vm_{on} – вартість опалубки;

$Vm_{нагр}$ – вартість попереднього нагрівання бетонної суміші.

Всі складові рівняння (6.28) взаємозалежні. Вирішення оптимізаційних задач пов'язане з деякими обмеженнями, викликаними наявністю матеріальних ресурсів і умовами виконання робіт.



На стадії проектування технології проведення робіт оптимізаційні розрахунки можуть застосовуватися для порівняння ефективності методу термосу з іншими методами зимового бетонування. При цьому варто розглядати всі можливі способи зменшення витрати цементу і строків тверднення бетону (утеплення опалубки, застосування цементів з підвищеної екзотермією і прискорювачів тверднення, зменшення водопотреби суміші та ін.). Алгоритм розрахунку складів бетону при термосному витримуванні наведений у табл. 6.19.

Таблиця 6.19

Алгоритм розрахунку складів бетону при термосному витримуванні

- Вихідні дані:** модуль поверхні конструкції, характеристики цементу, заповнювачів, конструктивні параметри опалубки, проектна міцність бетону і міцність на момент замерзання, показник легкоукладальності суміші.
1. Обчислюємо витрату цементу $U_{н.т}$ з умови нормального тверднення бетону.
 2. Приймаємо температури $t_{\delta.н}$ і $t_{\delta.к.}$, розраховуємо $t_{\delta.ср}$ за (6.15).
 3. Визначаємо за (6.19) необхідний строк твердіння бетону t .
 4. Визначаємо коефіцієнт теплопередачі прийнятої конструкції опалубки K .
 5. Визначаємо за (6.21, 6.22) питоме тепловиділення цементу $q_т$.
 6. Визначаємо за (6.24) витрату цементу з умови тепловиділення U_m .
 7. Якщо $\Delta = |U_m - U_{н.т}| \leq 0,05U_{н.т}$ то переходимо до п. 16, при більшому Δ – до п. 8.
 8. Якщо $U_m < U_{н.т}$ – переходимо до п. 14.
 9. Якщо є необхідність у зменшенні U_m і строку тверднення – переходимо до п. 10, інакше: $U = U_m$, переходимо до п. 16.
 10. Застосовуємо один із способів зменшення U_m і t :
 - збільшення $t_{\delta.н}$ і зменшення $t_{\delta.к.}$ – переходимо до п. 2;
 - введення прискорювачів тверднення – переходимо до п.3;
 - зниження необхідного рівня міцності бетону – переходимо до п.3;
 - заміна виду цементу – переходимо до п.5;
 - заміна марки цементу того ж виду – переходимо до п. 1;
 - зменшення водопотреби суміші – переходимо до п. 1;
 - зменшення теплопровідності опалубки – переходимо до п.4.
 11. Приймаємо $U = (U_m + U_{н.т})/2$.
 12. Знаходимо очікувану міцність бетону при новій витраті цементу.



13. Встановлюємо фактичний рівень міцності бетону до моменту замерзання – переходимо до п. 3.
14. Якщо є можливість зниження вартості робіт – переходимо до п. 15, інакше – до п. 16.
15. Знижуємо вартість робіт одним зі способів:
 - спрощуємо конструкцію опалубки – переходимо до п. 4;
 - знижуємо $t_{б.к.}$ – переходимо до п. 2.
16. Визначаємо витрату заповнювачів за методом абсолютних об'ємів.
17. Обчислюємо вартість проведення робіт.
18. Визначаємо за (6.26) енерговитрати на будівельному майданчику Q .
19. Якщо розглянути всі можливі способи проведення робіт – переходимо до п. 20.
20. Вибираємо оптимальний варіант виконання робіт із прийнятого критерію з урахуванням обмежень по ресурсах.

Бетони для умов сухого жаркого клімату. При проектуванні складів бетону для умов сухого жаркого клімату необхідне врахування температурно-вологісних умов не лише при твердненні конструкцій, але і на стадії виготовлення бетонної суміші та її укладання у форму або опалубку.

Підвищена початкова температура бетонної суміші ($t_{б.н}$), яку можна орієнтовно визначити залежно від температури води і твердих компонентів суміші за рис. 6.1, впливає на водопотребу суміші, необхідну для досягнення заданої рухомості і на зміну рухомості в часі. Вона сприяє при неналежному вологісному догляді підвищеній швидкості випаровування води з бетонної поверхні і пластичному тріщиноутворюванню. З підвищенням температури бетонної суміші зростає питоме тепловиділення бетону і небезпека розвитку неприпустимих термічних градієнтів у масивному бетоні.



Температура, °C

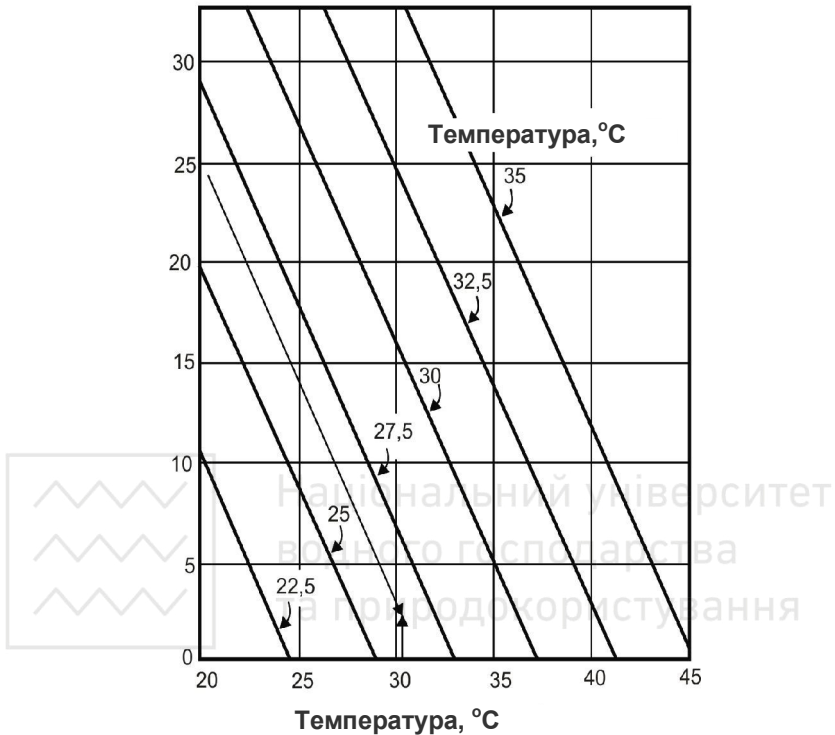


Рис. 6.1. Залежність між температурою бетонної суміші і температурою її компонентів

Температура бетонної суміші при можливості активного на неї впливу може призначатися при розробці проекту проведення бетонних робіт. Відповідно до рекомендацій Portland Cement Association для запобігання тріщиноутворення температура бетонної суміші при заданій відносній вологості і швидкості вітру повинна забезпечити швидкість випаровування вологи з поверхні бетону не більше $0,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$. Взаємозв'язок зазначених вище параметрів встановлюється за допомогою номограми (рис. 6.2).

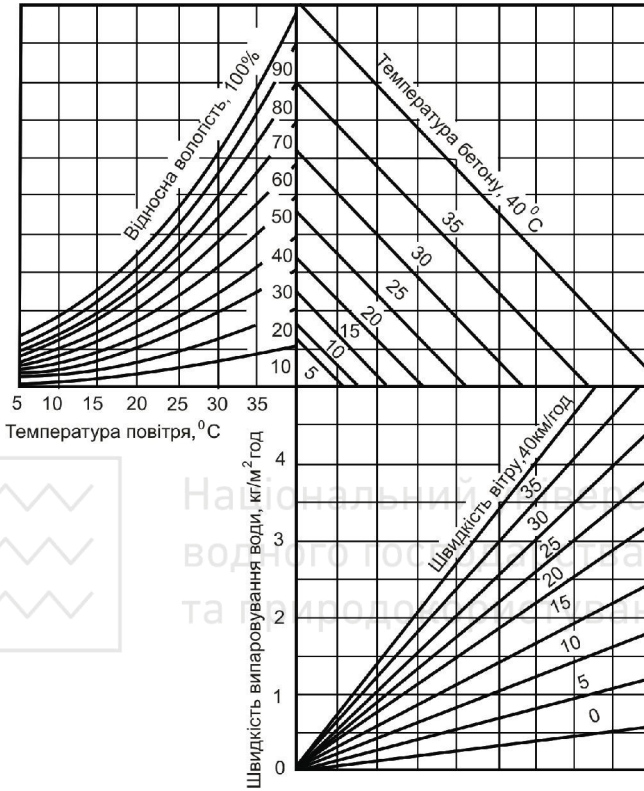


Рис. 6.2. Вплив температури та відносної вологості повітря, температури бетону і швидкості вітру на швидкість випаровування води з поверхні бетону

Нижче наведені схеми алгоритмів проектування складів бетонних сумішей для масивних і немасивних конструкцій з метою запобігання тріщиноутворення (табл. 6.20, 6.21) при необхідності температурного регулювання.



Таблиця 6.20

Схема алгоритму для розрахунку складів бетону масивних конструкцій при необхідності температурного регулювання

1. Визначають необхідне B/C і витрати компонентів бетонної суміші, виходячи з заданого комплексу властивостей.
2. Визначають початкову температуру бетонної суміші t_1^{CM} за рис. 6.2.
3. Визначають початкову температуру бетонної суміші t_2^{CM} за рис. 6.2, при якій швидкість випаровування води з поверхні тверднучого бетону не перевищує $0,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$ (з умови запобігання раннього пластичного розтріскування).
4. Визначають початкову температуру бетонної суміші t_3^{CM} , виходячи зі складу суміші для запобігання критичних температурних градієнтів у бетонному масиві за формулою (6.16).
5. Вибирають найменшу з температур t_1^{CM} , t_2^{CM} і t_3^{CM} , яку приймають за початкову необхідну температуру бетонної суміші t_n^{CM} .
6. Встановлюють початкову температуру бетонної суміші t_n^{CM} з врахуванням наявних технічних засобів для охолодження вихідних компонентів. Якщо $t_n^{CM} > t_{n1}^{CM}$, тоді знаходять при t_{n1}^{CM} допустиме тепловиділення бетонної суміші Q . При потребі вибирають спосіб досягнення необхідного Q (зниження питомого тепловиділення цементу q за рахунок переходу на інший вид цементу; зменшення витрати цементу за рахунок застосування пластифікуючих добавок та ін.) і корегують склад бетонної суміші з врахуванням впливу температури на водопотребу бетонної суміші.
7. Якщо $t_n^{CM} \leq t_{n1}^{CM}$, тоді призначають технологічні заходи, спрямовані на досягнення обраної t_n^{CM} початкової температури і на збереження її на необхідному рівні в процесі тверднення бетону.



Таблиця 6.21

Схема алгоритму для розрахунку складів бетону немасивних конструкцій при необхідності температурного регулювання

1. Визначають початкову температуру бетонної суміші t_1^{CM} за рис. 6.1.
2. Визначають початкову температуру бетонної суміші t_2^{CM} за рис. 6.2, при якій швидкість випаровування води з поверхні бетону, що твердне, не перевищує $0,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$.
3. Вибирають меншу з t_1^{CM} і t_2^{CM} температуру, яка приймається за температуру бетонної суміші в момент її укладання t_n^{CM} .
4. Визначають водопотребу суміші за відомими методиками.
5. Призначають критичну міцність $f_{cm,kr}$ за якої припиняється температурно-вологісний догляд. Вона не повинна бути, як правило, менше 50% проектної f_{cm} . Визначають відповідну відносну міцність $A'_{\tau,t} = \frac{f_{cm,kr}}{f_{cm}}$. Знаходять також тривалість температурно-вологісного догляду τ за формулою(6.19).
6. Якщо τ більше допустимої із умов технологічного регламенту, то корегують величину $A_{\tau,t}$ і знаходять відповідну проектну міцність f_{cm} при заданому значенні τ .
Можливі й інші технологічні рішення: перехід на інший вид цементу і зміна K_u , зміна $t_{б,ср}$ за рахунок зміни умов тверднення.
7. Розраховують B/C , що забезпечує досягнення необхідної проектної міцності f_{cm} .
8. Визначають технологічні заходи, спрямовані на досягнення обраної температури бетонної суміші в момент її укладання.
9. Знаходять за відомими методиками витрати компонентів бетонної суміші.



Приклади

6.6. Розрахувати необхідну міцність бетону в 28 діб, яка б забезпечила через 7 діб при температурі бетонної суміші в момент її укладання $t_{0,n}=15^{\circ}\text{C}$ міцність 70% від проектної $f_{cm}=30\text{ МПа}$. Визначити вміст протиморозної добавки ННХК.

Середня температура навколишнього повітря на протязі 7 діб після укладки бетону -20°C . Модуль поверхні конструкції $M_n=6$. Застосовуються для виготовлення бетонної суміші портландцемент М500 і заповнювачі середньої якості.

1. Середня температура тверднення бетону протягом 7 діб після укладки бетону за формулою (6.15):

$$t_{0,ср.} = -20 + \frac{15 + 20}{1,03 + 0,181 \cdot 6 + 0,006(15 + 20)} = -5^{\circ}\text{C}.$$

2. Необхідна розрахункова проектна міцність бетону при $t = -5^{\circ}\text{C}$, введенні добавки ННХК і досягненні 70% міцності від проектної згідно формули (6.20):

$$f_{cm}^p = \frac{30 \cdot 70}{50} = 42\text{ МПа} .$$

3. За формулою (4.25) знайдемо необхідне Ц/В для забезпечення проектної міцності бетону, приймаючи коефіцієнт $A=0,6$.

$$\text{Ц} / \text{В} = \frac{42 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 50}{0,6 \cdot 50} = 1,9 (\text{В} / \text{Ц} = 0,53)$$

У відповідності з табл. 6.18 приймемо вміст ННХК 5% від маси цементу.

6.7. Запроектувати склади бетону з проектною міцністю $f_{cm}=20\text{ МПа}$ для фундаменту з модулем поверхні $M_n=6$. Бетон



твердне в умовах термосного витримання. Для виготовлення бетонної суміші з ОК=5...7 см використовується портландцемент М400, пісок з водопо потребою $V_n=8\%$, щебінь 5...40 мм. До замерзання бетон повинен мати міцність не менш 14 МПа (70% проектної). Для виготовлення опалубки використовують дошки товщиною 25 мм. Початкова температура тверднення бетону $t_{\delta,n}=27^\circ\text{C}$, кінцева $t_{\delta,k}=5^\circ\text{C}$.

Використовуємо алгоритм, наведений у табл. 6.21.

1. Розрахуємо склад бетону нормального тверднення (базовий склад):

$$B / Ц = \frac{AR_{ц}}{f_{cm} + 0,5 AR_{ц}} = \frac{0,6 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 40} = 0,75.$$

Водопотреба суміші (табл. 5.5) $B=185 \text{ л/м}^3$.

Витрата цементу: $Ц_{н.м.} = 185/0,75 = 247 \text{ кг/м}^3$.

2. Знайдемо згідно заданих умов за формулою (6.15) розрахункову температуру тверднення бетону:

$$t_{\delta,sp} = 5 + \frac{27 - 5}{1,03 + 0,181 \cdot 6 + 0,006(27 - 5)} = 14,8^\circ\text{C}.$$

3. Розрахуємо коефіцієнт теплопередачі опалубки (дошки товщиною $\delta=25 \text{ мм}$). Використаємо формулу:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda}},$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі. Для дошок $\alpha=23(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$;

λ – коефіцієнт теплопровідності, $\lambda=0,18 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,025}{0,18}} = 5,48 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}).$$



4. Необхідний термін тверднення бетону за (6.19):

$$\tau = \left(\frac{0,7}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1000}{0,37 \cdot 14,8^2 - 25,7 \cdot 14,8 + 814}} = 14,4 \text{ діб (345,6 год)}.$$

5. Для розрахунку витрати цементу з умови тепловиділення розрахуємо за (6.21) питоме тепловиділення цементу:

$$q_{\tau} = -46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,11 \cdot 14,8 + 212,98 \cdot \lg 14,4 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 14,8 - 29,7 \cdot \lg 14,4^2 - 1,5 \cdot 14,8 \cdot \lg 14,4 = 274,3 \text{ кДж/кг}.$$

6. Витрата цементу з умови тепловиділення за (6.24):

$$C_m = [5,48 \cdot 6 \cdot (14,8 - 0)345,6 - 1,05 \cdot 2400(27 - 5)] / 274,3 = 45 \text{ кг/м}^3.$$

Для проектування раціонального (за технологічними та економічними показниками) складу бетону розглянуто кілька шляхів:

1. Збільшення міцності бетону за рахунок витрати цементу.

2. Збільшення міцності бетону за рахунок зменшення водопотреби бетонної суміші при введенні суперпластифікатора.

3. Зниження теплопровідності опалубки за рахунок зміни її конструкції.

4. Застосування цементу з більшою екзотермією.

5. Застосування добавки-прискорювача тверднення.

Склади бетонів, які знайдені для кожного із зазначених варіантів наведені в табл. 6.22.



Варіанти складу бетону при термосному бетонуванні

№ з/п	Витрата компонентів, кг/м ³					Термін до замерзання, діб
	цемент	вода	пісок	щебінь	добавка ¹⁾	
1	315	185	592	1287	-	6,1
2	260	145	704	1326	2,6 (С-3)	7
3 ²⁾	247	185	635	1301	-	14,4
4	271 ³⁾	185	615	1302	-	7
5	285	185	598	1306	2,85 (CaCl ₂)	6,6

Примітка. 1) – витрата добавки в перерахуванні на суху речовину;
2) – склад опалубки: дошки – 25 мм; шар толю; мінеральна вата – 40 мм; фанера – 10 мм; 3) – використаний портландцемент марки 500.

Найдешевшим і найбільш прийнятним варіантом виявився варіант 4, який передбачає збільшення екзотермії цементу, за рахунок підвищення його марки.

6.8. Розрахувати необхідну температуру бетонної суміші в момент її укладання і відкоригувати при необхідності склад бетону масивної конструкції (модуль поверхні конструкції $M_n=2 \text{ м}^{-1}$).

Вихідні дані: проектна міцність бетону на стиск 15 МПа з температурою в 28 діб ($t_{б.кр.}$) не більше 35° С, температура зовнішнього повітря 25° С, відносна вологість повітря 40%, швидкість вітру 20 км/год; ОК=2 см.

Матеріали: гранітний щебінь із максимальною крупністю 40 мм; водопотреба піску 7%; вологість піску $W_n=1\%$; щебеню 1,5%; температура піску, щебеню і води відповідно: $t_n=t_{щ}=30^\circ \text{ C}$; $t_b=25^\circ \text{ C}$; марка портландцементу М400. Є установка для виробництва льоду.

Застосовуємо алгоритм, який наведений у табл. 6.20.

1. Розрахуємо склад бетонної суміші:

Визначаємо В/Ц за формулою (4.25):



$$B / Ц = \frac{0,6 \cdot 40}{15 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 40} = 0,9.$$

Витрати компонентів бетонної суміші:

$$B=165 \text{ л/м}^3; Ц=183 \text{ кг/м}^3;$$

$$П=820 \text{ кг/м}^3; ШЦ=1283 \text{ кг/м}^3.$$

$$\text{Вода, що міститься в піску: } W_n=8 \text{ л/м}^3.$$

$$\text{Вода, що міститься в щебені: } W_{щ}=19 \text{ л/м}^3.$$

Витрата води для замішування бетонної суміші:

$$165 - 8 - 19 = 138 \text{ л/м}^3.$$

2. При швидкості випаровування води з поверхні бетону, що твердне, $0,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$, температура t_f^{cm} бетонної суміші дорівнює 22°C , (рис. 6.2);

3. Допустиму необхідну початкову температуру укладання бетонної суміші визначаємо за умовою (6.6).

Тепловиділення бетону Q визначимо за формулою (3.22). За рівнянням (6.21) питоме тепловиділення цементу в 28 діб $q_{28}=336 \text{ кДж/кг}$.

$$Q_{28} = 336 \cdot 183 = 61488 \text{ кДж}.$$

$$\text{Отже } t_2^{cm} \leq 35 - 0,8 \frac{61488}{1,05 \cdot 2400} \leq 15^\circ \text{C}.$$

4. За остаточну початкову температуру бетонної суміші приймаємо:

$$t_2^{cm} = 15^\circ \text{C}.$$

5. Установка для виробництва льоду дозволяє охолоджувати бетонну суміш до температури $t^{cm}=10 \dots 15^\circ \text{C}$. Температура $t^{cm}=15^\circ \text{C}$ технічно досяжна при заміні частини води льодом.



6.9. За вихідними даними з попереднього прикладу розрахувати необхідну температуру бетонної суміші в момент її укладки і тривалість температурно-вологісного догляду за бетоном з міцністю на стиск в 28 діб 20 МПа для немасивної конструкції з $M_n=6$. Допустима тривалість температурно-вологісного догляду за бетоном повинна бути не більше ніж 4 доби.

Застосуємо алгоритм наведений в табл. 6.20.

1. При загальній температурі заповнювачів 30°C та температурі води 25°C початкова орієнтовна температура бетонної суміші t_1^{cm} складає 32°C (рис. 6.1);

2. При швидкості випаровування води з поверхні тверднучого бетону $0,5 \text{ кг/м}^2\cdot\text{год}$ температура бетонної суміші $t_2^{cm} = 22^\circ \text{C}$ (рис. 6.2);

3. За остаточно необхідну температуру бетонної суміші в момент її укладки приймаємо 22°C ;

4. Водопотреба бетонної суміші на сухих матеріалах складає 165 л/м^3 ;

5. Необхідна критична міцність (50% від проектної)

$$f_{cm,кр} = 10 \text{ МПа. Отже: } A_{\tau,t} = \frac{10}{20} = 0,5.$$

За формулами (6.15, 6.18, 6.19):

$$t_{б.кр.} = 30 + \frac{22 - 30}{1,03 + 0,181 \cdot 6 + 0,006(22 - 30)} = 26^\circ \text{C}$$

$$K_t = 0,001(0,37 \cdot 26^2 - 25,727 + 814) = 0,39;$$

$$\tau = \left(\frac{0,5}{0,012 \cdot 26} \right)^{\frac{1}{0,39}} = 3 \text{ доби}.$$

6. Величина τ не перевищує допустиму тривалість температурно-вологісного режиму.



Вправи

6.11. Розрахувати необхідну міцність бетону в 28 діб, яка б забезпечила через 7 діб при температурі бетонної суміші в момент її укладання $t_{6,н}=10^{\circ}\text{C}$, міцність 50% від проектної $f_{cm}=30\text{ МПа}$. Модуль поверхні конструкції $M_n=8$. Протиморозна добавка – поташ. Середня температура повітря протягом 7 діб після укладання бетону мінус 15°C .

6.12. Розрахувати необхідну витрату цементу М500 для забезпечення через 14 діб досягнення 70% проектної міцності бетону $f_{cm}=30\text{ МПа}$ при температурах твердіння -10 ; -15 ; -20°C та при застосуванні в якості протиморозних добавок нітриту натрію (НН) і нітрит-нітрат хлориду кальцію (ННХК). Початкова температура бетонної суміші 20°C .

Модуль поверхні конструкції $M_n=4$. Рухомість бетонної суміші Р2. Застосовуються як заповнювачі кварцовий пісок з водопотребою $V_n=8\%$, митий гранітний щебінь фракції $5\dots 20\text{ мм}$.

6.13. Розрахувати склад і необхідну тривалість твердіння бетону в конструкції з $M_n=5$ методом термосу до досягнення 85% проектної міцності на стиск, яка становить 30 МПа . Бетонна суміш має рухомість марки Р3, для її виготовлення застосовують портландцемент М500, пісок з водопотребою 9% і гранітний щебінь крупністю $5\dots 40\text{ мм}$.

До укладки бетонна суміш розігрівається до 30°C , кінцева температура твердіння бетону при термосному витримуванні 7°C .

6.14. При знайдених у попередній вправі тривалості термосного витримування та температурі тверднення бетону визначити витрату цементу, що забезпечує необхідну екзотермію бетону. Для бетонування конструкції застосовується опалубка, що виготовлена з дощок товщиною 40 мм . (Швидкість вітру прийняти 5 м/с).

6.15. Визначити у прив'язці до умов прикладу 6.14 тефективність переходу до нової опалубки, в яку входять дошки – 25 мм , шар толю, мінеральна вата – 40 мм і фанера 4 мм (швидкість вітру прийняти 5 м/с).



6.16. Розрахувати склад бетону з $f_{cm}=30$ МПа для масивної конструкції з $M_n=4$, в умовах термосного витримування. Для виготовлення бетонної суміші з ОК=3...5 см використовується портландцемент М400, пісок з $V_n=6\%$, щебінь гранітний 5...40 мм. До замерзання бетон повинен мати міцність 15 МПа. Опалубка з дощок товщиною 40 мм. (Швидкість вітру 5 м/с).

Початкова температура тверднення бетону $t_{б.п}=30^\circ\text{C}$, кінцева – $t_{б.к}=7^\circ\text{C}$.

6.17. Бетонний завод постачає бетонну суміш з ОК=4 см для масивної гідротехнічної конструкції ($M_n=2$) з проектною міцністю в 28 діб 20 МПа. Бетонна суміш виготовляється на портландцементі М400, дрібному кварцовому піску з водопотребою $V_n=9\%$ та гранітному щебені фракції 5...40 мм. При температурі зовнішнього повітря 27°C , його відносної вологості 45%, швидкості вітру 10 км/год та швидкості випаровування води з бетону $0,5\text{ кг/м}^2$, температура поверхні бетону в 28 діб має бути не більше 30°C . Температура піску, щебеню і води відповідно: $t_n = t_{ш}=35^\circ\text{C}$, $t_b = 25^\circ\text{C}$. З якою початковою температурою повинна виготовлятися бетонна суміш?

6.18. За вихідними даними попередньої вправи визначити необхідну тривалість температурно-вологісного догляду за бетоном немасивної конструкції з $M_n=6$. Необхідна критична міцність бетону $f_{cm,кр}=10$ МПа.

6.3. Високоміцні швидкотверднучі бетони

Високоміцні швидкотверднучі бетони виготовляють з міцністю при стиску у 28-добовому віці 70...150 МПа. Основною вимогою до складу важких високоміцних бетонів є достатньо низькі значення В/Ц (0,2...0,35). При цьому міцність заповнювачів має бути не меншою ніж необхідна міцність бетону. Для отримання високоміцних бетонів можуть бути застосовані цементы з маркою не нижче М500. При застосуванні кондиційних вихідних матеріалів достатньо низькі значення В/Ц, висока рухомість бетонної суміші забезпечуються введенням в оптимальній кількості відповідних



суперпластифікаторів. Досягнення високої міцності бетону, в тому числі в ранньому віці, можливо при забезпеченні необхідних температурно-вологісних умов, при яких має місце достатній ступінь гідратації цементу.

Для розрахунків міцності високоміцних також як і рядових бетонів може бути застосована формула загального виду:

$$f_{cm} = pAR_{\text{ц}}(\text{Ц} / B - \epsilon), \quad (6.29)$$

де $R_{\text{ц}}$ і $\text{Ц}/B$ відповідно активність цементу і цементно-водне відношення;

pA – мультиплікативний коефіцієнт на величину якого впливає комплекс факторів, в т.ч. температура і тривалість твердіння.

При застосуванні портландцементу, середнього кварцового піску і щебеню зі щільних вивержених порід для розрахунків складів високоміцних швидкотверднучих бетонів можуть бути застосовані наступні рівняння:

$$f_{cm}^{12\text{год}} = 0,24R_{\text{ц}}(\text{Ц} / B - 0,29), \quad (6.30)$$

$$f_{cm}^{1\text{доба}} = 0,27R_{\text{ц}}(\text{Ц} / B - 0,33), \quad (6.31)$$

$$f_{cm}^{7\text{дiб}} = 0,56R_{\text{ц}}(\text{Ц} / B - 0,3), \quad (6.32)$$

$$f_{cm}^{28\text{дiб}} = 0,73R_{\text{ц}}(\text{Ц} / B - 0,33). \quad (6.33)$$

Дані формули можуть бути використані для проектуванн складів високоміцних бетонів, що твердіють в нормальних умовах.

Статистична обробка експериментальних даних показує, що величина відношення f_{cm}^n / f_{cm}^{28} при постійній температурі може бути задовільно описана рівнянням (6.34), а з урахуванням можливого впливу температури в діапазоні 5...40 – (6.35).

$$f_{cm}^n / f_{cm}^{28} = a \cdot \ln(n) + b, \quad (6.34)$$



$$f_{cm}^n / f_{cm}^{28} = a_1 \cdot \ln(n) + b_t \cdot t + c, \quad (6.35)$$

де n – тривалість тверднення, діб; t – температура тверднення, °С.

Розрахункові значення коефіцієнтів у рівняннях (6.34) і (6.35) приведені в табл. 6.23.

Таблиця 6.23

Значення коефіцієнтів у рівняннях (6.34) і (6.35)

Проектування міцності бетону, МПа	Рівняння (6.34) $t=20^\circ\text{C}$		Рівняння (6.35) $t=5...40^\circ\text{C}$		
	a	b	a_1	b_t	c
20...30	0,242	0,24	0,242	0,0115	0,008
35...50	0,218	0,33	0,218	0,0134	0,063
≥ 60	0,166	0,4473	0,166	0,0133	0,1806

Збільшення прогнозуючої здатності рівняння (6.29) при проектуванні складів бетону досягається введенням мультиплікативного коефіцієнта $\rho A = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n$, що враховує комплекс впливаючих на міцність бетону факторів, в тому числі тривалості і температури твердіння.

При необхідності прогнозування міцності при відомому складі бетону або знаходженні необхідного Ц/В для забезпечення заданої міцності при певній температурі і тривалості твердіння розрахункове рівняння набуває загальний вигляд:

$$f_{cm} = (a \cdot \ln(n) + b_t \cdot t + c) \cdot [A \cdot R_y (C/B - b)] \quad (6.36)$$

Рівняння (6.36), конкретизоване для певних вихідних матеріалів і діапазону класів бетону по міцності, а також температурного інтервалу, може бути використано також для розрахунку необхідних значень тривалості твердіння і температури для досягнення заданої міцності. Рівняння (6.35) і (6.36) з коефіцієнтами, наведеними в табл. 6.23 справедливі при $n=1 \dots 28$ діб і $t=5...40^\circ\text{C}$.

Застосування формул виду (6.29) для розрахунку складів бетону, що підлягає тепловологісній обробці, потребує емпіричного уточнення мультиплікативного коефіцієнта ρA з



урахуванням режимних особливостей пропарювання. Таке уточнення може бути виконано за допомогою аналізу відповідних експериментально-статистичних моделей. У табл. 6.24 приведені значення коефіцієнтів $A_{\tau,t}$ для високоміцних бетонів при можливих змінах температури ($x_1=40\dots 80^\circ \text{C}$) та тривалості ($x_2=4\dots 8$ год) ізотермічної витримки при тепловологісній обробці (ТВО).

Таблиця 6.24

Рівняння для розрахунку коефіцієнтів $A_{\tau,t}$

Міцність пропарених бетонів на стиск, МПа	Розрахункові рівняння
2 год	$A_{\tau,t}^{2год} = 0,62 + 0,16x_1 + 0,12x_2 - 0,05x_1^2 - 0,04x_2^2 - 0,09x_1x_2 \quad (6.37)$
1 доба	$A_{\tau,t}^{1доба} = 0,84 + 0,08x_1 + 0,04x_2 - 0,05x_1^2 - 0,01x_2^2 - 0,005x_1x_2 \quad (6.38)$
7 діб	$A_{\tau,t}^{7діб} = 0,86 + 0,09x_1 + 0,04x_2 + 0,04x_1^2 - 0,004x_2^2 - 0,04x_1x_2 \quad (6.39)$
28 діб	$A_{\tau,t}^{28діб} = 0,94 + 0,04x_1 + 0,02x_2 + 0,02x_1^2 + 0,003x_2^2 - 0,01x_1x_2 \quad (6.40)$

Примітка. В рівняннях (6.37)...(6.40) $x_1=(t_{пр}-60)/20$, $x_2=(\tau_{іс}-6)/2$, де $t_{пр}$ і $\tau_{іс}$ – відповідно температура та тривалість ізотермічного прогріву бетону при пропарюванні.

Аналіз формул (6.37...6.40), наведених в табл. 6.24 підтверджує високу енергоефективність високоміцних бетонів. Вже через 2 години після ТВО при тривалості ізотермічної витримки 4 години і температурі 80°C їх міцність наближається до 70% марочної. При температурі 40°C і тривалості ізотермічного прогріву 8 год. міцність після пропарювання



перевищує 50% марочної. Через 1 добу після ТВО при 60° С і 4 години ізотермічної витримки міцність бетону досягає 85% марочної.

Спільне використання рівнянь (6.33) і (6.37...6.40) дозволяє вирішувати ряд завдань проектування як складів бетонних сумішей, так і технологічних параметрів виготовлення бетону із заданою міцністю і зокрема:

– визначати необхідні значення Ц/В і R_c при заданих параметрах теплової обробки;

– визначати необхідні значення температури та тривалості теплової обробки, що забезпечують прийнятні або мінімально можливі значення Ц/В;

– визначати необхідну тривалість твердіння бетону після ТВО, що дозволяє при заданих параметрах складу і теплової обробки досягати необхідну відпускну міцність або коректувати ці параметри, враховуючи можливу тривалість витримки виробів до їх відвантаження.

Приклади

6.10. *Визначити необхідне значення Ц/В для отримання бетону з міцністю при стиску у віці 28 діб $f_{cm}^{28} \geq 80$ МПа з досягненням через 2 доби твердіння міцності 50% від проектної. Активність цементу $R_c = 52,5$ МПа. Розрахувати мінімальне значення температури при якому може досягатися заданий показник міцності у віці 2 діб. Розрахувати наскільки можна скоротити тривалість твердіння бетону з досягненням міцності 80 МПа при підвищенні температури твердіння до 40° С.*

Попередньо за допомогою формули (6.33) знаходимо значення Ц/В, яке буде забезпечувати досягнення необхідної міцності бетону у віці 28 діб.

$$\frac{Ц}{В} = \frac{f_{cm}^{28}}{0,73R_c} + 0,33 = \frac{80}{0,73 \cdot 52,5} + 0,33 = 2,42$$



За формулою 6.34, з урахуванням коефіцієнтів наведених у таблиці 6.23 розрахуємо відповідне значення Ц/В для забезпечення необхідної міцності 40 МПа у віці двох діб:

$$\frac{Ц}{В} = \frac{40}{(0,166 \cdot \ln(2) + 0,0133 \cdot 20 + 0,1806) \cdot 0,73 \cdot 52,5} + 0,33 = 2,19$$

Відповідно до наведеного розрахунку весь набір заданих міцнісних показників бетону забезпечується при Ц/В=2,42.

Розраховуємо за допомогою рівняння (6.35) мінімальне значення температури твердіння бетону, при якій буде забезпечуватися необхідне значення міцності бетону у віці двох діб при Ц/В=2,42.



$$t = \frac{\frac{f_{cm}^{2\text{добу}}}{f_{cm}^{28}} - a \ln(n) - c}{b_t} = \frac{\frac{40}{80} - 0,166 \cdot \ln(2) - 0,1806}{0,0133} = 15,3^\circ \text{C}$$

Для забезпечення необхідної міцності 40 МПа на другу добу мінімальна температура твердіння бетону повинна становити не менш як 15,3° С. Однак, значення міцності бетону у віці 28 діб при такій температурі твердіння, як впливає з рівняння 6.36 становитиме:

$$f_{cm}^{28} = ((0,166 \cdot \ln(28) + 0,0133 \cdot 15,3 + 0,1806) \cdot 0,73 \cdot 52,5 \cdot (2,42 - 0,33)) = 75,1 \text{ МПа}$$



За формулою (6.36) розраховуємо необхідну тривалість тверднення бетону до досягнення ним міцності 80 МПа при збільшенні температури тверднення до 40° С.

$$\begin{aligned} \ln(n) &= \frac{f_{cm}^{28} - b_t \cdot t - c}{f_{cm}^{28}} = \\ &= \frac{1 - 0,0133 \cdot 40^a - 0,1806}{0,166} = 1,73 \end{aligned}$$

Відповідно $n \approx 2$ доби.

6.11. *Визначити необхідне значення Ц / В для отримання бетону з міцністю при стиску через 28 днів після проходження тепловологісної обробки $f_{cm}^{28} \geq 100$ МПа з досягненням через 2 години після тепловологісної обробки (тривалість ізотермічної витримки 8 годин, температура ізотермічної витримки 60° С) 70% від проектної міцності ($f_{cm}^{TBO} = 70$ МПа). Прийняти $R_{ч}^{28} = 52$ МПа.*

Попередньо за допомогою формул (6.37) і (6.40) знаходимо значення коефіцієнта $A_{\tau,t}$, який відповідає заданому режиму ТВО. Для цього переводимо значення температури і тривалості ізотермічної витримки в кодований вид:

$$X_1 = (60 - 60) / 20 = 0, \quad X_2 = (8 - 6) / 2 = 1$$

$$\begin{aligned} A_{\tau,t}^{2год} &= 0,62 + 0,16 \cdot 0 + 0,12 \cdot 1 - 0,05 \cdot (0)^2 - 0,04 \cdot 1^2 - \\ &- 0,09 \cdot 0 \cdot 1 = 0,7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{\tau,t}^{28} &= 0,94 + 0,04 \cdot 0 + 0,02 \cdot 1 + 0,02 \cdot (0)^2 + 0,003 \cdot 1^2 - \\ &- 0,01 \cdot 0 \cdot 1 = 0,963 \end{aligned}$$

Користуючись формулою (6.33) з додатковим урахуванням розрахованих значень коефіцієнтів $A_{\tau,t}^{2год}$ і $A_{\tau,t}^{28}$



визначасмо необхідне значення C / B , яке буде забезпечувати досягнення заданої міцності бетону після тепловологісної обробки ($f_{cm}^{TBO} = 70 \text{ МПа}$) і через 28 діб тверднення ($f_{cm}^{28} \geq 100 \text{ МПа}$).

$$C/B = (f_{cm}^{TBO}) / (0,73 A_{\tau,t}^{220} R_y) + 0,33 = (70 / 0,73 \cdot 0,7 \cdot 52) + 0,33 = 2,94$$

$$(C/B)_1 = (f_{cm}^{28} / 0,73 A_{\tau,t}^{28} R_y) + 0,33 = (100 / 0,73 \cdot 0,963 \cdot 52) + 0,33 = 3,04$$

Відповідно до наведеного розрахунку весь набір заданих міцнісних показників бетону забезпечується при $C/B=3,04$.

6.12. Розрахувати чи буде забезпечуватися необхідна відпускна міцність бетону через 2 години після тепловологісної обробки не менше 30 МПа при значенні C/B визначеному в попередньому прикладі ($C/B=3,04$), але при зменшенні тривалості ізотермічної витримки до 4 годин, температури до 40° С.

Попередньо за допомогою формули (6.37) знаходимо значення коефіцієнта $A_{\tau,t}$, який відповідає заданому режиму ТВО. Для цього переводимо значення температури і тривалості ізотермічної витримки в кодований вид: $X_1=(40-60)/20=-1$, $X_2=(4-6)/2=-1$.

$$A_{\tau,t}^{200} = 0,62 + 0,16 \cdot (-1) + 0,12 \cdot (-1) - 0,05 \cdot (-1)^2 - 0,04 \cdot (-1)^2 - 0,09 \cdot (-1) \cdot (-1) = 0,16$$

Користуючись формулою (6.33) з урахуванням розрахованого значення коефіцієнта $A_{\tau,t}^{200}$ і заданого значення C/B , визначасмо міцність бетону через 2 години після тепловологісної обробки:



$$f_{cm}^{12год} = 0,73 A_{TBO}^{TBO} R_{ц} (Ц / B - 0,33) = 0,73 \cdot 0,16 \cdot 52,5 (3,04 - 0,33) = 16,6 \text{ МПа}$$

Задана умова не виконується. Для забезпечення необхідної відпускну міцності бетону необхідно застосувати комплекс відповідних технологічних заходів (коригування режиму ТВО, введення добавок-прискорювачів та ін.).

Вправи

6.19. Визначити необхідне значення Ц/В для отримання бетону з міцністю при стиску у віці 28 діб $f_{cm}^{28} = 100 \text{ МПа}$ з досягненням міцності через 1 добу $f_{cm}^1 = 50 \text{ МПа}$, 12 годин $f_{cm}^{12год} = 30 \text{ МПа}$.

6.20. В результаті обробки експериментальних даних, що отримані при реалізації факторного плану 2^3 розрахована математична модель міцності на стиск через 12 год нормального твердіння

$$f_{cm}^{12год} = 46,1 - 18,8x_1 - 0,3x_2 + 6,4x_3 + 1,5x_1x_2 + 1,1x_1x_3 + 1,2x_2x_3$$

де $x_1 = (B/C - 0,3)/0,05$; $x_2 = (C - 550)/50$; $x_3 = (R_{ц} - 55)/5$.

Побудувати в результаті аналізу моделі графічні залежності $f_{cm}^{12год}$ від водоцементного відношення (В/Ц), витрати цементу, кг/м^3 (Ц) та активності цементу, МПа, ($R_{ц}$).

6.21. В результаті обробки експериментальних даних, що отримані при реалізації факторного плану 2^3 розрахована математична модель міцності на стиск через 1 добу нормального твердіння.

$$f_{cm}^{1доб} = 60 - 18,8x_1 + 0,4x_2 + 4,4x_3 + 0,2x_1x_2 + 0,8x_1x_3 - 0,9x_2x_3,$$

де $x_1 = (B/C - 0,3)/0,05$; $x_2 = (C - 550)/50$; $x_3 = (R_{ц} - 55)/5$.

Побудувати в результаті аналізу моделі графічні залежності $f_{cm}^{1доб}$ від водоцементного відношення (В/Ц), витрати цементу (Ц), кг/м^3 , та активності цементу ($R_{ц}$), МПа.



6.22. Проаналізувати висновки, які можна зробити на базі математичної моделі міцності бетону на стиск у 28 – добовому віці.

$$f_{cm}^{28} = 99 - 14,7x_1 + x_2 + 3,6x_3 - 0,5x_1x_2 + 0,4x_1x_3 - x_2x_3,$$

де $x_1=(В/Ц-0,3)/0,05$; $x_2=(Ц-550)/50$; $x_3=(R_{ц}-55)/5$.

6.23. Із застосуванням формул (6.30...6.33) розрахувати кінетику зростання міцності бетону $f_{cm}^{28} = 80 МПа$ та $f_{cm}^{28} = 100 МПа$ з визначенням величини f_{cm} через 12 год, 1; 7; 28 діб при нормальних умовах твердіння. Побудувати відповідні графічні залежності.

6.24. З застосуванням формул (6.36) розрахувати кінетику зростання міцності бетону $f_{cm}^{28} = 80 МПа$ з визначенням величини f_{cm} через 1; 3; 7 діб при температурах твердіння 5; 20; 40° С. Побудувати відповідні графічні залежності.

6.25. Розрахувати очікувану міцність бетону на портландцементі М500 та кондиційних заповнювачах при В/Ц=0,4 і В/Ц=0,3 через 2 год; 1 та 28 діб після пропарювання за режимом: температура 60° С, тривалість ізотермічного прогріву 6 год.

6.26. Бетони на портландцементі М500 та кондиційних заповнювачах при В/Ц=0,45 і 0,35 повинні проходити тепловологісну обробку. Як зміниться міцність бетону через 2 год та 1 добу після тепловологісної обробки за режимами:

1) $t=40^{\circ}C$, $\tau_{із}=8$ год; 2) $t=80^{\circ}C$, $\tau_{із}=4$ год; 3) $t=60^{\circ}C$, $\tau_{із}=6$ год.

6.4. Бетони з активними мінеральними добавками

У групу активних мінеральних добавок – активних наповнювачів входять матеріали, здатні вступати при нормальній температурі в хімічну реакцію з гідроксидом кальцію. При твердінні бетонів джерелом гідроксиду кальцію є основні мінерали (переважно аліт), що входять у портландцементний клінкер і зазнають гідролізу при впливі



води.

За походженням добавки цього типу бувають природними (осадового або вулканічного походження) та техногенними (відходи та побічні продукти промислових виробництв).

В основу класифікації активних мінеральних добавок прийнятої в Україні (ДСТУ БВ.2.7-128:2006), в Європейських країнах і США покладені їхня пуцоланова активність і хіміко-мінералогічний склад.

Як активну мінеральну добавку в бетонах найбільш широко застосовують низькокальцієву кам'яновугільну золу-виносу теплових електростанцій, склад і вимоги до якої регламентуються ДСТУ БВ.2.7-205:2009.

До високоактивних мінеральних добавок у бетон, які все ширше застосовуються в останні десятиріччя, відносяться ультрадисперсні відходи виробництва феросплавів, т.зв. *мікрокремнезем (МК)*. Поряд із МК в якості ефективних добавок до бетону за певних умов (висока дисперсність, комбінація із суперпластифікаторами й ін.) можуть служити такі мінеральні матеріали як метакаолін, цеоліти та ін.

На даний час розроблено ряд методик проектування складів бетонів з мінеральними добавками (*наповнених бетонів*), які ґрунтуються, в основному, на сумісному рішенні комплексу поліноміальних факторних моделей. Прийнятні результати можуть бути отримані також при розрахунках складів наповнених бетонів за допомогою методу "приведеного" В/Ц або Ц/В.

В якості параметрів складів бетонних сумішей в експериментально-статистичних моделях можна використовувати не тільки прямі витрати окремих компонентів, а і об'ємні співвідношення, наприклад, об'ємну частку наповнювача (V_1) в суміші наповнювача і цементу (V_1+V_2), наповненого в'язучого (V_1+V_2) в суміші в'язучого і піску ($V_1+V_2+V_3$) і т.д.:



$$X_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2}; X_2 = \frac{V_1 + V_2}{V_1 + V_2 + V_3} \text{ і т.д.} \quad (6.41)$$

Визначивши вказані відношення легко розрахувати об'ємні частки кожного із компонентів. Наприклад, для трьохкомпонентної суміші:

$$V_1 = X_1 X_2; V_2 = (1 - X_1) X_2; V_3 = 1 - X_2. \quad (6.42)$$

В загальному випадку для n -компонентної суміші:

$$V_1 = X_1 X_2 \dots X_{n-1}; V_2 = (1 - X_1) X_2 \dots X_{n-1}; \dots V_n = 1 - X_{n-1}. \quad (6.43)$$

Значення оптимального вмісту наповнювача підбирається експериментально з урахуванням як Ц/В так і особливостей застосовуваних цементів і заповнювачів, особливо дрібного. Зазвичай значення оптимальної витрати наповнювачів коливається в порівняно вузькій області (зола-виносу 100...200 кг/м³, мікрокремнезем 30...50 кг/м³ і т.д.). Деяке зниження якості цементного каменю за рахунок розбавлення його наповнювачем компенсується збільшенням загального об'єму в'язучого. При досягненні деякої товщини клейового шару на зернах заповнювача подальше збільшення об'єму в'язучого приводить, як правило, до зниження міцності бетону.

Вплив добавок наповнювачів на водовміст бетонної суміші залежить від їх структури і дисперсності. Якщо зола-виносу не викликає суттєвого збільшення водопотреби то такі наповнювачі як мікрокремнезем, метакаолін та інші аморфізовані, високодисперсні продукти збільшують її і без добавки суперпластифікатора зазвичай не раціональні.

Витрата цементу при введенні активного наповнювача:

$$C = B(C / B)_{np} - K_{ц,е} H, \quad (6.44)$$

де B і H – відповідно витрати води і наповнювача, кг/м³;



$K_{ц.е}$ – коефіцієнт цементуючої ефективності наповнювачів;
 $(Ц/В)_{пр}$ – приведені Ц/В.

При визначенні співвідношення заповнювачів коефіцієнт розсунення зерен знаходиться з урахуванням кількості наповненого в'язучого. Рекомендовані значення α при введенні золи-виносу приведені нижче:

Витрата цементно-зольного в'язучого, кг/м ³	250	300	350	400	450	500
Коефіцієнт розсунення(α)	1,38	1,44	1,52	1,64	1,72	1,8

Витрата піску та щебеню встановлюються за відомими формулами методу абсолютних об'ємів.

Мінімальному значенню Ц/В, що забезпечує проектні вимоги до виробів, відповідає певне значення золоцементного відношення З/Ц. Зі збільшенням рухомості бетонної суміші і міцності бетону Ц/В зростає, а З/Ц відповідно знижується. Витрата золи може бути прийнята за табл. 6.25.

Таблиця 6.25
Рекомендовані значення витрати золи

Рухомість бетонної суміші, см	Міцність бетону, МПа	Витрата золи, кг/м ³	
		пропарений бетон	бетон нормального тверднення
1...4	20...30	170	150
	30...40	180	150
5...9	20...30	190	170
	30...40	200	180
10...14	20...30	210	190
	30...40	215	200

Приклади

6.13. Підібрати склад золовмісного бетону класу С25/30 ($f_{cm}=32$ МПа) з осадкою конуса 15 см.

Для приготування бетону використовують наступні матеріали: портландцемент з мінеральними добавками М400 і нормальної густотою (НГ) 28% ($\rho_c=3,1$ кг/л); зола Бурштинської



ТЕС з питомою поверхнею – $4000 \text{ см}^2/\text{г}$, $\rho_3=2,2 \text{ кг/л}$; пісок кварцовий ($\rho_p=2,6 \text{ кг/л}$, $V_p=6\%$, $M_{кр}=2,0$); щебень гранітний ($d_{max}=20 \text{ мм}$, $\rho_{щ}=2,65 \text{ кг/л}$).

Застосовується суперпластифікатор С-3 в кількості 0,5% маси цементу за сухою речовиною. Об'єм втягнутого повітря ($V_{п.в}$) 20 л/м^3 .

1. За табл. 6.26. вибираємо золоцементне відношення. Встановлюємо, що задану сукупність властивостей золовмісткого бетону можна забезпечити при $З/Ц=0,5$.

Таблиця 6.26

Рекомендовані значення золоцементного відношення (З/Ц)

f_{cm}^{28} , МПа	ОК, см	З/Ц	f_{cm}^{28} , МПа	ОК, см	З/Ц
10,0	4	0,7	30,0	0...4	0,5
	4...15	0,7		4...15	0,3
	Більше 15	0,5		Більше 15	0,3
20,0	0...4	0,5	40,0	0...4	0,3
	4...15	0,5		4...15	0,3
	Більше 15	0,5		Більше 15	0,1

2. За номограмою (рис. 6.3) визначаємо необхідне значення Ц/В, яке становить 1,9.

3. Необхідний водовміст бетонної суміші при добавці суперпластифікатора 0,5% маси цементу за сухою речовиною визначаємо за номограмою (рис. 6.4): $V=175 \text{ кг/м}^3$.

Знаходимо витрату цементу і золи:

$$Ц = Ц/В \cdot В = 1,9 \cdot 175 = 332 \text{ кг/м}^3,$$

$$З = Ц \cdot З/Ц = 166 \text{ кг/м}^3.$$

4. За табл. 5.7 визначаємо оптимальну частку піску в суміші заповнювача: $\gamma=0,33$.

Об'єм заповнювача

$$V_3 = 1000 - (Ц/\rho_u + З/\rho_3 + V_g + V_{n.g}) =$$

$$1000 - (107 + 75 + 175 + 20) = 623 \text{ л/м}^3.$$



Витрата піску і щебеню визначається так:

$$V_n = rV_3 = 0,33 \cdot 623 = 206 \text{ л/м}^3,$$
$$\Pi = V_n \rho_n = 206 \cdot 2,6 = 536 \text{ кг/м}^3,$$

$$V_{щ} = (1 - r)V_3 = (1 - 0,33)623 = 417 \text{ л/м}^3,$$
$$\text{Щ} = V_{щ} \rho_{щ} = 417 \cdot 2,65 = 1105 \text{ кг/м}^3.$$

Розрахунковий склад бетону:

$$\text{Ц} = 332 \text{ кг/м}^3; \text{З} = 166 \text{ кг/м}^3;$$
$$\text{П} = 536 \text{ кг/м}^3; \text{Щ} = 1105 \text{ кг/м}^3;$$
$$\text{В} = 175 \text{ л/м}^3; \text{С-3} = 1,66 \text{ кг/м}^3.$$

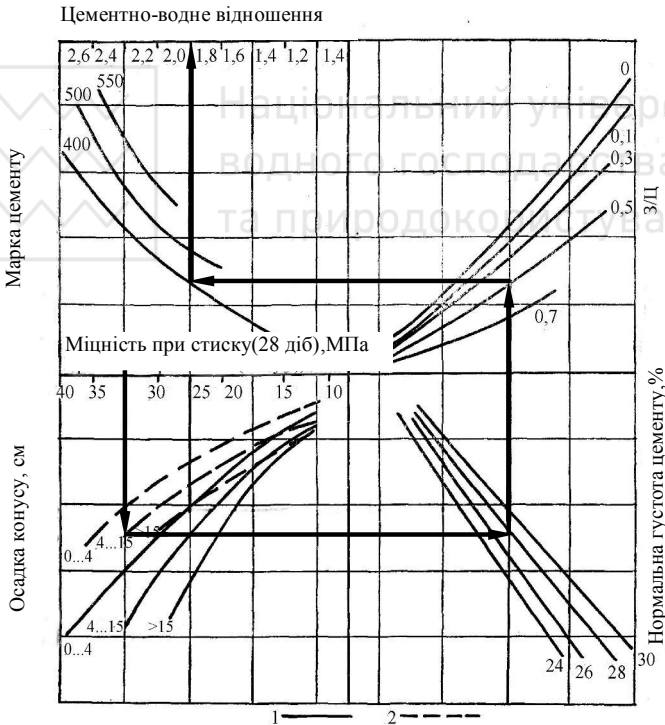


Рис. 6.3. Номограма для визначення цементно-водного відношення бетонів які містять золу:

- 1 – з добавкою С-3;
- 2 – без суперпластифікатора.

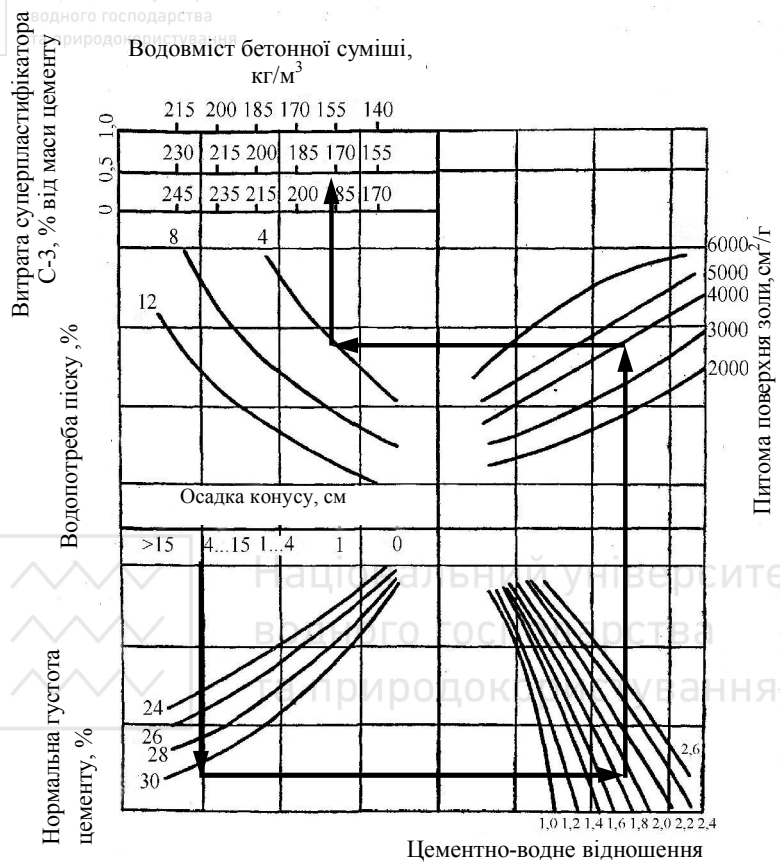


Рис. 6.4. Номограма для визначення водовмісту бетонної суміші, наповненої золою

6.14. Розрахувати склад золовмісного бетону з проектною міцністю $f_{cm}=20,0\text{МПа}$ ($OK=14\text{ см}$) та забезпеченням 70%-ої відпускну міцності після тепловологісної обробки протягом 14 год. Застосовуються: шлакопортландцемент марки 400, $\rho_{ц}=3,1\text{ кг/л}$, кварцовий пісок ($V_n=9\%, \rho_n=2,6\text{ кг/л}$), гранітний щебінь ($V_{цц}=4\%, \rho_{цц}=2,75\text{ кг/л}$), зола-виносу ($\rho_z=2,35\text{ кг/л}$), пластифікуюча добавка ЛСТ в кількості 0,25% від маси цементу.

За табл. 6.25 знаходимо витрату золи: $Z=210\text{ кг/м}^3$, а за рис. 6.5 – $Ц/В=1,25$. Знаходимо витрату води $V_0=215\text{ кг/м}^3$, з



урахуванням застосування добавки ЛСТ вона складає $215 \times 0,9 = 193 \text{ л/м}^3$. Витрату води V_0 корегуємо з урахуванням поправки V_1 на водопотребу золи (табл.6.27).

$$V = V_0 + V_1 \quad (6.45)$$

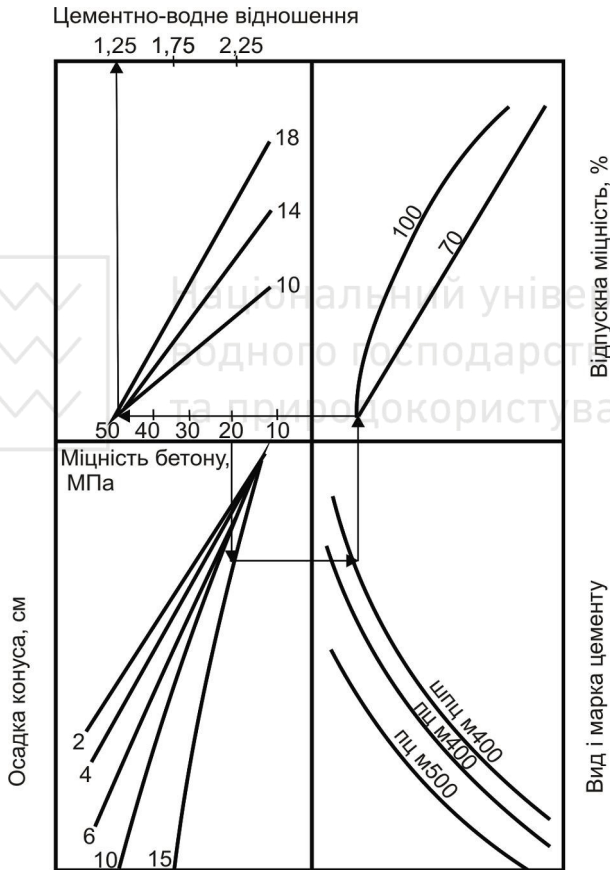


Рис.6.5. Номограма для визначення цементно-водного відношення пропарених золовмісних бетонів



Значення V_1 для золи Бурштинської ТЕС

Ц/В	Витрата золи, $\text{кг}/\text{м}^3$	$V_1, \text{л}/\text{м}^3$
1,2...1,5	100...150	8...10
	150...215	13...24
1,5...2,0	100...150	8...16
	150...215	10...32
2,0...2,5	100...150	10...30
	150...215	18...44

Поправку V_1 приймаємо рівною $20 \text{ л}/\text{м}^3$ (табл. 6.27).
Загальна витрата води складає: $V=193+20=213 \text{ л}/\text{м}^3$.

Витрата цементу – $\text{Ц}=213 \times 1,25=266 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Оптимальну частку піску в суміші заповнювачів знаходимо за рис. 6.6: $r=0,315$.

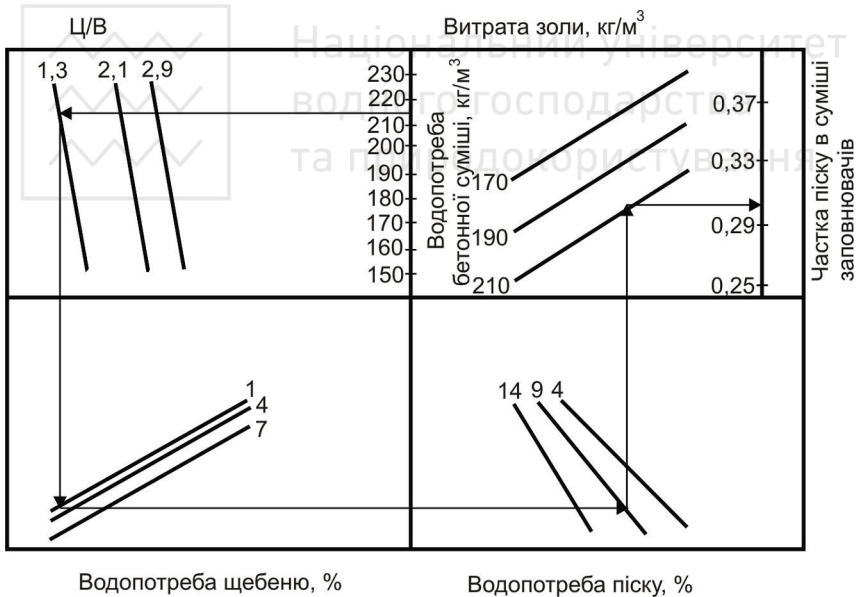


Рис. 6.6. Номограма для визначення частки піску в суміші заповнювачів золвомісного бетону

Витрати піску і щебеню складають:



$$\Pi = \left[1000 - \left(\frac{266}{3,1} + \frac{213}{1,0} + \frac{210}{2,35} \right) \right] 0,315 \cdot 2,6 = 501 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\text{Щ} = \left[1000 - \left(\frac{266}{3,1} + \frac{213}{1,0} + \frac{210}{2,35} + \frac{501}{2,6} \right) \right] 2,75 = 1153 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

6.15. Для отримання бетону класу С20/25 на портландцементі марки М500 і заповнювача низької якості, що має тверднути за нормальних умов введено 150 кг/м³ золи-виносу. Визначити необхідне значення приведенного (Ц/В)_{пр} і розрахувати можливе зменшення Ц/В внаслідок введення золи-виносу. Витрата води 180 л/м³.

1. Необхідний середній рівень міцності бетону:



$$f_{cm} = \frac{25}{0,778} = 32 \text{ МПа};$$

2. Приймаємо А = 0,55. Знайдемо значення (Ц/В)_{пр} за формулою:

$$\left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} \right)_{\text{пр}} = \frac{f_{cm} + A \cdot 0,5 R_c}{A R_c} = \frac{32 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 50}{0,55 \cdot 50} = \frac{45,75}{27,5} = 1,66;$$

3. Величина фактичного Ц/В при введенні добавки золи-виносу 150 кг/м³, K_{ц,е}=0,16 (табл. 4.40):

$$\frac{\text{Ц}}{\text{В}} = 1,66 - \frac{0,16 \cdot 150}{180} = 1,53;$$

4. Розрахункове зменшення Ц/В при введенні золи-виносу:
ΔЦ/В=1,66–1,53=0,13.



Вправи

6.27. Проаналізувати за експериментально-статистичною моделлю розпливу стандартного конусу бетонної суміші (y_1) вплив витрати золи – D_3 , кг/м^3 , та її питомої поверхні – S_3 , $\text{см}^2/\text{г}$ при різних значеннях водоцементного відношення V/Π , витрати води – B , л/м^3 , частки піску в об'ємі заповнювачів – $r(x_3)$. Побудувати відповідні графіки.

$$\begin{aligned} y_1 = & 45,05 + 3,39x_1 + 1,39x_2 - 2,84x_3 - 0,5x_4 + \\ & + 2,78x_5 - 3,07x_1^2 - 3,08x_2^2 + 1,9x_3^2 - 0,07x_4^2 + \\ & + 0,43x_5^2 + 2,25x_1x_4 + 1,13x_2x_5 + 1,12x_3x_4 - 2,25x_3x_5, \end{aligned} \quad (6.46)$$

де $x_1=(V/\Pi-0,6)/0,1$;

$$x_2=(B-190)/10;$$

$$x_3=(r-0,41)/0,07;$$

$$x_4=(D_3-150)/100;$$

$$x_5=(S_3-3900)/1000.$$

6.28. Проаналізувати за експериментально-статистичними моделями водовідділення (y_2), г/л і розчино відділення, % (y_3) литої бетонної суміші, вплив витрати золи – D_3 , кг/м^3 , (x_4) та її питомої поверхні – S_3 , $\text{см}^2/\text{г}$ (x_5) при різних значеннях інших факторів, що враховані в моделях. Фактори, та інтервали їх варіювання вказані в попередній вправі.

$$\begin{aligned} y_2 = & 0,37 - 0,35x_1 + 0,51x_2 + 0,75x_3 - 0,54x_4 - 0,45x_5 - 0,15x_1^2 + \\ & + 0,57x_3^2 - 0,15x_4^2 + 0,23x_5^2 - 0,09x_1x_2 - 0,09x_1x_3 - 0,22x_1x_5 + \\ & + 0,41x_2x_3 - 0,33x_2x_4 - 0,28x_2x_5 - 0,32x_3x_4 - 0,32x_2x_5 + 0,2x_4x_5 \end{aligned} \quad (6.47)$$

$$\begin{aligned} y_3 = & 5,65 + 0,94x_1 - 2,48x_3 - 0,63x_4 + 1,28x_5 - 0,43x_1^2 - 0,43x_2^2 + \\ & + 1,37x_3^2 - 1,25x_4^2 - 1,56x_5^2 - 0,48x_1x_2 + 0,46x_1x_4 + 0,7x_1x_5 + \\ & + 0,56x_2x_3 - 0,56x_2x_4 + 0,81x_3x_4 - 0,53x_3x_5. \end{aligned} \quad (6.48)$$

6.29. Проаналізувати за експериментально-статистичною моделлю (y_4) міцності литого цементно-золяного бетону на стиск у віці 28 діб (y_4) вплив витрати золи – D_3 , кг/м^3 (x_4), та її



питомої поверхні – $S_3, \text{см}^2/\text{г}$ (x_5) при різних значеннях інших факторів, що враховані в моделі. Фактори, та інтервали їх варіювання вказані у вправі 6.27.

$$y_4 = 261 - 4,57x_1 - 0,65x_3 + 2,52x_4 - 2,17x_5 + 1,78x_1^2 + 3,68x_2^2 + 2,43x_3^2 - 6,21x_4^2 - 4,71x_5^2 - 1,74x_1x_3 + 1,28x_2x_5 - 0,63x_3x_5. \quad (6.49)$$

6.30. За допомогою експериментально-статистичних моделей розпливу стандартного конусу (y_1) (вправа 6.27) і міцності на стиск (вправа 6.29) розрахувати склади бетонів при різних витратах золи та її питомої поверхні.

6.31. Визначити можливе зменшення Ц/В з введенням в бетонну суміш золи-виносу для отримання бетону класу С25/30 на портландцементі марки М500 і заповнювачах середньої якості при рухомості бетонної суміші Р3. Зола-виносу з коефіцієнтом цементуючої ефективності $K_{це} = 0,18$ вводиться в бетонну суміш у кількості 150 кг/м^3 .

6.32. Для високоміцних дрібнозернистих бетонів отримані експериментально-статистичні моделі, що характеризують вплив добавки метакаоліну (МТК) залежно від водов'язучого відношення, витрати в'язучого і модуля крупності піску (M_k) на міцність бетону у віці 3 доби (f_{cm}^3) і 28 діб (f_{cm}^{28}):

$$f_{cm}^3 = 41,6 - 8,0x_1 + 2,7x_2 + 0,9x_3 + 2,7x_4 - 1,0x_1^2 - 1,6x_2^2 - 1,5x_3^2 - 1,4x_4^2 + 1,5x_1x_2 + 1,0x_1x_3 + 1,2x_2x_3 \quad (6.50)$$

$$f_{cm}^{28} = 76,5 - 9,9x_1 + 3,5x_2 + 2,03x_3 + 2,8x_4 - 3,0x_1^2 - 1,0x_2^2 - 4,2x_3^2 - 1,3x_4^2 - 0,9x_1x_2 + 1,5x_1x_3 + 2,7x_2x_3 \quad (6.51)$$

$$x_1 = ((B / Ц + МТК) - 0,37) / 0,03;$$

$$x_2 = ((Ц + МТК) - 500) / 50;$$

де

$$x_3 = (МТК - 10) / 5;$$

$$x_4 = (M_k - 2,0) / 0,4.$$



Розрахувати при певних значеннях f_{cm}^3 і f_{cm}^{28} як впливає добавка МТК на необхідні значення В/Ц при різних витратах цементу і M_k піску. Результати розрахунків представити графічно.

6.33. З допомогою експериментально-статистичних моделей приведених у попередній вправі розрахувати для а) $f_{cm}^3 = 35 \text{ МПа}$, $f_{cm}^{28} = 75 \text{ МПа}$, б) $f_{cm}^3 = 35 \text{ МПа}$ і $f_{cm}^{28} = 80 \text{ МПа}$ значення необхідного Ц/В при різному вмісті добавки метакаоліну МТК, а також витратах цементу і M_k на нижньому та верхньому рівнях.

6.5. Дрібнозернисті бетони

У дрібнозернистих бетонах (ДЗБ) максимальну крупність заповнювача обмежують 10 мм. Розповсюдженим різновидом цього виду бетону є *піщаний бетон*, який не містить крупного заповнювача. Висока питома поверхня заповнювача в дрібнозернистому бетоні обумовлює підвищену (на 20...40%) витрату цементу, необхідну для заповнення міжзернових пор і створення достатнього шару обмазки з цементного тіста. Зниження витрати цементу досягається вибором оптимального гранулометричного складу заповнювача, введенням активних мінеральних добавок, застосуванням суперпластифікаторів і ефективних способів ущільнення.

Для розрахунку міцності на стиск дрібнозернистого бетону можна використовувати формулу загального виду. Аналіз експериментальних даних дозволяє запропонувати усереднені значення коефіцієнтів А і b у формулі (4.24).

Ю.М. Баженов запропонував залежність міцності піщаного бетону у вигляді емпіричної формули:

$$f_{cm} = AR_u \left(\frac{Ц}{B} - 0,8 \right), \quad (6.52)$$

де коефіцієнт А для матеріалів високої якості – 0,8, середньої – 0,75 і низької – 0,65.

При відомому значенні об'єму втягнутого повітря ($V_{пв}$) в формулі (6.52) враховується $\frac{Ц}{(B+V_{пв})}$.



Установлено, що для кожного складу піщаного бетону є оптимальне значення В/Ц, при якому забезпечуються найвищі значення міцності. При низьких значеннях В/Ц ($B/C \leq 0,4$) міцність бетону змінюється лінійно залежно від цементно:піщаного співвідношення (Ц:П). При зменшенні Ц:П нижче оптимальних значень знижується легкоукладальність дрібнозернистих бетонних сумішей (рис. 6.7), що утруднює їх укладання, при збільшенні зростає кількість надлишкової води в бетоні, що також приводить до зниження міцності.

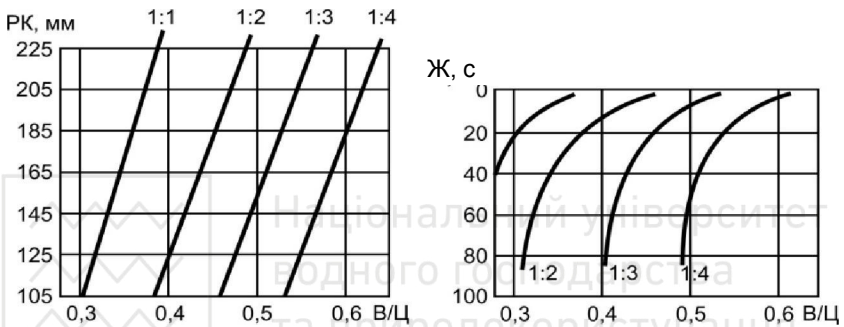


Рис. 6.7. Графіки для вибору співвідношення між цементом і піском середньої крупності (водопотреба 7%), яке забезпечує задані значення розпливу конуса (РК) і жорсткості (Ж) цементно-піщаних сумішей

В.П. Сизов для піщаного, як і для звичайного бетону, при розрахунку В/Ц запропонував застосовувати формулу:

$$B / C = \frac{(A + \sum \Delta A) R_y}{\frac{f_{cm}}{K_1 K_2} + 0,5(A + \sum \Delta A) R_y}, \quad (6.53)$$

де $\sum \Delta A$ – сума відповідних поправок залежно від показників легкоукладальності, модуля крупності піску, нормальної густоти цементного тіста.

Коефіцієнт K_1 залежить від мінералогічного складу цементу: при $C_3A > 10\%$) $K_1 = 0,88$; $C_3A < 10\%$) $R_1 = 0,92$; $C_3A < 6\%$



$R_1=0,99$; $C_3S>55\%$ $K_1=0,92$. Коефіцієнт K_2 залежить від коефіцієнта варіації міцності бетону. При $V_c=9...12\%$ $K_2=0,98$, $V_c=13\%$ $K_2=0,95$ і $V_c=14...17\%$ $K_2=0,92$.

Зміна в піску вмісту відмулюваних домішок від 1 до 5% викликає зменшення значення коефіцієнта A від 0,52 до 0,47. У цих же межах відповідно зменшується значення A при переході від малорухомих до литих сумішей, зниженні модуля крупності піску від 3 до 1, збільшенні нормальної густоти цементного тіста від 27 до 34%.

Якість заповнювача для дрібнозернистих бетонів позначається на його основних властивостях у більшій мірі ніж для звичайних важких бетонів. За даними Ю.М. Баженова заміна в піщаному бетоні крупного піску дрібним може зменшувати міцність на 25...30%, а іноді в 2...3 рази. Як при оптимальних В/Ц, так і при однаковій легкоукладальності суміші при застосуванні піску середньої крупності найбільш економічні склади, що забезпечують мінімальне відношення витрати цементу до міцності бетону, досягаються при Ц:П=1:2...1:3. При переході на дрібнозернисті піски оптимальними виявляються склади 1:1...1:1,5.

Особливістю дрібнозернистих бетонних сумішей є підвищене повітровтягування.

Об'єм втягнутого повітря (рис. 6.8) залежить від параметрів і особливостей конкретного способу ущільнення. Наприклад, для сипучих бетонних сумішей, що ущільнюються вібропресуванням кількість затисненого повітря можна знайти за рис. 6.8 залежно від амплітуди і тривалості вібрування, величини динамічного привантажування і тиску пресування.

Численні експериментальні дані показують, що на міцність дрібнозернистого бетону при стиску, крім Ц/В, активності цементу і якості заповнювача, впливає багато інших факторів, таких як легкоукладальність суміші, умови твердіння бетону, наявність і кількість активних мінеральних добавок і т.д. Поряд з цим значний вплив на властивості дрібнозернистого бетону має також і спосіб ущільнення суміші.

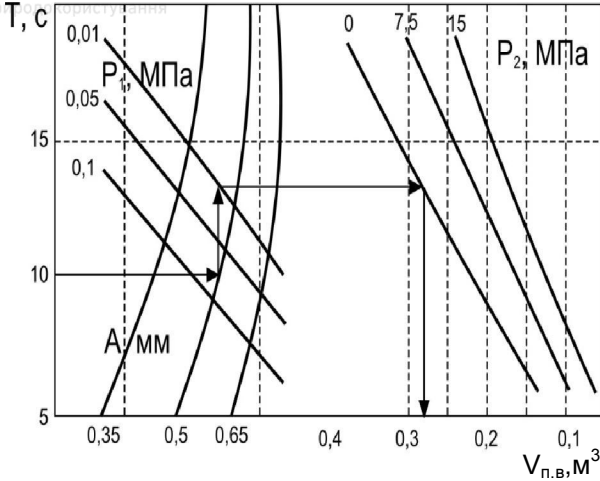


Рис.6.8. Номограма для визначення об'єму втягнутого повітря ($V_{п.в.}$) у вібропресованому дрібнозернистому бетоні
 A – амплітуда вібрування; T – тривалість вібрування; P_1 – величина динамічного привантажування; P_2 – тиск пресування

При заданому V/C співвідношення між піском і цементом ($П:Ц=n$) однозначно визначається показником легкоукладальності суміші (рис. 6.7).

Відомі значення V/C і n дозволяють легко знайти, на основі рівняння матеріального балансу (суми абсолютних об'ємів) витрати всіх компонентів дрібнозернистої бетонної суміші:

$$Ц = \frac{1000 - V_{п.в.}}{1/\rho_{ц} + V/C + n/\rho_n}, \quad (6.54)$$

$$B = Ц \cdot V/C, \quad (6.55)$$

$$П = nЦ. \quad (6.56)$$

У наведених формулах: $V_{п.в.}$ – об'єм втягнутого повітря, л/м³; $\rho_{ц}$ і ρ_n – густина цементу і піску в кг/л.

Витрату піску в дрібнозернистих бетонних сумішах можна розраховувати також на основі уявлень про заповнення



цементним тістом об'єму пустот між зернами піску з урахуванням їх необхідного розсунення. У цьому випадку розв'язується система рівнянь:

$$\frac{\Pi}{\rho_{ц}} + \frac{\Pi}{\rho_n} + B + V_{н.в} = 1, \quad (6.57)$$

$$\frac{\Pi}{\rho_{ц}} + B = \alpha_{ц.м} \Pi_n^0 \frac{\Pi}{\rho_{н.н}}, \quad (6.58)$$

де $\rho_{н.н}$ – насипна густина піску, кг/м^3 ;

Π_n^0 – пустотність піску;

$\alpha_{ц.т}$ – коефіцієнт заповнення пустот і розсунення зерен піску.

Звідси:



Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$\Pi = \frac{\rho_n \rho_{н.н} (1 - V_{н.в})}{\rho_{н.н} + \alpha_{ц.м} \Pi_n^0 \rho_n}. \quad (6.59)$$

Формулу (6.59) можна також записати у виді:

$$\Pi = \frac{\rho_{н.н} (1 - V_{н.в})}{1 + \Pi_n^0 (\alpha_{ц.м} - 1)}. \quad (6.60)$$

За експериментальними даними В.П. Сизова коефіцієнт $\alpha_{ц.т}$ залежить від показників легкоукладальності дрібнозернистих бетонних сумішей, величини Π/B , модуля крупності піску і нормальної густоти цементного тіста.

Розрахувавши витрату піску за формулою (6.60) можна знайти витрату цементу, як відношення всього об'єму цементного тіста в бетонній суміші ($V_{ц.т}$) до виходу цементного тіста з 1 кг цементу ($V'_{ц.м}$).

Об'єм цементного тіста, л/м^3 :

$$V_{ц.т} = 1000 - V_n, \quad (6.61)$$

де V_n – абсолютний об'єм піску в л в 1 м^3 бетонної суміші.



Вихід цементного тіста (л) з 1 кг цементу:

$$V'_{ц.м} = \frac{1}{\rho_{ц}} + B / Ц, \quad (6.62)$$

$$Ц = \frac{V_{ц.м}}{V'_{ц.м}}. \quad (6.63)$$

Для влаштування дорожніх покриттів і основ з піщаного бетону СоюздорНДІ рекомендовано для забезпечення необхідної проектної міцності бетону на розтяг при згині ($f_{c.tf}$) використовувати наступну формулу для розрахунку В/Ц:

$$B / Ц = \frac{AR_{ц.32}}{f_{c.tf} + A \cdot 0,25R_{ц.32}}, \quad (6.64)$$

де: $R_{ц.32}$ – міцність портландцементу на розтяг при згині, МПа;

A – коефіцієнт, який приймається при застосуванні крупних пісків – 0,5, середніх – 0,4 і дрібних – 0,3.

При розрахунках складу піщаного бетону за методикою СоюзДорНДІ витрату води (B) приймають по довідковим даним залежно від легкоукладальності бетонної суміші, крупності піску, виду і кількості пластифікуючих та повітрявтягуючих добавок. Послідовно розраховують:

вміст цементу ($Ц$), кг/м³:

$$Ц = B : B / Ц, \quad (6.65)$$

абсолютний об'єм цементного тіста ($V_{ц.т}$), л/м³:

$$V_{ц.м} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + B, \quad (6.66)$$



вміст піску з урахуванням орієнтовного об'єму втягнутого повітря ($V_{п.в}$):

$$П = [1000 - (V_{ц.м} + V_{п.в})] \rho_{п.} \quad (6.67)$$

При жорсткості бетонної суміші 10...20 с, застосуванні крупного і середнього піску $V_{п.в}=30...50$ л/м³, дрібного $V_{п.в}=60...80$ л/м³.

Далі розраховують витрату цементу (Π'), піску (Π') і води (B') на пробний лабораторний заміс:

$$\Pi' = \frac{m_3}{1+n+B/\Pi}; \Pi' = \frac{m_3 \cdot n}{1+n+B/\Pi}; B' = \Pi' \cdot B/\Pi, \quad (6.68)$$

де m_3 – маса лабораторного замісу;

n – Π/Π .

Після досягнення необхідної легкоукладальності регулюванням при необхідності витрати води і відповідно об'єму цементного тіста знаходять фактичну густину ущільненої бетонної суміші ($\rho_{б.с}$) і розраховують об'єм втягнутого повітря:

$$V_{п.в} = \left[\frac{1 - \rho_{б.с} / (\Pi' + \Pi' + B')}{\Pi' / \rho_{ц} + \Pi' / \rho_{п} + B} \right] \cdot 100\%. \quad (6.69)$$

Фактичні витрати компонентів на 1 м³ піщаного бетону визначають за формулами:

$$\Pi = \frac{\rho_{б.с}}{1+n+B/\Pi}; \Pi = \frac{\rho_{б.с} \cdot n}{1+n+B/\Pi}; B = \frac{\rho_{б.с} \cdot B/\Pi}{1+n+B/\Pi};$$

$$V_{п.в} = 1000 - (\Pi/\rho_{п} + \Pi/\rho_{п}). \quad (6.70)$$

Вибір методики проектування складів дрібнозернистих бетонів здійснюють залежно від конкретних умов та особливостей завдання.

Дрібнозернисті бетони з застосуванням кам'яних відсівів. До дрібнозернистих бетонів відносяться поряд з



піщаними також бетони з застосуванням в якості заповнювача відсівів, що утворюються при подрібненні гірських порід на щєбінь. Особливістю незбагачених відсівів є підвищений вміст пиловидних часток менше 0.16 мм. Застосування таких відсівів як кондиційного заповнювача можливо лише при введенні у бетонну суміш добавки суперпластифікатора. В умовах обмеженого водовмісту зерна <0.16 мм виконують в бетонах функцію активного наповнювача, який сприяє структуроутворенню і підвищує щільність бетону.

Вміст зерен <0.16 мм залежно від вмісту суперпластифікатора і необхідної рухомості бетонної суміші впливає на витрату цементу.

Для покращення зернового складу відсівів як заповнювача ДЗБ його доцільно змішувати з природним піском.

Кількість природного піску, що слід додавати до піску з відсівів, з урахуванням вмісту частинок розміром більше 0,63 мм визначається за формулою:

$$n = \frac{A_B - A_H}{A_B - A_{II}}, \quad (6.71)$$

де A_H , A_{II} , A_B – повні залишки на ситі 0,63 мм для необхідного піску, піску природного та піску з відсівів, відповідно.

Витрата піску з відсівів (Π_6) розраховується з урахуванням його співвідношення з природним піском n за формулою (6.72):

$$\Pi_6 = \Pi \cdot (1 - n), \quad (6.72)$$

де Π – витрата змішаного дрібного заповнювача в бетоні, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Витрата природного піску:

$$\Pi_n = \Pi - \Pi_6. \quad (6.73)$$

Зміна густини змішаного дрібного заповнювача за рахунок використання піску з відсівів враховується за формулою:

$$\rho_n = n \cdot \rho_{n.6} + (1 - n) \rho_{n.n}, \quad (6.74)$$



де $\rho_{n.в}$ та $\rho_{n.п}$ – дійсна густина піску з відсівів та природного піску, відповідно, кг/м³.

Із застосуванням незбагачених гранітних відсівів за умови застосування добавок суперпластифікаторів, а також їх композицій з мікрокремнеземом або метакаоліном і низьких В/Ц можливе отримання високоміцних ДЗБ. В табл. 6.28 наведено як приклад результати випробувань ДЗБ з високоактивними мінеральними добавками і добавками суперпластифікаторів.

Таблиця 6.28
Вплив добавок на міцність дрібнозернистих бетонів на гранітних відсівах

№ серії	Суперпластифікатор, %	Мінеральна добавка, %	В/Ц	ОК, см	Міцність при стиску (МПа), у віці (діб)		
					3	7	28
1	Melflux 2641F, 0,5%	-	0,32	12	63	71	78
2	SikaVC 225P, 0,5%	-	0,34	14	45	69	76
3	Melflux 2641F, 0,5%	метакаолін, 5%	0,37	12	43	48	53
4	Melflux 2641F, 0,5%	мікрокремнезем, 5%	0,35	13	40	56	62
5	Melflux 2641F, 1%	метакаолін, 5%	0,35	13	60	75	85
6	Melflux 2641F, 1%	мікрокремнезем, 5%	0,33	14	58	80	90

Експериментальні дані, що наведені в табл. 6.28 отримані при застосуванні незбагачених гранітних відсівів з $M_k=3.23$ та вмістом часток <0.16 мм 17% при добавленні кварцового піску фракції 2.5...5 мм в кількості 20%. Бетони мали однакове співвідношення заповнювача до цементу (Зап/Ц=3). Рухомість бетонної суміші підтримувалась в межах марки РЗ.



Обробкою експериментальних даних була отримана розрахункова формула міцності бетону при застосуванні незбагачених гранітних відсівів, яка враховує вплив часток <math><0.16\text{ мм}</math> без і при введенні в бетонну суміш добавки суперпластифікатора:

$$f_{cm}^{28} = 0,44R_u((C/B)_{np} - 0,65), \quad (6.75)$$

де $(C/B)_{np}$ – приведенне цементно-водне відношення:

$$(C/B)_{np} = \frac{C + K_{ц.е}H}{B}, \quad (6.76)$$

де H – вміст наповнювача в ролі якого виступають пиловидні зерна відсівів;

$K_{ц.е}$ – коефіцієнт цементуючої ефективності наповнювача, величина якого залежить від вмісту добавки суперпластифікатора. В комплексі з добавкою пластифікатора можуть бути введені високоактивні мінеральні добавки, наприклад, метакаолін, (табл. 6.29).

Таблиця 6.29

Коефіцієнти цементуючої ефективності метакаоліну і пилу гранітних відсівів при використанні полікарбосилатного суперпластифікатора

Вміст суперпластифікатора Melflux 2641F, %	Коефіцієнт цементуючої ефективності мінеральних наповнювачів	
	частинки <math><0.16\text{ мм}</math> гранітного відсіву	метакаолін
0	-0,08	0,12
0,35	0,11	3,22
0,7	0,58	5,89

Для визначення витрати води використовуються експериментальні дані. На рис. 6.9 приведена номограма для визначення витрати води в ДЗБ на гранітних відсівах з добавкою полікарбосилатного суперпластифікатора і метакаоліну (МТК).



Кількість суперпластифікатора, %

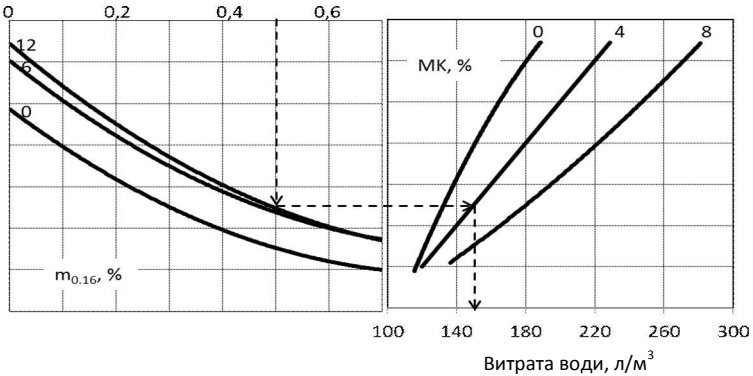


Рис. 6.9. Номограма для визначення витрати води для дрібнозернистого бетону з використанням гранітних відсівів (ОК=16...20 см)

При відомих значеннях $(Ц/В)_{пр.}$, вмісту у відсівах пиловидних часток та їх цементуючої ефективності, а також необхідного вмісту води можна розрахувати вміст цементу:

$$Ц = (Ц / В)_{пр} \cdot В - К_{ц.е} Н$$

Приклади

6.16. Розрахувати склад піщаного бетону з міцністю 20 МПа для залізобетонної плити із легкоукладальністю суміші 5...10 с (Ж1).

Матеріали: портландцемент М400, пісок з модулем крупності $M_k=1,5$, густиною $\rho_p=2,65$ кг/л.

Розрахунок виконуємо за методом Ю.М. Баженова:

1. За формулою (6.52) знаходимо $В/Ц$:

$$В/Ц = 0,75 \cdot 40 / (20 + 0,8 \cdot 0,75 \cdot 40) = 0,68.$$

2. За графіком (рис. 6.7) встановлюємо відношення $Ц:П$. Воно дорівнює 1:4. Враховуючи поправку на крупність піску (рис. 6.10), уточнюємо відношення $Ц:П$. Воно складає 1:3,7.



3. Витрату цементу знаходимо за формулою (6.54) без урахування об'єму втягнутого повітря ($V_{п.в}$):

$$Ц = \frac{1000}{\left(\frac{1}{3,1}\right) + 0,55 + \left(\frac{3,7}{2,63}\right)} = 440 \text{ кг/м}^3.$$

4. Витрата води (6.55):

$$B = 440 \cdot 0,55 = 242 \text{ л/м}^3.$$

5. Витрата піску (6.56):

$$П = 3,7 \cdot 440 = 1630 \text{ кг/м}^3.$$

6.17. Розрахувати склад піщаного бетону з проектною міцністю на стиск 30 МПа, рухомістю бетонної суміші ОК=7 см.

Матеріали: пісок $\rho_{п.п}=1,46$ кг/л, $\rho_{п}=2,61$ кг/л, пустотність $П_n^0=0,44$, $M_{кр}=1$, вміст пилу та мулу 1%. Цемент марки М500 ($C_3S>55\%$, $C_3A<10\%$), НГ=27%, $\rho_{ц}=3,1$ кг/л; об'єм втягнутого повітря $V_{п.в}=42$ л/м³. Коефіцієнт варіації міцності бетону $V_c=13\%$.

Розрахунок здійснюємо за методикою В.П. Сизова. Після внесення відповідних поправок ($\sum \Delta A$) приймаючи у формулі (6.53) $K_1=0,92$, $K_2=0,95$ розраховуємо B/C .

$$1. B / C = \frac{(0,52 - 0,05)50}{\frac{30}{0,92 \cdot 0,95} + 0,5(0,52 - 0,05)50} = \frac{235}{461} = 0,51.$$

2. Витрата піску за формулою (6.60) при $\alpha_{ц.т}=1,2^*$; $V_{п.в}=42$ л/м³:

*Коефіцієнт $\alpha_{ц.т}$ знайдений за номограмою (Руководство по подбору составов тяжелого бетона, М.НИИЖБ, 1979).



$$\Pi = \frac{1,46 \cdot 958}{1 + 0,44(1,2 - 1)} = 1286 \text{ кг/м}^3,$$

3. Абсолютний об'єм піску:

$$V_n = 1286 / 2,61 = 493 \text{ л/м}^3.$$

4. Абсолютний об'єм цементного тіста:

$$V_{u,m} = 1000 - (V_n + V_{n,c}) = 1000 - (493 + 42) = 465 \text{ л/м}^3$$

5. Вихід цементного тіста з 1 кг цементу:

$$V'_{u,m} = 1/\rho_u + B/C = 1/3,1 + 0,51 = 0,323 + 0,51 = 0,833 \text{ л/м}^3.$$

6. Витрата цементу :

$$Ц = V_{u,m} / V'_{u,m} = 465 / 0,833 = 558 \text{ кг/м}^3.$$

7. Витрата води :

$$B = Ц \cdot B/C = 558 \cdot 0,51 = 284 \text{ л/м}^3.$$

6.18. Розрахувати і відкорегувати склад піщаного цементного бетону для дорожнього покриття з проектною міцністю на розтяг при згині 5 МПа і стиску не менше 30 МПа. Рухомість бетонної суміші – ОК=1...4 см (P1).

Матеріали: Портландцемент М400, $\rho_c=3,1$ кг/л. Міцність цементу при згині у віці 28 діб – 6,1 МПа. Заповнювач – кварцовий пісок $M_{кр}=2,59$, $\rho_n=2,6$ кг/л. Поверхнево-активна речовини – ЛСТ. Вміст втягнутого повітря – 30 л/м³.

Для розрахунку застосовуємо методику СоюзДорНДІ.



1. Визначаємо водоцементне відношення, яке необхідне для отримання заданої міцності піщаного бетону за міцністю на розтяг при згині (6.64):

$$\frac{B}{Ц} = \frac{0,5 \cdot 6,1}{5 + 0,5 \cdot 0,25 \cdot 6,1} = 0,53.$$

2. Рекомендоване значення водовмісту бетонної суміші для забезпечення заданої легкоукладальності при введенні 0,2% ЛСТ (від маси цементу) складає 195 л/м³.

3. Вміст цементу:

$$Ц = 195 : 0,53 = 368 \text{ кг/м}^3.$$

4. Абсолютний об'єм цементного тіста:

$$V_{ц.т} = \frac{368}{3,1} + 195 = 314 \text{ л/м}^3.$$

5. Вміст піску:

$$П = [1000 - (314 + 30)] \cdot 2,60 = 1706 \text{ кг/м}^3.$$

6. Співвідношення п=Ц:П:

$$п=1:4,64.$$

7. Розраховуємо кількість матеріалів на пробний лабораторний заміс для визначення легкоукладальності суміші і об'єму втягнутого повітря.

Об'єм втягнутого повітря склав 21 л/м³. Густина бетонної суміші в ущільненому стані ($\rho_{б.с}$) склала 2,29 кг/л.

8. Уточнюємо водопотребу цементно-піщаної суміші з урахуванням фактичної її густини в ущільненому стані за формулою :



$$B = \frac{\rho_{б.с} \cdot B / Ц}{1 + n + B / Ц} = \frac{2290 \cdot 0,53}{1 + 4,64 + 0,53} = 196 \text{ л/м}^3.$$

9. Для уточнення залежності $f_{cm} = f(C/B)$ на даних матеріалах приймаємо додатково значення водоцементного відношення – 0,43 і 0,63. З урахуванням уточнених значень водопотреби суміші і кількості повітря за формулами (6.65 – 6.67) розраховуємо три склади бетону. Результати зводимо в табл. 6.30.

Таблиця 6.30

Розрахункові склади бетону

Вміст компонентів суміші	В/Ц		
	0,43	0,53	0,63
Вода, л/м ³	196	196	196
Цемент, кг/м ³	457	370	312
Пісок, кг/м ³	1650	1725	1770
Добавка ЛСТ в розрахунку на суху речовину, кг/м ³	0,914	0,74	0,624
Ц : П	1:3,62	1:4,67	1: 5,68

Розраховуємо кількість матеріалів на лабораторний заміс. Виготовляємо зразки-куби та випробовуємо їх через 28 діб на міцність. Результати випробувань зводимо в табл. 6.31.

Таблиця 6.31

Результати випробувань бетону розрахункових складів

В/Ц	Ц/В	Границя міцності, МПа	
		на розтяг при згині	при стиску
0,43	2,33	6,14	47
0,53	1,89	4,86	30
0,63	1,59	4,04	18,5

10. За результатами випробувань будемо графіки залежностей $f_{c,cf} = f\left(\frac{Ц}{B}\right)$ або $f_{cm} = f\left(\frac{Ц}{B}\right)$ і визначаємо значення

Ц/В, яке необхідне для отримання заданих показників міцності піщаного бетону. Необхідне Ц/В=0,50.

11. Розраховуємо кількість матеріалів на 1 м³ бетону за формулами (6.65-6.67) при водопотребі рівній 196 л/м³, і кількості повітря – 21 л/м³:



$$\begin{aligned} C &= 196 : 0,50 = 392 \text{ кг/м}^3, \\ P &= \left[1000 - \left(\frac{392}{3,1} + 196 + 21 \right) \right] \cdot 2,6 = 1705 \text{ кг/м}^3; \\ C : P &= 1 : 4,35 \end{aligned}$$

6.19. Розрахувати склади золовмісних дрібнозернистих бетонів (ДЗБ) з заданими значеннями міцності, морозостійкості та водонепроникності.

В результаті проведення експериментів з застосуванням методу математичного планування отримані експериментально-статистичні моделі міцнісних показників, морозостійкості, водонепроникності та водопотреби бетонної суміші і на їх основі побудовані номограми (рис. 6.11, 6.12), а також визначені співвідношення при заданих умовах класів бетону за міцністю, і марок за морозостійкістю та водонепроникністю (табл. 6.32). Знання цих співвідношень дозволяє знайти визначальний параметр і відповідний йому клас бетону за міцністю.

Наприклад, необхідно підібрати склад золовмісного ДЗБ класу С16/20, F100, W4 з осадкою конуса суміші 4 см. Застосовується портландцемент марки 400, НГ=25%; зола – виносу Буриштинської ТЕС з питомою поверхнею 4000 см²/г і $\rho_b=2,3$ кг/л; пісок з $M_{кр}=2,2$ і $\rho_n=2,6$ кг/л, водопотребою $B_n=6\%$.

Таблиця 6.32

Орієнтовні співвідношення властивостей бетону з добавкою золи-виносу

Клас бетону за міцністю на стиск (С)	Морозостійкість (F)	Водонепроникність (W)
C12/15	75...100	2
C16/20	100...150	2...4
C20/25	150...200	4
C25/30	250...300	6...8
C32/40	350...400	8...10

1. За табл. 6.32 встановлюємо, що заданий клас бетону (С20) забезпечує необхідні його марки за морозостійкістю та водонепроникністю (F100,W4). Попередніми експериментами



визначили необхідне золо-цементне відношення $Z/C=0,75$.

2. За номограмою 6.11 визначаємо необхідне C/B :

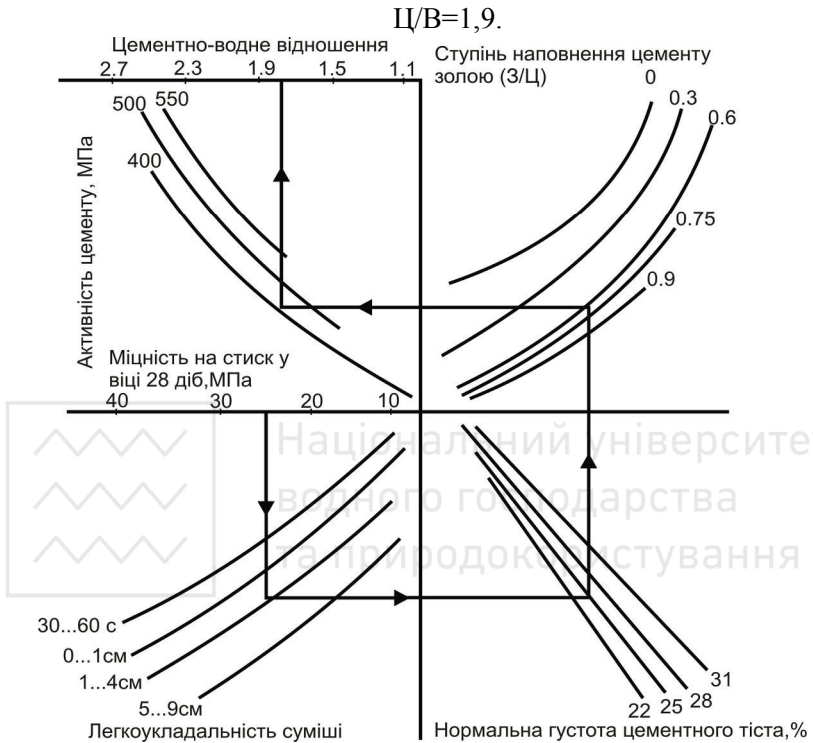


Рис. 6.11. Визначення C/B дрібнозернистих бетонів, наповнених золою-виносом

3. За номограмою 6.12 визначаємо необхідний водовміст суміші:

$$B=195 \text{ л/м}^3.$$



4. Витрату цементу і золи знаходимо за формулою:

$$\begin{aligned} \text{Ц} &= \text{В} \cdot \text{Ц}/\text{В}, \\ \text{Ц} &= 1,9 \cdot 195 = 370 \text{ кг/м}^3, \\ \text{Н} &= \text{Ц} \cdot \text{Н}/\text{Ц}, \\ \text{З} &= 370 \cdot 0,75 = 278 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

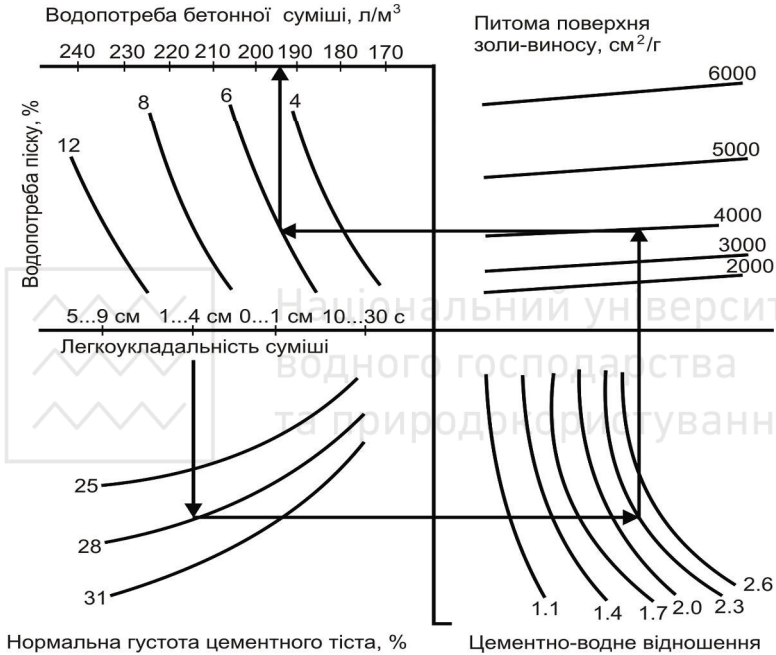


Рис. 6.12. Визначення необхідного водовмісту дрібнозернистих бетонних сумішей з золою-виносу

5. Об'єм золовмісного тіста визначаємо за формулою:

$$V_{\text{зцт}} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\text{Н}}{\rho_{\text{н}}} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{в}}},$$

$$V_{\text{зцт}} = 370/3,1 + 278/2,3 + 195/1,0 = 435 \text{ л/м}^3.$$



6. Витрату піску визначаємо за формулою:

$$\Pi = (1000 - V_{\text{згт}}) \rho_{\text{п}},$$
$$\Pi = (1000 - 435) \cdot 2,6 = 1469 \text{ кг/м}^3.$$

6.20. Розрахувати склад дрібнозернистого бетону з 28-добовою міцністю на стиск 40 МПа. В якості заповнювача застосовують гранітні відсівы з вмістом частинок <0,16мм – 24%. Рухомість бетонної суміші (ОК) становить 10 см. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор СП-1 в кількості 0,6% маси цементу. Рухомість суміші ОК=10 см.

1. За заданими активністю цементу та необхідним значенням міцності бетону у віці 28 діб, за формулою (4.24, табл. 5.43) знаходимо потрібне Ц/В і В/Ц

$$\frac{\text{Ц}}{\text{В}} = \left(\frac{f_{\text{см}}^{28}}{0,44 R_{\text{ц}}} \right) + 0,65 = \left(\frac{40}{0,44 \cdot 50} \right) + 0,65 = 2,47.$$
$$\text{В/Ц} = 1/2,47 = 0,41.$$

2. За номограмою (рис. 6.13) знаходимо витрату цементу, яка становить 460 кг/м³.

3. Витрата води:

$$\text{В} = 460 \cdot 0,41 = 189 \text{ л/м}^3.$$

4. Розраховуємо об'єм цементного тіста, об'єм та масу заповнювача:

$$V_{\text{ц.т.}} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \text{В} = \frac{460}{3,1} + 189 = 337 \text{ л};$$
$$V_3 = 1000 - V_{\text{ц.т.}} = 1000 - 337 = 663 \text{ л};$$
$$M_3 = V_3 \times \rho_3 = 663 \times 2,7 = 1790 \text{ кг/м}^3.$$



Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад:

- цемент – 460 кг/м^3 ;
- відсів – 1790 кг/м^3 ;
- вода – 189 л/м^3 ;
- суперпластифікатор СП-1 – $2,76 \text{ кг/м}^3$.

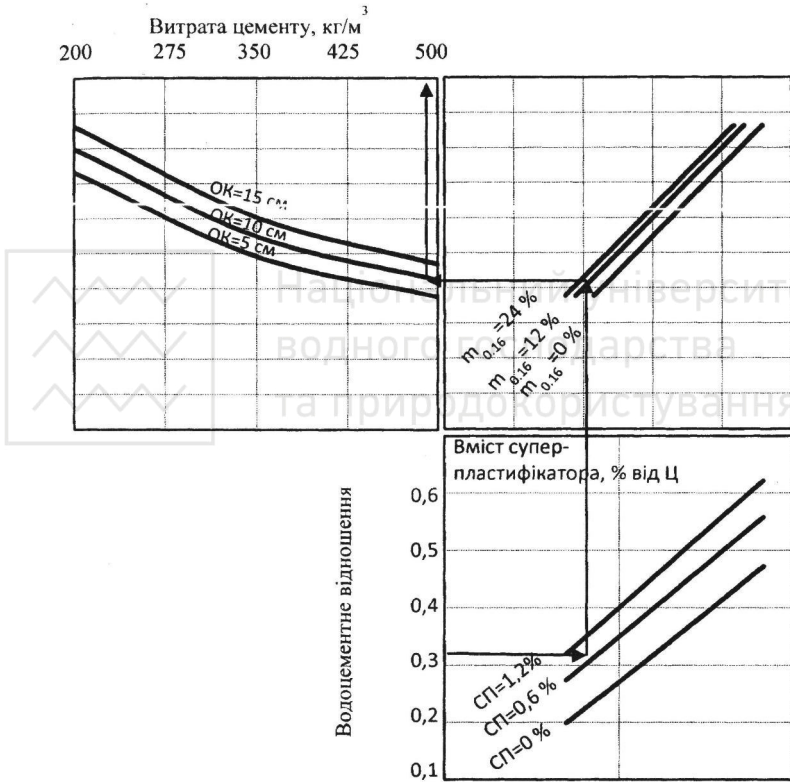


Рис.6.13. Номограма для визначення витрати цементу



Вправи

6.34. За методикою Ю.М. Баженова розрахувати склад піщаного бетону з міцністю на стиск в 28-добовому віці 40 МПа і легкоукладальністю бетонної суміші 60 с. Бетон виготовляється на портландцементі марки М500 і кварцовому піску з модулем крупності $M_k=2,5$, густиною 2,65 кг/л.

6.35. Розрахувати за методикою В.П. Сизова склад піщаного бетону з проектною міцністю 25 МПа, осадкою конусу бетонної суміші $OK=5$ см при застосуванні високоякісного цементу М400, кварцового піску з модулем крупності 1,5 та вмістом відмулюваних часток 5%, $\rho_n=2,65$ кг/л, $\rho_{n,n}=1,42$ кг/л, Об'єм втягнутого повітря ($V_{п.в.}$) – 4%. Коефіцієнт варіації міцності бетону $V_c=15\%$. Коефіцієнт $\alpha_{п.т}=1,2$.

6.36. Розрахувати за методикою СоюзДорНДІ склад піщаного бетону з міцністю бетону на розтяг при згині 4.5 МПа. Осадка конуса бетонної суміші 2...4 см. Бетон виготовляється на портландцементі з міцністю на розтяг при згині 5.5 МПа. Пісок має модуль крупності $M_k=2.3$, $\rho_n=2,65$ кг/л. В бетонну суміш вводиться пластифікуюча добавка, яка дозволяє забезпечити необхідну легкоукладальність бетонної суміші при витраті води 195 л/м³. Об'єм втягнутого повітря 3,5%.

6.37. Для дрібнозернистих бетонів з застосуванням в якості заповнювачів гранітних відсівів були отримані експериментально-статистичні моделі міцності бетону на стиск (f_{cm}^{28}) і розпливу конуса (PK):

$$f_{cm}^{28} = 29,6 + 2,21x_2 + 6,54x_3 + 1,17x_4 - 2,2x_1^2 - 1,7x_2^2 - 2,45x_3^2 - 2,65x_4^2 + 1,66x_1x_2 - 1,39x_1x_3 + 1,57x_2x_3 + 3,02x_3x_4 \quad (6.77)$$

$$PK = 129,7 + 12,1x_1 - 5,1 + x_2 + 20,8x_3 - 19,8x_4 + 2,1x_1^2 - 2,9x_2^2 + 3,1x_3^2 - 3,9x_4^2 + 5,8x_1x_3 - 4,8x_1x_4 - 3,2x_2x_3 - 13,4x_3x_4, \quad (6.78)$$

де $x_1 = (СП - 0,5) / 0,5$;



$$x_2 = (H / Ц - 0,45) / 0,45;$$

$$x_3 = (Ц - 400) / 60;$$

$$x_4 = (Ц / B - 1,89) / 0,41.$$

(СП – добавка суперпластифікатору, % маси цементу;
Н – вміст у відсівах зерен <0,16 мм, кг/м³).

Розрахувати склади дрібнозернистих бетонів з міцністю при стиску $f_{cm}^{28} = 20$ МПа і розпливом конуса бетонної суміші РК=145 мм з застосуванням в якості заповнювача гранітного відсіву ($\rho = 2,85$ кг/л) при Н/Ц=0; 0,25 і 0,35 без суперпластифікатора і з добавкою СП 0,5 і 1%. Об'єм втягнутого повітря (P_b) прийняти 3%.

6.38. Для проектування складів дрібнозернистих бетонів з застосуванням в якості активного наповнювача кам'яновугільної золи-виносу отримані експериментально-статистичні моделі міцності (f_{cm}^{28}) і розпливу конуса (РК):

$$\begin{aligned} f_{cm}^{28} = & 34,15 + 5,1x_2 + 5,07x_3 + 0,26x_1^2 - 5,54x_2^2 - \\ & - 4,34x_3^2 - 1,04x_4^2 + 1,51x_1x_2 - 1,57x_1x_3 + \\ & + 1,24x_1x_4 - 1,16x_2x_4 + 3,02x_3x_4 \end{aligned} \quad (6.79)$$

$$\begin{aligned} РК = & 161,4 + 18,5x_1 + 9,2x_2 + 24x_3 - 27,2x_4 - \\ & - 5,6x_1^2 - 24,1x_2^2 - 7,1x_3^2 + 16,4x_4^2 + 9,6x_1x_2 + \\ & + 7,7x_1x_3 - 6,1x_1x_4 - 6,4x_2x_4 - 11,1x_3x_4 \end{aligned} \quad (6.80)$$

де $x_1 = (СП - 0,5) / 0,5$;

$$x_2 = (H / Ц - 0,45) / 0,45;$$

$$x_3 = (Ц - 400) / 60;$$

$$x_4 = (Ц / B - 1,89) / 0,41.$$

(СП – добавка суперпластифікатору, % маси цементу;
Н – добавка золи-виносу, кг/м³)



Розрахувати склади дрібнозернистих бетонів з міцністю при стиску $f_{cm}^{28}=30$ МПа і розпливом конусу 135 мм при $H/C=0,2$ і $H/C=0,4$ без суперпластифікатору і з добавкою СП=0,5 і 1%.

Об'єм втягнутого повітря 3,5%. В якості заповнювача прийнятий кварцовий пісок ($\rho_n=2,65$ кг/л).

6.39. Для дрібнозернистого бетону, що працює в умовах заморозування та відтавання, з використанням в якості активного наповнювача гранітного аспіраційного пилу отримані експериментально-статистичні моделі міцності (f_{cm}^{28}) та морозостійкості (F):

$$f_{cm}^{28} = 24,8 - 8,04x_1 + 1,207x_2 + 2,49x_3 - 2,03x_4 + 1,04x_1^2 - 0,458x_2^2 + 0,342x_3^2 + 2,71x_4^2 + 0,33x_1x_2 + 0,66x_1x_3 + 0,23x_2x_3 + 0,44x_2x_4 - 0,18x_3x_4 \quad (6.81)$$

$$F = 149,9 - 67,1x_1 - 4,46x_2 + 11,6x_3 + 28,7x_4(1) - 36,6x_1^2 - 2,95x_2^2 + 1,95x_3^2 + 3,95x_4^2 + 1,125x_1x_2 - 11,6x_1x_4 - 2,37x_2x_4 + 2,75x_3x_4 \quad (6.82)$$

де $x_1 = (B/C - 0,8)/0,2$; $x_2 = (H/C - 0,35)/0,35$;

$x_3 = (СП - 0,35)/0,35$; $x_4 = (ПД - 0,025)/0,025$

(ПД – повітрявтягувальна добавка, Н – аспіраційний пил).

Визначити при заданих проектних значеннях f_{cm} і F ($f_{cm}=20$, F100; $f_{cm}=20$, F200) $H/C=0$ і $H/C=0,35$, вміст суперпластифікатора (СП) 0,7%, вміст повітрявтягувальної добавки (ПД) 0 і 0,025% від маси цементу, необхідні значення В/Ц.

6.40. Для піщаного бетону в якості наповнювача застосований аспіраційний гранітний пил (АГП). При варіюванні водоцементного відношення (В/Ц), відношення за масою аспіраційного пилу і цементу (Н/Ц), вмісту добавок суперпластифікатора СП-1 (x_3) і метакаоліну (МТК) виконані



експерименти згідно факторного плану V_4 і отримані експериментально-статистичні моделі міцності бетону на стиск f_{cm}^{28} і розтяг при згині f_{ctf} :

$$\begin{aligned} f_{cm}^{28} = & 26,5 - 7,84x_1 + 1,89x_2 + 2,44x_3 + 0,986x_4 + \\ & + 0,948x_1^2 - 0,452x_2^2 + 0,998x_3^2 - 0,652x_4^2 + 0,294x_1x_2 + \\ & + 0,506x_1x_2 + 0,858x_2x_3 + 1,14x_2x_4 + 0,41x_3x_4 \end{aligned} \quad (6.83)$$

$$\begin{aligned} f_{ctf} = & 3,92 - 0,862x_1 + 0,224x_2 + 0,336x_3 + 0,146x_4 + \\ & + 0,273x_1^2 + 0,173x_2^2 + 0,173x_3^2 + 0,227x_4^2 + 0,063x_1x_2 + \\ & + 0,038x_1x_3 - 0,1x_2x_3 + 0,038x_2x_4 \end{aligned} \quad (6.84)$$

де

$$\begin{aligned} x_1 &= (B / Ц - 0,8) / 0,2; \\ x_2 &= (H / Ц - 0,35) - 500 / 0,35; \\ x_3 &= (СП - 0,35) / 0,35; \\ x_4 &= (МТК - 5) / 5. \end{aligned}$$

Знайти значення В/Ц без добавок і при різному вмісті добавок СП і МТК, а також Н/Ц при яких досягається міцність при стиску бетону на стиск 30 МПа при міцності на розтяг при згині не менше 5 МПа.

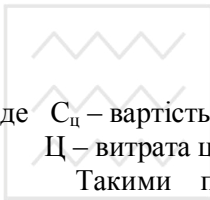


7. Аналіз ефективності складів бетону

Ефективність складів бетону визначається їх техніко-економічними показниками, що характеризують раціональність використання матеріальних і енергетичних ресурсів за умови повного забезпечення комплексу властивостей обумовлених особливостями технології виробів та конструкцій на його основі і їх експлуатації.

Визначальним матеріальним ресурсом, ефективність використання якого характеризує значною мірою ефективність складів бетону є цемент.

Критерієм ефективності при виборі цементу може бути відношення необхідних на нього витрат до величини визначального проектного або технологічного параметра P :



$$K_{e.ц} = \frac{C_{ц}Ц}{P}, \quad (7.1)$$

де $C_{ц}$ – вартість цементу, грн./кг;

$Ц$ – витрата цементу, кг/м³.

Такими параметрами можуть слугувати, наприклад, проектна 28 добова або рання міцність, що досягається бетоном при заданих температурно-вологісних умовах, а також водонепроникність, морозостійкість тощо.

При проектуванні складів бетону, особливості цементів з мінеральними добавками порівняно з бездобавочними цементами можна врахувати двома основними коефіцієнтами:

$$k_1 = R_{ц}/R_{ц}^0; k_2 = B/B^0, \quad (7.2)$$

де $R_{ц}$ і B – відповідно активність цементу і водопотреба бетонної суміші на цементі з добавкою;

$R_{ц}^0$ і B^0 – без добавки.

При застосуванні цементів з підвищеним вмістом мінеральних добавок може спостерігатися деяке сповільнення зростання міцності в перші 7 днів при збереженні марочної міцності. Якщо для цементу, що не містить мінеральних добавок, 7-добова міцність становить 0,65-0,75 міцності в 28 дб,



для портландцементу з 20% доменного шлаку, вона часто знижується до 0,55-0,65, з 35% шлаку – до 0,5-0,6, при заміні 10% шлаку опокою – до 0,4-0,5.

Відомо, що є деякий критичний вміст мінеральної добавки, вище якого 28-добова активність цементу починає знижуватися, хоча марка цементу і ціна на нього залишаються незмінними. Цей критичний вміст для кожної добавки з урахуванням її особливостей залежить від хіміко-мінералогічного складу клінкера, тонкості помелу і температурно-вологісних умов твердіння цементу.

Споживачам цементу доводиться зважати на те, що нерідко при однакових марках цементу, який не містить мінеральних добавок, і цементу з мінеральними добавками, активність останнього може бути істотно нижчою. Можна орієнтовно вважати, що кожні 2 МПа активності в середньому еквівалентні витраті 10 кг цементу на 1 м³ бетону.

Суттєвим є врахування зміни водопотреби бетонної суміші при зміні виду цементу, що прямо враховується коефіцієнтом k_2 .

Як відомо, параметром, що характеризує водопотребу цементу є його нормальна густина, яка визначається при стандартному випробуванні.

Відповідно до експериментальних даних В.П.Сизова водопотребу бетонної суміші при зміні нормальної густоти можна представити рівнянням:

$$B = B_0 + 4(HГ - 28), \quad (7.3)$$

де B_0 – водопотреба бетонної суміші, необхідна для досягнення заданого показника легкоукладальності на застосованих заповнювачах і портландцементі з $HГ=28\%$.

Орієнтовно коефіцієнт k_2 можна знайти з виразу:

$$k_2 = \frac{B + 4(HГ - 28)}{B_0 + 4(HГ^0 - 28)}, \quad (7.4)$$



де $\Pi\Gamma^0$ і $\Pi\Gamma$ – відповідно нормальна густина цементу, що не містить мінеральних добавок, і цементу з мінеральними добавками.

Підвищенню нормальної густоти, як відомо, сприяє введення добавок з високою молекулярною вологоємністю, особливо осадового походження.

Визначення емпіричних значень k_1 і k_2 бажано виконувати в результаті узагальнення експериментальних даних підприємств-постачальників і споживачів цементу та враховувати їх при проектуванні складів бетону.

Знаючи, на основі емпіричних досліджень, коефіцієнти k_1 та k_2 витрату цементу можна визначити, знайшовши Ц/В і В з рівнянь:



$$Ц / В = \frac{R_{\sigma} + 0,5k_1 AR_u^0}{k_1 AR_u^0}, \quad (7.5)$$

$$В = k_2 B_0. \quad (7.6)$$

де A – коефіцієнт у формулі міцності бетону, що враховує, в основному, вплив якості заповнювачів бетону.

При відомих значеннях k_1 та k_2 , на основі узагальнення виробничого досвіду можна розрахувати параметр K з формули:

$$K = \frac{k_1}{k_2}. \quad (7.7)$$

Інтегральний параметр K можна вважати параметром, що характеризує ефективність складів бетону при переході від цементу, який не містить мінеральних добавок, до цементу з мінеральними добавками.

Якщо керуватися умовою:

$$C_u \cdot Ц < C_u^0 Ц^0, \quad (7.8)$$



можна знайти граничну питому вартість цементу з мінеральними добавками з урахуванням транспортних витрат на підприємстві, при яких його застосування є економічно прийнятним за умови забезпечення необхідних властивостей бетону. Вона знаходиться за формулою:

$$C_{ц} < C_{ц}^0 \frac{Ц^0}{Ц}. \quad (7.9)$$

Активні мінеральні добавки, що вводять безпосередньо в бетонні суміші (активні наповнювачі), широко застосовуються для економії цементу і найбільш енергоємного їх компонента – цементного клінкеру.

Для рівних за міцністю бетонів з однаковою легкоукладальністю економія цементу $\Delta Ц$ за рахунок введення активної мінеральної добавки може бути знайдена з рівняння:

$$\Delta Ц = K_{ц,е} D - (Ц/V)_{пр} \Delta B, \quad (7.10)$$

де $K_{ц,е}$ – коефіцієнт "цементуючої ефективності",

D – витрата добавки,

$(Ц/V)_{пр}$ – "приведене" $Ц/V$,

ΔB – зміна водопотреби бетонних сумішей при введенні добавки ($\Delta B = B_0 - B_d$), де B_0 і B_d – водовміст бетонної суміші відповідно без і при введенні мінеральної добавки).

Очевидно, при $\Delta B < 0$ ефект наповнювача знижується, при $\Delta B > 0$ зростає. При $(Ц/V)_{пр} \Delta B \geq K_{ц,е} D$, введення активних наповнювачів не дозволяє досягнути економії цементу і клінкеру або приводить навіть до їхньої перевитрати.

З позицій економії цементу і цементного клінкеру мінеральну добавку доцільно застосовувати лише в тому випадку, якщо $(Ц/V)_{пр}$ більше $Ц/V$ наповненого бетону. З виразу $(Ц/V)_{пр}$ слідує:

$$(Ц/V)_{пр} - Ц/V = K_{ц,е} D/V. \quad (7.11)$$



Економічний ефект від введення мінеральної добавки в бетонну суміш можна знайти з рівняння:

$$E_{\partial} = C_{\psi} \Delta C - C_{\partial} D, \quad (7.12)$$

де C_{∂} – вартість добавки.

Введення мінеральних добавок у бетонну суміш має ряд відомих переваг у порівнянні з їхнім введенням у портландцемент. Воно широко реалізується в ряді розвинених країн світу. Найбільш ефективно введення золи та інших мінеральних добавок у бетонні суміші на портландцементі без добавок. При цьому можливо більш гнучко керувати властивостями бетону, досягати більшої стабільності його якості. Ефективні способи введення значної кількості мінеральних добавок у бетонні суміші можуть бути реалізовані через технологію в'яжучих з низькою водопотребою (ВНВ), тонкомолених багатокomпонентних цементів (ТБЦ), інтенсивної роздільної технології (ІРТ). Якщо, наприклад, при звичайному способі введення золи-виносу в бетонні суміші можна досягнути економії клінкеру до 20%, то введення її із ТБЦ при виготовленні бетонів із суперпластифікаторами дозволяє заощадити клінкер в 1,5 рази.

Характерною особливістю сучасної будівельної технології є широке застосування хімічних добавок для досягнення необхідних властивостей бетону, зниження витрати матеріальних і енергетичних ресурсів при виготовленні цього матеріалу і при застосуванні його для виробництва конструкцій, зведення будинків і споруд. В наш час підприємства по виготовленню бетону, виробів і конструкцій на його основі поряд з порівняно дешевими добавками, одержаними найчастіше із промислових відходів, усе ширше застосовують спеціально синтезовані добавки на основі дорогої хімічної сировини. Такі добавки-модифікатори дозволяють забезпечити високу якість бетону і регулювати його властивості у широкому діапазоні, однак при оцінюванні доцільності їхнього введення, заміни ними традиційних дешевих добавок доводиться досягнутий технічний ефект порівнювати з необхідними додатковими витратами.



Ефективність будь-яких технічних рішень, у тому числі введення хімічних добавок у бетон повинна визначатися економічним ефектом (Е) і коефіцієнтом ефективності витрат (K_e). Останній являє собою відношення економічного ефекту до витрат, необхідних для його одержання. Витрати на добавку (Z_d) при одержанні бетону легко розраховуються:

$$Z_d = C_d D + Z_d^{дод}, \quad (7.13)$$

де C_d – вартість добавки на 1 м^3 бетону з врахуванням необхідних транспортних витрат;

D – питома витрата добавки;

$Z_d^{дод}$ – питомі витрати, пов'язані з додатковою обробкою добавки, її зберіганням, дозуванням, зміною складу бетонної суміші й ін.

На стадії виготовлення бетону введення добавки дозволяє зменшити його вартість, головним чином, за рахунок зменшення вартості необхідних матеріальних ресурсів, наприклад, у результаті зниження витрати цементу, переходу на інші його види або марки та ін. Однак, неврахування додаткових витрат на добавку і нерациональність технологічних рішень може не дозволити знизити вартість бетону. На рис. 7.1, як приклад, наведені можливі варіанти зміни ефективності введення добавки в бетонну суміш.

Нехай нормовані властивості бетону забезпечуються без добавки при витраті цементу C_3 (I, рис. 7.1). При введенні добавки можна забезпечити необхідні властивості бетону при витраті цементу C_1 (II, рис. 7.1), але це не вигідно, тому що вартість такого бетону буде вище, ніж бетону без добавки. Зменшивши витрату добавки (III, рис. 7.1) можна забезпечити необхідні властивості бетону при компромісній витраті цементу C_2 і це буде самий вигідний варіант. Підібрати оптимальну витрату добавки в цьому випадку можна шляхом перебирання варіантів, ґрунтуючись на результатах підборів складів або при використанні емпіричних залежностей, що пов'язують нормовані показники властивостей з витратою добавки та іншими параметрами складу.



C_6 ,

у.о./м³

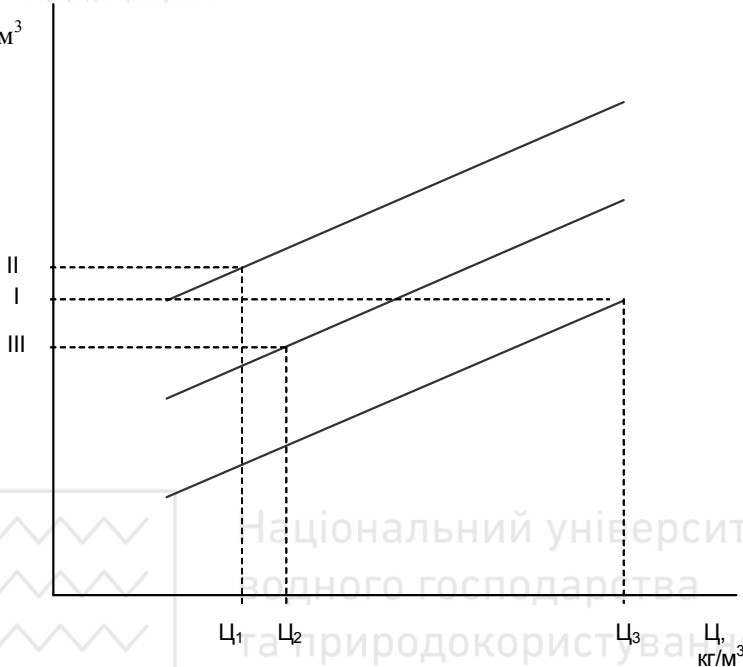


Рис.7.1. Можливі варіанти зміни вартості бетону

при введенні хімічної добавки:

I – вартість бетону без добавки, II і III – вартість бетону з
добавкою

Більш універсальним показником ефективності складів бетону є коефіцієнт раціонального використання цементу $K_{р.в.ц}$, що являє відношення питомих витрат на цемент, які йдуть на виготовлення бетону або залізобетонних виробів з визначеними властивостями при деякому еталонному варіанті, до витрат на цемент і заходи, що сприяють зниженню його витрат, при даному технологічному рішенні:

$$K_{р.в.ц} = \frac{S_{ц.ем}}{S_{ц} + S_{m.n}} = \frac{C_{ц.ем} \cdot Ц_{ем}}{C_{ц} \cdot Ц + S_{m.n}}, \quad (7.14)$$



де $S_{ц,ем}$ і $S_{ц}$ – питомі витрати на цемент, що йде на 1 м³ бетону або визначену конструкцію відповідно при еталонному і даному варіантах технологічного рішення;

$S_{м,п}$ – питомі приведені витрати на комплекс технологічних прийомів, спрямованих на скорочення витрат цементу без погіршення якості бетону (введення добавок, електро- або паророзігрів суміші і т.д.);

$S_{ц,ет}$ і $S_{ц}$ – вартості відповідно еталонного і застосованого цементів;

$Ц_{ем}$ і $Ц$ – витрати умовно еталонного і порівнювального цементів для отримання бетону з заданими проектними вимогами.

Критерій $K_{р.в.ц}$ може використовуватися для аналізу ефективності цементів різної вартості і якості при зміні активності, нормальної густоти тощо.

За допомогою $K_{р.в.ц}$ можна оцінювати ефективність використання цементу при аналізі не тільки технологічних, але й проектних рішень, пов'язаних зі зниженням матеріалоемності виробів і конструкцій. Наприклад, при порівняльній оцінці бетону в конструкціях за міцністю зручно використовувати вираз:

$$K'_{р.в.ц} = \frac{S'_у V}{(S'_у + S_{м.п})} \cdot V', \quad (7.15)$$

де $S'_у, S'_у$ – витрати на цемент для одержання 1 м³ бетону відповідно еталонної і порівнюваної міцності;

V і V' – об'єм відповідно еталонної і порівнюваної конструкції;

$S_{м,п}$ – додаткові витрати, пов'язані зі зміною міцності бетону в конструкції.

При виготовленні конструкцій з високоміцного бетону, незважаючи на збільшення витрати цементу на 1 м³ бетону в результаті зменшення перерізу й об'єму виробів ефективність використання цементу виявляється більш високою.



Розробка ефективних складів бетонів передбачає в ряді випадків розгляд різних варіантів вибору заповнювачів бетонних сумішей. При дефіциті кондиційних заповнювачів, високих транспортних витратах економічно доцільним може бути збагачення місцевих матеріалів шляхом їх промивання і класифікації, змішуванням їх з привозними високої якості, застосування пластифікуючих і повітровтягуючих добавок, зміна способу формування.

Важливим наслідком оптимізації складів бетонів є економія цементного клінкеру – напівфабрикату цементу, який визначає його вартість.

Економію портландцементного клінкеру на 1 м³ бетону можна знайти з умови:

$$\Delta K_l = \Delta C(1 - D_m), \quad (7.16)$$

де ΔC – економія цементу, кг/м³,

D_m – частка цементу, що припадає на мінеральну добавку.

Критерієм ефективності використання цементного клінкера в бетонах може слугувати міцність бетону на 1 кг витраченого клінкеру:

$$L = f_{cm} / K_l, \quad (7.17)$$

де K_l – витрата клінкеру на 1 м³ бетонної суміші.

Значення критерію L , розраховані за типовими нормами витрат цементу, коливаються залежно від виду цементу, легкоукладальності, проектної марки і відпускної міцності бетону. При використанні, наприклад, портландцементу і його різновидів та твердінні в нормальних умовах для М400 – $L=0,094\dots0,156$; М500 – $L=0,106\dots0,16$; М600 – $L=0,133\dots0,179$ (при розрахунках умовно прийнято, що цемент містять 80% клінкеру).

З виразу критерію L можна встановити, що його збільшення можливо за рахунок підвищення C/V і, відповідно, міцності бетону без збільшення витрати клінкеру, а також зростання активності цементу. Для підвищення C/V можуть застосовуватись всі технологічні прийоми зменшення



водопотреби бетонних сумішей, з яких особливо ефективним є введення суперпластифікаторів.

Для оцінки ефективності рецептурно-технологічних параметрів виробництва бетону, виробів та конструкцій на його основі важливе значення набувають критерії енергетичних витрат. З позицій народногосподарської ефективності критерії енергетичних витрат повинні відображати питомі витрати теплової та електричної енергії, не тільки пов'язані безпосередньо з отриманням бетонної суміші, виробів і конструкцій, але і використані на отримання вихідних компонентів і, в першу чергу, цементу. Енерговитрати, пов'язані з отриманням цементу, що йде на 1 м³ бетону з проектною 28-добовою міцністю 20-50 МПа складають (для портландцементу і портландцементу з мінеральними добавками) 60-177 кг умовного палива, тоді як сумарна витрата теплової енергії безпосередньо у виробництві збірного залізобетону в середньому не перевищує 70, а на передових заводах – 43 кг умовного палива на 1 м³.

До 70% енерговитрат у виробництві збірного залізобетону спрямовані на теплову обробку виробів. Ґрунтуючись на структурі енерговитрат, можна стверджувати, що народногосподарська ефективність використання енергоресурсів у виробництві бетону і виробів на його основі обумовлена в основному оптимальністю технологічних параметрів, що визначають витрати цементу в бетоні (особливо його клінкерної складової) і витрати палива при тепловій обробці виробів.

Як критерій раціонального використання енергетичних витрат ($K_{p.v.n}$) можна прийняти відносну питому витрату умовного палива (теплової енергії) на виробництво 1 м³ бетону або виробів на його основі, включаючи витрату палива на виробництво цементу:

$$K_{p.v.n} = \frac{Ц_{em} \cdot T_{u.em} + T_{\text{дод}}}{Ц \cdot T_{\text{ц}} + T_{m.o} + T'_{\text{дод}}}, \quad (7.18)$$



де $\Pi_{ет}$ і Π – витрати умовно еталонного і порівнюваного цементів в $\text{кг}/\text{м}^3$ для отримання бетону із заданими проектними вимогами;

$T_{ц,ет}$ і $T_{ц}$ – витрата умовного палива для отримання 1 кг еталонного і порівнюваного цементів;

$T_{т.о}$ - витрата умовного палива на теплову обробку виробів;

$T_{дод}$ - додаткові витрати палива на технологічні цілі.

Критерій $K_{р.в.л}$ дозволяє привести до порівнюваного вигляду енерговитрати на отримання бетонів з різними показниками властивостей і оцінити ефективність використання теплової енергії в різних складах бетону як в умовах нормального твердіння, так і при тепловій обробці. За допомогою критерію $K_{р.в.л}$ можна вибрати оптимальні за витратами палива режими теплової обробки. При порівнянні бетонів нормального твердіння і підданих тепловій обробці, чим ближче $K_{р.в.л}$ до 1 (за умови застосування однакових видів і марок цементу в еталонному і порівняльному варіантах), тим енергетично ефективніший процес прискореного твердіння бетонів. За допомогою критерію $K_{р.в.л}$ можна порівняти також енергетичну ефективність різних технологічних рішень - введення мінеральних і хімічних добавок, розігріву бетонної суміші та ін.

За допомогою перехідних коефіцієнтів при визначенні $K_{р.в.л}$ можна враховувати поряд з тепловою і витрати електроенергії ($1\text{кВт}\cdot\text{год} \sim 0,34$ кг умовного палива). Всі можливі технологічні рішення, що призводять до збільшення $K_{р.в.л}$ без неприпустимого зниження продуктивності лінії і істотного збільшення витрат, є прогресивними і можуть бути рекомендовані до впровадження.

Приклади

7.1. Проаналізувати вплив технологічних факторів на коефіцієнт ефективності використання цементу в золоцементних бетонах.

В якості коефіцієнта ефективності використане відношення:



$$K_e = f_{cm} / Ц,$$

де f_{cm} – міцність бетону на стиск у віці 28 діб, МПа;

Ц – витрата цементу, кг/м³.

В результаті виконання експериментів згідно плану На₅ при варіюванні В/Ц, витрати води (В) л/м³, частки піску в суміші заповнювачів (r_n), витрати золи-виносу (D_3), кг/м³ та її питомої поверхні (S_3), см²/г отримана експериментально-статистична модель K_e :

$$\begin{aligned} K_e = & 0,82 - 0,003x_2 + 0,008x_4 - 0,007x_5 + 0,012x_2^2 + \\ & + 0,007x_3^2 - 0,019x_4^2 - 0,015x_5^2 - 0,002x_1^2 - \\ & - 0,005x_1x_2 - 0,0027x_1x_5 + 0,0046x_2x_5 - 0,002x_3x_5, \end{aligned} \quad (7.19)$$

де $x_1 = (В/Ц - 0,6)/0,1$;

$x_2 = (В - 190)/10$;

$x_3 = (r_n - 0,41)/0,07$;

$x_4 = (D_3 - 150)/100$;

$x_5 = (S_3 - 3900)/1000$.

Аналіз отриманої моделі і відповідної діаграми (рис.7.2) дозволяє стверджувати, що вплив витрати золи та її дисперсності на критерій K_e має екстремальний характер. Оптимальні значення цих факторів можна визначити з моделі як похідні по x_4 і x_5 .

Відповідно до умов, прийнятих в експериментах виявилось, що оптимальні значення витрати золи становлять 170 кг/м³. Оптимальне значення питомої поверхні золи коливається при різних значеннях основних параметрів, що характеризують склад бетону і в середньому наближається до 4000 см²/г.



Рис. 7.2. Поєднана діаграма міцності і коефіцієнта ефективності використання цементу у литих золівмістких бетонах:

- а – ізолінії міцності бетонів при $V/C=0,6$; $V=190 \text{ кг} / \text{м}^3$, $\gamma_n=0,41$;
- б – графіки розподілу міцності і коефіцієнта ефективності використання цементу при: 1 – $D_3=50 \text{ кг}/\text{м}^3$; 2 – $D_3=150 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- в - графік розподілу міцності і коефіцієнта ефективності використання цементу при: 1 – $S_3=290 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- 2 – $S_3=490 \text{ м}^2/\text{кг}$

Значення міцності бетону, що відповідають ізолініям на рис. 7.2 наведені в табл.7.1.



Ізорівні міцності бетону

Номер ізорівня	Міцність бетону, МПа при $S_{пит}$ золи, $см^2/г$		
	2900	3900	4900
1	12,8	15,4	8,5
2	14,7	17,2	10,3
3	16,5	19,0	12,1
4	18,3	20,8	13,9
5	20,1	22,6	15,7
6	21,9	24,5	17,6
7	23,7	26,3	19,4
8	25,6	28,1	21,2
9	26,9	29,9	23,0
10	29,2	31,7	24,8

Примітка. Приведені середні значення міцності бетону при відхиленнях в межах ізорівнів до 0,9 МПа.

7.2. Визначити ефективність застосування портландцементів з вмістом доменного гранульованого шлаку 20 і 35% порівняно з бездобавочним портландцементом. В якості критерію ефективності вибрати критерій раціонального використання цементу ($K_{p.v.ц}$) – співвідношення витрат на порівнювальні цементи

$$K_{p.v.ц} = \frac{C_{ц}^o Ц^o}{C_{ц} Ц}, \quad (7.20)$$

де $C_{ц}^o$ і $C_{ц}$ – вартість відповідно бездобавочного портландцементу і портландцементу з мінеральними добавками грн/кг;

$Ц^o$ і $Ц$ – витрати бездобавочного портландцементу і портландцементу з мінеральними добавками.



Прийнято $C_{ц}^o = 2150$ *гpn/m*, $C_{ц_1} = 1950$ і $C_{ц_2} = 1720$ *гpn/m*

відповідно для бездобавочного портландцементу і портландцементів з 20 і 35% доменного шлаку. Порівнювальні цементи мали марку М500, активність бездобавочного цементу – 54 МПа, портландцементу з 20% доменного шлаку – 51 МПа, з 35% шлаку – 49 МПа. Для виготовлення бетону застосовували гранітний щебінь крупністю 5...20 мм, кварцовий пісок з $M_k=1,7$. Осадка конусу бетонної суміші – 5...9 см. Бетони тверділи в нормальних умовах і при пропарюванні по режиму (2)+3+6+2 при $t=80^\circ\text{C}$.

Експериментальні і розрахункові дані, що характеризують ефективність використаних цементів наведені в табл. 7.2, 7.3.

Таблиця 7.2

Питомі витрати цементів

Вид цементу	Умови твердіння	Витрата цементу в кг/м^3 для бетону при ОК=5...9 см класів			
		C12/15	C20/25	C25/30	C35/45
Портланд-цемент без мінеральних добавок	Нормальні	<u>248</u> 1	<u>327</u> 1	<u>412</u> 1	<u>487</u> 1
	Пропарювання	<u>268</u> 1,08	<u>350</u> 1,07	<u>425</u> 1,03	<u>512</u> 1,05
Портланд-цемент із 20% доменних шлаків	Нормальні	<u>260</u> 1,048	<u>345</u> 1,055	<u>440</u> 1,068	<u>535</u> 1,099
	Пропарювання	<u>280</u> 1,129	<u>355</u> 1,086	<u>455</u> 1,104	<u>565</u> 1,160
Портланд-цемент із 35% доменних шлаків	Нормальні	<u>272</u> 1,097	<u>360</u> 1,10	<u>460</u> 1,116	<u>555</u> 1,14
	Пропарювання	<u>281</u> 1,133	<u>370</u> 1,131	<u>475</u> 1,153	<u>570</u> 1,17

Примітки: 1. Витрату цементу при пропарюванні визначали з умови досягнення бетоном 70% проектної міцності. 2. Під рискою наведені значення відносної витрати центів з добавкою порівняно з цементом, що не містить мінеральних добавок при нормальному твердінні бетону.



Таблиця 7.3

Ефективність застосування цементів з мінеральними добавками

Вид цементу	Умови твердіння	Відношення питомих витрат на бездобавочний портландцемент грн/м ³ до витрат на цемент з мінеральними добавками грн/м ³ , для класів			
		C12/15	C20/25	C25/30	C35/45
Портланд-цемент із 20% доменних шлаків	Нормальні	1,05	1,045	1,03	1,0
	Пропарювання	1,05	1,09	1,03	1,055
Портланд-цемент із 35% доменних шлаків	Нормальні	1,13	1,15	1,17	1,14
	Пропарювання	1,19	1,18	1,12	1,12

Аналіз даних табл. 7.2 і 7.3 дає підстави вважати, що незважаючи на більші питомі витрати цементів з мінеральними добавками для всіх досліджених класів бетону введення їх в діапазоні 20..35% за масою є економічно доцільним.

7.3. Визначити економічний ефект при введенні в бетонну суміш золи-виносу ($D=150 \text{ кг/м}^3$) при застосуванні портландцементу М500 ПЦ-I і ПЦ/A-II-III при нормальних умовах твердіння і при пропарюванні.

Експериментальні і розрахункові дані приведені в табл.7.4. економічний ефект розрахований за формулою:

$$E = C_{\text{ц}}^{\circ} \text{Ц}^{\circ} - C_{\text{ц}} \text{Ц}_z - C_z D_z, \quad (7.21)$$

де $C_{\text{ц}}^{\circ}$ і C_z – вартість, грн./кг – цементу і золи;

Ц° , Ц_z – витрати цементу без добавки золи та з золою, кг/м³;

D_z – витрати золи, кг/м³.

При розрахунках економічного ефекту прийнято вартість портландцементу I типу 2150 грн./т, II типу 1950 грн./т, золи-виносу 150 грн./т.



Таблиця 7.4

Ефективність введення золи-виносу в бетонну суміш

Цемент ПЦ I				Цемент ПЦ II/A-III					
Клас бетону	Умови твердіння	Витрати, кг/м ³ цементу I типу		Економічний ефект, грн./м ³	Клас бетону	Умови твердіння	Витрати, кг/м ³ цементу II типу		Економічний ефект, грн./м ³
		бетон без золи	бетон з золою				бетон без золи	бетон з золою	
C12/15	Нормальні	248	208	63,5	C12/15	Нормальні	260	218	59,4
C16/20		327	292	52,75	C16/20		345	308	49,65
C25/30		412	380	46,3	C25/30		440	410	36,0
C35/45		487	458	39,85	C35/45		535	508	30,15
C12/15	Пропарювання, режим (2)+3+6+2 80°C	268	200	123,7	C12/15	Пропарювання, режим (2)+3+6+2 80°C	280	217	100,35
C16/20		350	286	115,1	C16/20		360	300	94,5
C25/30		425	365	106,5	C25/30		455	400	84,75
C35/45		512	455	100,05	C35/45		565	513	78,9

Економічний ефект при введенні золи в бетонні суміші, як свідчать отримані розрахункові дані (табл.7.4), більш значний при застосуванні бездобавочного цементу ПЦ I більш значний ніж при застосуванні ПЦ II. Він зменшується при підвищенні класу бетону за міцністю і збільшується при пропарюванні бетону.

7.4. Порівняти для заданих умов ефективність золи-виносу двох ТЕС як активної мінеральної добавки до бетону.

Попередньо експериментально визначали коефіцієнти "цементуючої ефективності" ($K_{ц.е}$) золи виносу при їх різних дозуваннях (табл. 7.5).

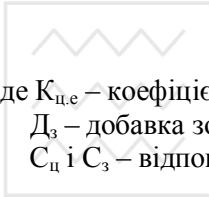


Таблиця 7.5

Коефіцієнти "цементуючої ефективності" ($K_{це}$) золи-виносу

Зола	Дозування, кг/м ³	Класи бетону			
		нормальне твердіння		пропарювання	
		C12/15	C20/25	C12/15	C20/25
ТЕС №1	100	0,38	0,31	0,41	0,35
	150	0,31	0,28	0,36	0,31
	200	0,30	0,24	0,33	0,28
ТЕС №2	100	0,35	0,27	0,37	0,31
	150	0,29	0,21	0,33	0,29
	200	0,27	0,18	0,32	0,25

При оптимальних дозуваннях, які відповідають максимальним значенням $K_{це}$, розраховували склади золівмісних бетонів і визначали економічний ефект, грн/м³ (табл.7.6) за формулою:



$$E = K_{це} \cdot D_3 C_ц - C_3 D_3, \quad (7.22)$$

де $K_{це}$ – коефіцієнт цементуючої ефективності золи-виносу,
 D_3 – добавка золи-виносу, кг/м³,
 $C_ц$ і C_3 – відповідно вартість цементу і золи, грн./кг.

Таблиця 7.6

Ефективність застосування золи-виносу

Зола	Дозування, кг/м ³	Економічний ефект, грн./м ³			
		нормальне твердіння		пропарювання	
		C12/15	C20/25	C12/15	C20/25
ТЕС №1	100	61,1	47,5	67	55,3
	150	71,2	62,4	85,8	71,2
	200	91,0	67,6	102,7	83,2
ТЕС №2	100	53,3	37,7	57,2	45,5
	150	62,3	38,9	74,0	62,3
	200	75,3	40,2	94,8	67,5

Примітки: 1. Економічний ефект наведений для бетонів з маркою по рухомості бетонної суміші Р2. 2. Вартість портландцементу з урахуванням транспортних витрат – 1950 грн./т, золи ТЕС – №1 – 130 грн./т, золи ТЕС №2 – 150 грн./т.

Очікуваний економічний ефект застосування золи ТЕС №1 виявився більшим ніж золи ТЕС №2.



7.5. Визначити ефективність пластифікуючих добавок за двома показниками – можливої економії цементу в кг/м³ при забезпеченні проектних властивостей бетону та економічному ефекту в грн./м³.

Зміна водопотреби бетонних сумішей при введенні добавок характеризували коефіцієнтом K_B :

$$K_e = \frac{B_1}{B_0}, \quad (7.23)$$

де B_1 – водопотреба бетонної суміші з введенням заданої кількості пластифікатора, л/м³;

B_0 – водопотреба бетонної суміші без пластифікуючої добавки, л/м³.

Коефіцієнт зміни 28-добової міцності бетону на стиск визначали з відношення:

$$K_{f_{cm}} = \frac{f_{cm_1}}{f_{cm_0}}, \quad (7.24)$$

де f_{cm_1} – міцність бетону з добавкою, МПа;

f_{cm_0} – міцність бетону без добавки при незмінному В/Ц, МПа.

Вплив добавок на водопотребу, міцність і показники ефективності пластифікуючих добавок наведені в табл. 7.7., 7.8.

Таблиця 7.7

Вплив добавок на властивості бетону

Добавка	Вміст, % маси цементу на суху речовину (Д)	Коефіцієнт зміни водопотреби (K_B)	Коефіцієнт зміни 28-добової міцності ($K_{f_{cm}}$)
ЛСТ	0,15	0,90	1,0
	0,25	0,85	0,93
С-3	0,35	0,82	1,02
	0,5	0,78	1,00
	0,7	0,76	1,03
	1,0	0,75	0,99
ЛСТ+С-3	0,1+0,2	0,81	1,02
	0,15+0,35	0,77	1,03
	0,2+0,5	0,74	0,95
	0,25+0,7	0,72	0,92

Примітки: 1. Наведені дані отримані при В/Ц = 0,5, для бетонних сумішей марки Р3. 2. Витрата води (В) для забезпечення необхідної легкоукладальності бетонної суміші без добавок – 200 л/м³.



Таблиця 7.8

Показники ефективності введення добавок-
пластифікаторів в бетонні суміші

Добавка	Витрата, % маси цементу	Економія цементу, ΔC , кг/м ³	Економічний ефект E , грн./м ³
ЛСТ	0,15	40	68,4
	0,25	56	93,2
С-3	0,35	73	124,8
	0,5	88	146,6
	0,7	99	158
	1,0	100	145
ЛСТ+С-3	0,1+0,2	77	138,5
	0,15+0,35	92	159,5
	0,2+0,5	99	164,8
	0,25+0,7	103	161,8

Примітки: 1 – Вартість добавок (C_d); ЛСТ – 16000грн/т; С-3 – 50000грн/т. 2 – Вартість портландцементу (C_c) – 1950 грн/т.

Економію цементу, що досягається при введенні добавок-пластифікаторів рахували за формулою:

$$\Delta C = K_{f,cm} (B - K_a B) \cdot C / B. \quad (7.25)$$

Економічний ефект від застосування пластифікуючих добавок визначали за формулою:

$$E = C_c \cdot \Delta C - C_d D. \quad (7.26)$$

Аналіз отриманих результатів свідчить, що найбільший економічний ефект для заданих умов досягається при введенні комплексної добавки ЛСТ+С-3 в кількості 0.2% ЛСТ+0.5 С-3 від маси цементу.

7.6. Розрахувати з допомогою експериментально-статистичних моделей склади активованих цементно-зольних бетонів з різною міцністю на стиск у віці 28 діб і значення



критерія L – відношення міцності бетону на стиск до витрати клінкера кг на 1 м^3 бетонної суміші.

Як активізатори використані добавки мікрокремнезему (МК) – відходу виробництва феросиліцію і вапняно-карбонатного пилю (ВКП) – відходу виробництва грудкового вапна.

Для отримання моделей реалізовані експерименти за планом V_4 відповідно до умов планування обраних факторів (табл.7.9).

Таблиця 7.9

Умови планування факторів

Фактори варіювання	Рівні варіювання факторів		
	-1	0	+1
$X_1 = V_a / (V_a + V_3)$	0,3	0,37	0,44
$X_2 = (V_a + V_3) / (V_a + V_3 + V_{II})$	0,56	0,63	0,7
$X_3 = (V_a + V_3 + V_{II}) / (V_a + V_3 + V_{II} + V_B)$	0,41	0,47	0,53
$X_c = V_c / (V_c + V_B)$	0,0	0,01	0,02

Примітка: $V_a, V_3, V_{II}, V_B, V_c$ – абсолютні об’єми активатора (МК або ВКП), золи-виносу, портландцементу, води і сухого суперпластифікатора (С-3).

Статистична обробка отриманих експериментальних результатів дозволила отримати рівняння регресії для міцності цементно-золяного бетону активованого МК (y_1) і ВКП (y_2) при нормальному твердінні (y_1^{HT} і y_2^{HT}) і після пропарювання (y_1^{HP} і y_2^{HP}):

$$Y_1^{HT} = 23,4 + 4,9X_1 + 2,8X_2 + 4,1X_3 + 2,7X_c - 2,7X_1^2 - 2,1X_2^2 - 0,3X_3^2 - 0,8X_c^2 + 1,9X_1X_c - 0,8X_1X_2 \quad (7.27)$$

$$Y_1^{HP} = 18,5 + 4,5X_1 + 3,3X_2 + 4,3X_3 + 2,8X_c - 2,4X_1^2 - 1,9X_2^2 - 0,5X_3^2 - 0,7X_c^2 + 2,4X_1X_c - 0,6X_1X_2 \quad (7.28)$$

$$Y_2^{HT} = 28,5 + 5,5X_1 - 5,8X_2 + 4,7X_3 + 1,9X_c - 1,8X_1^2 - 0,5X_2^2 - 0,2X_3^2 - 0,6X_c^2 - 1,2X_1X_c + 1,1X_1X_2 \quad (7.29)$$



$$Y_2^{np} = 21,5 + 4,4X_1 - 4,3X_2 + 3,4X_3 + 1,05X_c - 1,3X_1^2 - 0,3X_2^2 - 0,15X_3^2 - 0,5X_c^2 - 0,8X_1X_c + 0,7X_1X_2 \quad (7.30)$$

В табл. 7.10 наведені розрахункові по моделях (7.27–7.30) значення міцності і критерію L для характерних експериментальних складів бетонних сумішей. З них слідує, що введення оптимальної кількості як мікрокремнезему, так і вапняно-карбонатного пилу дозволяє збільшити ефективність використання клінкеру в 1,2...2 рази.

Таблиця 7.10

Розрахункові значення міцності бетону і критерію L

Параметри структури				Витрата матеріалів, кг/м ³				Міцність при стиску, МПа у віці 28 діб	Критерій L
X ₁	X ₂	X ₃	X _c	A	З	Ц	В		
Активатор – вапняно-карбонатний пил									
0,3	0,56	0,41	0,02	52	113	179	189	25	0,174
0,37	0,56	0,41	0,02	65	101	179	189	28	0,195
0,44	0,56	0,41	0,02	77	90	179	180	30	0,209
0,44	0,70	0,41	0,02	97	113	122	189	23	0,235
0,44	0,70	0,53	0,02	125	146	158	150	28	0,221
0,37	0,63	0,47	0,02	84	131	172	170	29	0,21
Активатор – мікрокремнезем									
0,3	0,70	0,53	0,02	63	148	128	122	22	0,215
0,37	0,70	0,53	0,02	78	133	128	122	30	0,293
0,3	0,70	0,41	0,02	48	112	99	153	15	0,189
0,37	0,70	0,41	0,02	60	103	99	153	19	0,24
0,44	0,70	0,53	0,02	93	119	128	122	33	0,32
0,37	0,63	0,47	0,02	62	107	140	138	23	0,20
Без активаторів									
-	0,47	0,36	0,0	-	113	174	189	15	0,107
-	0,47	0,36	0,02	-	113	174	164	20	0,144

Примітки: 1. Склади бетонів з добавкою МК розраховували при X₄=0,26, з добавкою ВКП – при X₄=0,37. 2. При розрахунку критерію L витрату клінкеру в портландцементі приймали рівною 80%. 3. А – активатор, З – зола-виносу, Ц – портландцемент, В – вода.



Найбільше значення критерію L при заданих умовах досягнуто при введенні до цементно-зольного бетону поряд з добавкою суперпластифікатора С-3 добавки мікрокремнезему в кількості 93 кг/м^3 .

7.7. Визначити вплив нормальної густоти на величину критерію раціонального використання теплової енергії ($K_{p.v.n}$) при отриманні бетону на портландцементі з мінеральною добавкою.

Значення критерію $K_{p.v.n}$ розраховували за формулою (7.18). Попередньо були розраховані витрати портландцементу марок М400 і М500 для бетонів з різними значеннями 28-добової міцності на стиск, рухомість бетонної суміші відповідала марці Р2. Зміну нормальної густоти цементу від 25 до 29% забезпечували зміною вмісту трепелу від 0 до 20%.

При зміні нормальної густоти цементу враховували зміну водо потреби бетонної суміші і відповідно витрати цементу.

При розрахунках $K_{p.v.n}$ питому витрату умовного палива для отримання 1 т. бездобавочного портландцементу марок М400 і М500 приймали по довідковим даним відповідно 280 і 291 кг. Твердіння бетону здійснювали в нормальних умовах.

Розрахункові значення $K_{p.v.n}$ наведені в табл. 7.11.

Таблиця 7.11

Розрахункові значення критерію $K_{p.v.n}$

Нормальна густота цементу, %	Марка цементу	Міцність бетону, МПа					
		20	25	30	35	40	50
25	400	1,27	1,23	1,20	1,16	-	-
27	400	1,21	1,19	1,14	1,07	-	-
29	400	1,13	1,11	1,03	0,96	-	-
25	500	1,15	1,16	1,17	1,17	1,20	1,23
27	500	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
29	500	1,07	1,06	1,05	1,03	1,02	1,00

З табл. 7.11 слідує, що енергетична ефективність бетонів при збільшенні нормальної густоти цементу падає. При застосуванні цементу марки М400 порівняно з цементом М500



збільшення міцності бетону викликає більш суттєво збільшення витрат цементу і відповідно зменшення $K_{p.v.n.}$. Застосування цементу М500 з низькою нормальною густиною енергетично ефективно особливо в бетонах з $f_{cm} \geq 30$ МПа.

Вправи

7.1. Розрахувати та порівняти за допомогою базових норм витрат цементу при отриманні для збірних бетонних та залізобетонних виробів (СНіП 82-09-95) (табл.1...4, Дод.В) наступні показники ефективності його використання:

1) відношення витрат цементу марок 400 і 500 до різних класів важких бетонів за міцністю при твердінні в нормальних умовах;

2) відношення витрат цементу марок 400 і 500 до різних класів важких бетонів за міцністю в умовах теплової обробки виробів при досягненні відпускної міцності 70, 80, 90%;

3) витрат цементу марок 400 і 500 до різних класів важких бетонів за міцністю для виробів, виготовлених в касетних установках при відпускній міцності 70, 80, 90%;

4) те ж саме при товщині виробів 10 см і менше, а також більше 10 см.

7.2. Розрахувати та порівняти відношення рекомендованих (табл.1,4,5, Дод.В) мінімальних витрат цементу до відповідних значень марок по морозостійкості та водонепроникності.

7.3. Розрахувати та порівняти за допомогою базових норм витрат цементів для збірних бетонних та залізобетонних виробів (табл.6...8, Дод.В) наступні показники ефективності його використання:

1) відношення витрат цементу марки 400 до різних класів конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів за міцністю при різних значеннях густини бетону;

2) відношення витрат цементу марки 400 до різних класів легкого бетону за міцністю при виготовленні вібропресованих виробів на:

а) пористому гравію марки 500;



б) пористому щебню марки 800;

в) золошлакової суміші;

3) відношення витрат цементу марок 400 і 500 до різних класів за міцністю конструкційних легких бетонів при твердінні в нормальних умовах і в умовах теплової обробки.

З врахуванням діючих цін на цементі і отриманих в попередніх вправах значень відношення питомих витрат цементу до показників міцності знайти до заданих умов параметр $C_{цЦ/Р}$, де $C_{ц}$ – ціна на цемент, грн./кг; $Ц$ – витрата цементу, кг/м³; $Р$ – клас бетону за міцністю.

Виконати відповідний техніко-економічний аналіз економічної ефективності застосування цементу відповідно до заданих умов.

7.4. Розрахувати критерій $K_{р.в.л}$ для важких бетонів, що твердіють при нормальних умовах класів С12/15, С20/25, С25/30, С30/35 на портландцементі І-го типу марок М400 і М500 скориставшись базовими нормами витрат цементу (СНіП 82-02-95). Витрату умовного палива для отримання 1 т портландцементу марок М400 і М500 прийняти відповідно 280 і 291 кг.



СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Ахвердов И. Н. Теоретические основы бетоноведения / И. Н. Ахвердов. – Мн.: Виша школа, 1991. – 188 с.
3. Баженов Ю. М. Получение бетона заданных свойств / Ю. М. Баженов, Г. И. Горчаков, Л. А. Алимов, В. В. Воронин. – М.: Стройиздат, 1978. – 53 с.
4. Баженов Ю. М. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона / Ю. М. Баженов, В. А. Вознесенский. – М.: Стройиздат, 1974. – 192 с.
5. Баженов Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов // Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1987. – 449 с.
6. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны / В. Г. Батраков // Теория и практика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1998. – 768 с.
7. Беляев Н. М. Метод подбора состава бетона / Н. М. Беляев. – Изд. 4-е. – Л.: НИИБ, 1930. – 210 с.
8. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М.: Стройиздат, 1962. – 96 с.
9. Берг О. Я. Высопрочный бетон. / О. Я. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
10. Большаков В. И. Строительное материаловедение / В. И. Большаков, Л. И. Дворкин. – Днепропетровск: РВА "Дніпро-VAL", 2004. – 677 с.
11. Боломей М. Грануляция и предвидение вероятной прочности бетонов / М. Боломей // "Travaux", №30, 1935. – 26 с.
12. Бужевич Г. А. Поризованный керамзитобетон / Г. А. Бужевич, В. Г. Довжик и др. – М.: Стройиздат, 1969. – 183 с.
13. Бужевич Г. А. Легкие бетоны на пористых заполнителях / Г. А. Бужевич. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.



14. Вознесенский В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Б. Л. Огарков. – К.: Высшая школа, 1989. – 328 с.
15. Гершберг О. А. Технология бетонных и железобетонных изделий / О. А. Гершберг. – М.: Стройиздат, 1971. – 359 с.
16. Глекель Ф. Д. Физико-химические основы применения добавок к минеральным вяжущим / Ф. Д. Глекель. – Ташкент: "Фан", 1975. – 123 с.
17. Горчаков Г. И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. / Г. И. Горчаков, М. М. Капкин, Б. Г. Скрамтаев. – М.: Стройиздат, 1965. – 196 с.
18. Горчаков Г. И. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г. И. Горчаков, Л. П. Орендлихер, Л. И. Савин и др. – М.: Стройиздат, 1976. – 145 с.
19. Грушко И. М. Прочность бетонов на растяжение / И. М. Грушко, А. Г. Ильин, Є. Д. Чихладзе – Харьков: Изд-во ХГУ, 1973. – 155 с.
20. Грушко И. М. Повышение прочности и выносливости бетона / И. М. Грушко, А. Г. Ильин, Є. Д. Чихладзе. – Харьков: Вища школа, 1986. – 149 с.
21. Дворкин Л. Й. Випробування бетонів і будівельних розчинів. Проектування їх складів / Л. Й. Дворкин, В. І. Гоц, О. Л. Дворкин. – К.: Основа, 2014. – 304 с.
22. Дворкин Л. И. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2015. – 386 с.
23. Добавки в бетон: Справочное пособие: Пер. англ. /Под ред. В.С. Рамачандрана. – М.: Стройиздат, 1988. – 570 с.
24. Добролюбов Г. Прогнозирование долговечности бетона с добавками / Г. Добролюбов, В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1983. – 212 с.
25. Довжик В. Г. Технология высокопрочного керамзитобетона / В. Г. Довжик, В. А. Дорф, В. П. Петров. – М.: Стройиздат, 1976. – 136 с.



26. Запорожец И. Д. Тепловыделение бетона / И. Д. Запорожец, С. Д. Окококов, А. А. Парийский. – М.: Стройиздат, 1966. – 314 с.
27. Кайсер Л. А. Цементы и их рациональное использование при производстве сборных железобетонных изделий / Л. А. Кайсер, Р. С. Чехова. – М.: Стройиздат, 1972. – 80 с.
28. Миронов С. А. Ускорение твердения бетона / С. А. Миронов, Л. А. Малинина. – М.: Стройиздат, 1964. – 346 с.
29. Миронов С. А. Теория и методы зимнего бетонирования / С. А. Миронов. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.
30. Миронов С. А. Основы технологии бетона в условиях сухого жаркого климата / С. А. Миронов, Е. Н. Малинский. – М.: Стройиздат, 1985. – 317 с.
31. Москвин В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев и др. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
32. Мчедлов-Петросян О. П. Химия неорганических строительных материалов / О. П. Мчедлов-Петросян. – М.: Стройиздат, 1988. – 304 с.
33. Невилль А. М. Свойства бетона. / А. М. Невилль // Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1972. – 344 с.
34. Попов Н. А. Подбор состава легких бетонов на искусственных пористых заполнителях / Н. А. Попов, М. П. Элинзон, Я. Ш. Штейн. – М.: Стройиздат, 1962. – 83с.
35. Рамачандран В. Наука о бетоне / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.
36. Ратинов В. Б. Химия в строительстве / В. Б. Ратинов, Ф. М. Иванов. – М.: Стройиздат, 1977. – 218 с.
37. Ратинов В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. М. Розенберг – М.: Стройиздат, 1989. – 186 с.
38. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. – М.: НИИЖБ, 1982. – 102 с.
39. Руководство по производству бетонных работ. – М.: Стройиздат, 1975. – 178 с.



40. Руководство по производству бетонных работ в условиях сухого жаркого климата. – М.: Стройиздат, 1977. – 35 с.
41. Руководство по применению бетонов с противоморозными добавками. М.: Стройиздат, 1978. – 39 с.
42. Руководство по подбору составов тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1979. – 102 с.
43. Руководство по применению химических добавок в бетоне. – М.: Стройиздат, 1980. – 55 с.
44. Сизов В. П. Проектирование составов тяжелого бетона / В. П. Сизов. – М.: Стройиздат, 1980. – 144 с.
45. Скрамтаев Б. Г. Способы определения состава бетона различных видов / Б. Г. Скрамтаев, П. Ф. Шубенкин, Ю. М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1966. – 159 с.
46. Сорокер В. И. Производственные расчеты состава бетона / В. И. Сорокер. – М.: Стройиздат, 1933. – 235 с.
47. Сторк Ю. Теория состава бетонной смеси / Ю. Сторк. – Л.: Стройиздат, 1971. – 238с.
48. Ушеров-Маршак А. В. Калориметрия цемента и бетона / А. В. Ушеров-Маршак. – Х-в: “Факт”, 2002. – 177 с.
49. Фере Р. Технология строительных вяжущих материалов / Р. Фере // Пер. с франц. Под ред. Н. Н. Лямина. – С – П.: 1902. – 132 с.
50. Химические и минеральные добавки в бетон (Под ред. О. В. Ушеров-Маршака. – Х-в: Колорит, 2005. – 280 с.
51. Шейкин А. Е. Структура и свойства цементных бетонов / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
52. Шмигальский В. Н. Оптимизация состава цементобетонов / В. Н. Шмигальский. – Кишинев : Штинца, 1981. – 123 с.
53. Abrams Duff A. Design of concrete mixtures. Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, 1918. – 35 p.
54. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1. – Detroit, 1980. – 150 p.
55. Bolomey J. Deformation elastiques, plastiques et de retrait de guelgues betons. Bulletin technique de la Suisse Romande. ann. 68, №15, 1942. – 80 p.



56. Concrete Admixture Handbook / Properties, Science and Technology. V. S. Ramachandran, Noyes Publications, New Jersey, USA, 1984. – 340 p.
57. Dewar J.D. Computer Modelling of Concrete Mixture. – London, New York: E&FN Spon, 1999. – 256 p.
58. Design and Control of Concrete Mixture. Portland Cement Association, Ottawa, 1984. –120 p.
59. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Multi-Parametric Concrete Compositions Design. Nova Science Publishers, New York, USA, 2013. – 223 p.
60. Faury J. Le beton Dronod. Paris, 1953. – 120 p.
61. Fuller M., Thompson S. The Laws of Proportional Concrete. 1927. – 55 p.
62. Graf O. Festigkeit und Elastizität von Beton mit hoher festigkeit. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. H.113, Vereag Ernst und Sohn, Berlin, 1954. – 85 p.
63. Hummel A. Das Beton ABC. Zwölfte Auflage. Berlin, 1959. – 125 p.
64. Optimization Methods for Material Design of Cement-based Composites./ Ed. A. M. Brandt – E&FN Spon, 1998. – 328 p.
65. Lea's Chemistry of cement and concrete, eq. by Peter C. Hewlett, 1998. – 1008 p.
66. Neville A. M. Wlasciwosci betonu, wudanie 4, Krakow, 2000. – 874 s.
67. Orchard D. F. Concrete Technology. – London, 1979. – Vol.1,2. – 1033 p.



Основные работы докт. техн. наук, профессора Дворкина Л.И. з проблеми методології проектування складів бетонів

1. Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетона / Л. И. Дворкин. – Львов: Вища шк., 1981. – 160 с.
2. Дворкин Л. И. Снижение расхода цемента и топлива в производстве сборного железобетона / Л. И. Дворкин. – К.: "Вища школа", 1985. – 99 с.
3. Дворкин Л. И. Ресурсосбережение в строительстве за счет применения побочных промышленных продуктов / Л. И. Дворкин, Баженов Ю.М. – М. : ЦМИПКС, 1986. – 65 с.
4. Дворкин Л. И. Эффективные литые бетоны / Л. И. Дворкин, В. П. Кизима. – Львів: Вища шк., 1986. – 144 с.
5. Дворкин Л. И. Эффективное использование цемента и энергетических ресурсов в производстве сборного железобетона / Л. И. Дворкин, Ю. М. Баженов. – М. : ЦМИПКС, 1987. – 150 с.
6. Дворкин Л. И. Экономия материальных и энергетических ресурсов в строительстве за счет применения новых материалов / Л. И. Дворкин, Ю. М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1987. – 63 с.
7. Дворкин Л. И. Экономия материальных и экономических ресурсов за счет оптимального проектирования бетонов / Л. И. Дворкин, С. В. Коваль. – К. : "Знание", 1987. – 45 с.
8. Дворкин Л. И. Материаловедческие задачи в промышленном и гражданском строительстве / Л. И. Дворкин, В. Л. Шестаков, І. Б. Шамбан. – К.: УМК, ВО, 1989. – 119 с.
9. Дворкин Л. И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Л. И. Дворкин, В. И. Соломатов, В. Н. Вировой и др. – Киев: Будівельник, 1991. – 137 с.
10. Дворкин Л. И. Проектирование составов бетонов с применением математического моделирования / Л. И. Дворкин, І. Б. Шамбан. – К.: УМК, ВО, 1992. – 144с.



11. Дворкин Л. И. Многофакторное прогнозирование свойств и проектирование составов бетонов / Л. И. Дворкин, И. Б. Шамбан. – М. : Стройиздат, 1992. – 132 с.
12. Дворкин Л. И. Эффективные цементно-зольные бетоны / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин, Ю. А. Корнейчук. – Ровно: Изд-во "Эден", 1998. – 195 с.
13. Дворкин Л. И. Основні задачі комп'ютерного бетонознавства / Л. І. Дворкін, О. Л. Дворкін, Ю. В. Гарницький – Рівне: РДТУ, 1999. – 215 с.
14. Дворкин Л. И. Проектирование составов бетона с заданными свойствами / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ровно: РГТУ, 1999. – 202 с.
15. Дворкин Л. И. Проектування складів бетону із заданими властивостями / Л. І. Дворкін, О. Л. Дворкін, Ю. В. Гарницький. – Рівне: РДТУ, 2000. – 215 с.
16. Дворкин Л. И. Цементно-зольные бетоны с добавками полифункциональных модификаторов (ПФМ) для покрытия полов промышленных и гражданских зданий / Л. И. Дворкин, Р. М. Макаренко, В. Р. Кизима. – Ровно: УДУВГП, 2002, – 123 с.
17. Дворкин Л. И. Проектирование составов бетона. (Основы теории и методологии) / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ровно: УГУВХП, 2003. – 265 с.
18. Дворкин Л. И. Практическое руководство по бетону / Л. И. Дворкин, Ю. В. Гарницький, В. В. Житковский и др. // – Кривой Рог: Кривбасцемент, 2006. – 240 с.
19. Дворкин Л. И. Бетони на основі наджорстких сумішей / Л. И. Дворкин, В. В. Житковський, В. О. Каганов. – Рівне: ЦНТЕІ, 2006, – 179 с.
20. Дворкин Л. И. Основы бетоноведения / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин // С. Пб. : Стройбетон, 2006. – 682 с.
21. Дворкин Л. И. Основы теории и методологии многопараметрического проектирования составов бетона / Л. И. Дворкин, В. И. Большаков, О. Л. Дворкин. – Днепропетровск: ПГАСА, 2006. – 360 с.



22. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Київ: "Основа", 2007. – 613 с.
23. Дворкин Л. И. Практическое бетоноведение в вопросах и ответах (Справочник) / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин, О. М. Бордюженко и др. – С.Петербург: ООО «Стройбетон», 2008. – 328 с.
24. Дворкін Л. Й. Бетони і будівельні розчини / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Київ: "Основа", 2008. – 613 с.
25. Дворкин Л. И. Проектирование и анализ эффективности состава бетона / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин, М. В. Горячих. – Ровно, 2009. – 173 с.
26. Дворкин Л. И. Справочник по строительному материаловедению / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2010. – 472 с.
27. Дворкін Л. Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту/ Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, В. В. Житковський. – Рівне: НУВГП, 2011. – 174 с.
28. Дворкин Л. И. Специальные бетоны / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2012. – 368 с.
29. Дворкін Л. Й. В'яжучі, бетони і розчини в сучасному будівництві / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Рівне: НУВГП. Навч. посібник, 2012. – 207 с.
30. Дворкин Л. И. Строительное материаловедение. / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2013. – 830 с.
31. Дворкин Л. И. Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 432 с.
32. Дворкін Л. Й. Випробування бетонів і будівельних розчинів. Проектування їх складів / Л. Й. Дворкін, В. І. Гоц, О. Л. Дворкін. – К.: Основа, 2014. – 304 с.
33. Дворкін Л. Й. Проектування складів бетонів / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Рівне: НУВГП, 2015. – 353с.



34. Дворкин Л. И. Эффективные цементно-зольные бетоны / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин // Palmarium academic publishing, 2015. – 436 p.
35. Дворкин Л. И. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – М.: Инфра- Инженерия, 2015. – 386 с.
36. Дворкін Л. Й. Бетонознавство: питання і відповіді / Л. Й. Дворкін, О. М. Бордюженко, В. В. Житковський та ін. // Навч. посібник. – Рівне: “Волинські обереги”, 2016. – 268 с.
37. Дворкін Л. Й. Бетони спеціального призначення / Л. Й. Дворкін. – Київ: Кондор, 2017. – 352 с.
38. Дворкін Л. Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони / Л. Й. Дворкін, Є. М. Бабич, В. В. Житковський та ін. – Рівне: НУВГП, 2017. – 331 с.
39. Дворкін Л. Й. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини / Л. Й. Дворкін, В. В. Житковський, В. В. Марчук та ін. – Рівне: НУВГП, 2017. – 424 с.
40. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers, New York, USA, 2012. p. 172.
41. Dvorkin L, Nwoubani S., Dvorkin O. Construction Materials. Nova Science Publishers, New York, USA, 2010.– 409 p.
42. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Multi-Parametric Concrete Compositions Design. Nova Science Publishers, New York, USA, 2013, p. 223.
43. Dvorkin L., Dvorkin O., Basics of concrete science. Amazon, (Kindle edition) 382 p., 2011/(e-book).
44. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Construction materials Based on Industrial Waste Products. Nova science publishers, 2016, hh.242.
45. L. Dvorkin, V. Bolshakov. Structure and Properties of Building Materials. Trans Tech Publication ine, Zurich, 2016, p. 220.
46. L. Dvorkin, V. Zhitkovsky, Y. Ribakov. Concrete and montar production using stone sifting. CRC Press Taylor and Francis Group London, New York, 2018, p 159.



ДОДАТКИ

Додаток А

Перелік Державних стандартів, що встановлюють технічні умови на бетони і розчини та методи їх випробувань

ДСТУ Б В. 2.7-23-95	Розчини будівельні. Загальні технічні умови.
ДСТУ Б В.2.7-32:95	Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт.
ДСТУ Б В.2.7-41-95	Метод визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем.
ДСТУ Б В.2.7-43-96	Бетони важкі. Технічні умови.
ДСТУ Б В.2.7-46:2010	Цементи загальнобудівельного призначення.
ДСТУ Б В.2.7-47-96	Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги.
ДСТУ Б В.2.7-50-96	Бетони. Дилатометричний метод прискореного визначення морозостійкості.
ДСТУ Б В.2.7-51-96	Бетони. Структурно-механічний метод прискореного визначення морозостійкості.
ДСТУ Б В.2.7-65:97	Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Класифікація.
ДСТУ Б В.2.7-71-98	Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань.
ДСТУ Б В.2.7-75:98	Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови.
ДСТУ Б В.2.7-82-99	В'язучі гіпсові. Технічні умови.
ДСТУ Б В.2.7-96-2000	Суміші бетонні. Технічні умови.
ДСТУ Б В.2.6-145:2010	Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги PDF.



ДСТУ Б В.2.6-181:2011	Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Методи випробувань.
ДСТУ Б В.2.7-105:2000	Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі.
ДСТУ Б В.2.7-112:2002	Цементи. Загальні технічні умови.
ДСТУ Б В.2.7-114:2002	Суміші бетонні. Методи випробувань.
ДСТУ Б В.2.7-126:2011	Суміші будівельні сухі модифіковані.
ДСТУ Б В.2.7-128:2006	Добавки активні мінеральні та добавки-наповнювачі до цементу. Технічні умови.
ДСТУ Б В.2.7-145:2010	Вироби бетонні тротуарні неармовані. Технічні умови.
ДСТУ Б В.2.7-170:2008	Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності.
ДСТУ Б В.2.7-171:2008	Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови.
ДСТУ Б В.2.7-176:2008	Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови.
ДСТУ Б В.2.7-185:2009	Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та різномірності зміни об'єму.
ДСТУ Б В.2.7-186:2009	Цементи. Метод визначення водовідділення.
ДСТУ Б В.2.7-187:2009	Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск.
ДСТУ Б В.2.7-188:2009	Цементи. Методи визначення тонкості помелу.
ДСТУ Б В.2.7-189:2009	Пісок стандартний для випробувань цементів. Технічні умови.
ДСТУ Б В.2.7-205:2009	Золи-виносу теплових електростанцій для бетонів. Технічні умови.



ДСТУ Б В.2.7-212 :2009

Бетони. Методи визначення
стираності.

ДСТУ Б В.2.7-214:2009

Бетони. Методи визначення міцності
за контрольними зразками.

ДСТУ Б В. 2.7-215:2009

Бетони. Правила підбору складу.

ДСТУ Б В.2.7-216:2009

Бетони. Методи визначення
деформацій усадки та повзучості.

ДСТУ Б В.2.7-217:2009

Бетони. Методи визначення призмової
міцності, модуля пружності і
коефіцієнта Пуассона.

ДСТУ Б В.2.7-218:2009

Бетони. Методи випробування на
витривалість.

ДСТУ Б В. 2.7-220:2009

Бетони. Визначення міцності
механічними методами неруйнівного
контролю.

ДСТУ Б В. 2.7-223:2009

Бетони. Методи визначення міцності
за зразками, відібраними з
конструкцій.

ДСТУ Б В.2.7-224:2009

Бетони. Правила контролю міцності.

ДСТУ Б В. 2.7-225:2009

Будівельні матеріали. Бетони. Метод
визначення тепловиділення при
твердненні.

ДСТУ Б В.2.7-226:2009

Бетони. Ультразвуковий метод
визначення міцності.

ДСТУ Б В.2.7-232:2010

Пісок для будівельних робіт. Методи
випробувань.

ДСТУ Б В.2.7-239:2010

Розчини будівельні. Методи
випробувань

ДСТУ Б В.2.7-249:2011

Бетони жаростійкі. Технічні умови.

ДСТУ Б В.2.7-273:2011

Вода для бетонів і розчинів. Технічні
умови.

EN 196-1:2007

Методи випробування цементу.

EN 206-1:2000

Частина 1. Визначення міцності.

EN 12390-8:2009

Суміші бетонні та бетон. Загальні
технічні умови.

Testing hardened concrete. Depth of
penetration of water under pressure.



Додаток Б
Статистичні таблиці та матриці типових факторних планів
Таблиця 1

Значення τ -критерію

n	p, %		n	p, %		n	p, %	
	1	5		1	5		1	5
3	1,41	1,41	11	2,61	2,34	19	2,93	2,6
5	1,96	1,87	13	2,71	2,43	21	2,98	2,64
7	2,27	2,09	15	2,8	2,49	23	3,03	2,68
9	2,46	2,24	17	2,87	2,55	25	3,07	2,72

Таблиця 2

Значення t – критерію Стьюдента

Число степенів свободи	Рівень значимості		
	0,1/0,9	0,05/0,95	0,02/0,98
1	6031	12,7	31,82
2	2,92	4,3	6,97
3	2,35	3,18	4,54
4	2,13	2,78	3,75
5	2,01	2,57	3,37
6	1,94	2,45	3,14
7	1,89	2,36	3
8	1,86	2,31	2,9
9	1,83	2,26	2,82
10	1,81	2,23	2,76
11	1,8	2,2	2,72
12	1,78	2,18	2,68
13	1,77	2,16	2,65
14	1,76	2,14	2,62
15	1,75	2,13	2,6
16	1,75	2,12	2,58
17	1,74	2,11	2,57
18	1,73	2,1	2,55
19	1,73	2,09	2,54
20	1,73	2,09	2,53
21	1,72	2,08	2,52
22	1,72	2,07	2,51
23	1,71	2,07	2,5
24	1,71	2,06	2,49
25	1,71	2,06	2,48
26	1,71	2,05	2,47
27	1,7	20,5	2,46
28	1,7	2,05	2,46
29	1,7	2,04	2,46
30	1,68	2,02	2,42
40	1,67	2	2,39



Таблиця 3

Значення t -критерію

f	$p, \%$		f	$p, \%$		f	$p \%$	
	1	5		1	5		1	5
1	63,657	12,706	6	3,707	2,447	30	2,75	2,042
2	9,925	4,303	8	3,355	2,306	60	2,66	2
3	5,841	3,182	10	3,169	2,228	120	2,617	1,98
4	4,604	2,776	15	2,947	2,131	∞	2,576	1,96
5	4,032	2,571	20	2,845	2,086			

Таблиця 4

Значення $r_{1-p/2}$

f	$p, \%$		f	$p, \%$		f	$p, \%$	
	1	5		1	5		1	5
1	1	0,997	6	0,834	0,707	12	0,661	0,532
2	0,99	0,95	7	0,798	0,666	15	0,606	0,482
3	0,959	0,878	8	0,765	0,632	20	0,537	0,423
4	0,917	0,811	9	0,735	0,602	30-40	0,393	0,304
5	0,874	0,754	10	0,708	0,576	60	0,325	0,25
						100	0,254	0,195

Таблиця 5

Табличне значення критерію Фішера F_m
(рівень значимості $P=0,05$)

Більшій f_1	Кількість ступенів вільності для дисперсії меншій f_2							
	1	3	5	10	20	50	100	∞
1	161	216	230	242	248	252	253	254
2	18,1	19,2	19,3	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5
3	10,1	9,3	9,0	8,8	8,7	8,6	8,6	8,5
4	7,7	6,6	6,3	6,0	5,8	5,7	5,7	5,6
5	6,6	5,4	5,1	4,7	4,6	4,4	4,4	4,4
10	5,0	3,7	3,3	3,0	2,8	2,6	2,6	2,5
20	4,4	3,1	2,7	2,4	2,1	2,0	1,9	1,8
100	3,9	2,7	2,3	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3
∞	3,8	2,6	2,2	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0



Таблиця 6

Матриця ротатабельного плану для $k = 4$ і для $k = 5$

Точки плану u		Матриця планування для $k = 4$				Матриця планування для $k = 5$				
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
N ₁	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
	2	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1
	3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
	4	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
	5	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
	6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1
	7	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
	8	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1
	9	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
	10	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1
	11	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1
	12	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
	13	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1
	14	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1
	15	-1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1
	16	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
N _α	17	+2	0	0	0	+2	0	0	0	0
	18	-2	0	0	0	-2	0	0	0	0
	19	0	+2	0	0	0	+2	0	0	0
	20	0	-2	0	0	0	-2	0	0	0
	21	0	0	+2	0	0	0	+2	0	0
	22	0	0	-2	0	0	0	-2	0	0
	23	0	0	0	+2	0	0	0	+2	0
	24	0	0	0	-2	0	0	0	-2	0
n ₀	25	0	0	0	0	0	0	0	0	-2
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	32	-	-	-	-	0	0	0	0	0



Матриця плану B_4 для $k = 4$

Точки плану u		Матриця планування B_4 для $k = 4$			
		x_1	x_2	x_3	x_4
N_1	1	+1	+1	+1	+1
	2	+1	+1	+1	-1
	3	+1	+1	-1	+1
	4	+1	+1	-1	-1
	5	+1	-1	+1	+1
	6	+1	-1	+1	-1
	7	+1	-1	-1	+1
	8	+1	-1	-1	-1
	9	-1	+1	+1	+1
	10	-1	+1	+1	-1
	11	-1	+1	-1	+1
	12	-1	+1	-1	-1
	13	-1	-1	+1	+1
	14	-1	-1	+1	-1
	15	-1	-1	-1	+1
	16	-1	-1	-1	-1
N_α	17	+1	0	0	0
	18	-1	0	0	0
	19	0	+1	0	0
	20	0	-1	0	0
	21	0	0	+1	0
	22	0	0	-1	0
	23	0	0	0	+1
	24	0	0	0	-1



Таблиця 8

Матриця плану B_5 для $k = 5$

Точки плану u		Матриця планування B_5 для $k = 5$				
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
N_1	1	+1	+1	+1	+1	+1
	2	+1	+1	+1	+1	-1
	3	+1	+1	+1	-1	+1
	4	+1	+1	+1	-1	-1
	5	+1	+1	-1	+1	+1
	6	+1	+1	-1	+1	-1
	7	+1	+1	-1	-1	+1
	8	+1	+1	-1	-1	-1
	9	+1	-1	+1	+1	+1
	10	+1	-1	+1	+1	-1
	11	+1	-1	+1	-1	+1
	12	+1	-1	+1	-1	-1
	13	+1	-1	-1	+1	+1
	14	+1	-1	-1	+1	-1
	15	+1	-1	-1	-1	+1
	16	+1	-1	-1	-1	-1
	17	-1	+1	+1	+1	+1
	18	-1	+1	+1	+1	-1
	19	-1	+1	+1	-1	+1
	20	-1	+1	+1	-1	-1
	21	-1	+1	-1	+1	+1
	22	-1	+1	-1	+1	-1
	23	-1	+1	-1	-1	+1
	24	-1	+1	-1	-1	-1
	25	-1	-1	+1	+1	+1
	26	-1	-1	+1	+1	-1
	27	-1	-1	+1	-1	+1
	28	-1	-1	+1	-1	-1
	29	-1	-1	-1	+1	+1
	30	-1	-1	-1	+1	-1
	31	-1	-1	-1	-1	+1
	32	-1	-1	-1	-1	-1
N_a	33	+1	0	0	0	0
	34	-1	0	0	0	0
	35	0	+1	0	0	0
	36	0	-1	0	0	0
	37	0	0	+1	0	0
	38	0	0	-1	0	0
	39	0	0	0	+1	0
	40	0	0	0	-1	0
	41	0	0	0	0	+1
	42	0	0	0	0	-1



Таблиця 9

Матриця плану N_{a_5} , близького до Д-оптимального, для $k=5$

Точки плану u		Матриця планування				
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1		2	3	4	5	6
N_1	1	+1	+1	+1	+1	+1
	2	-1	-1	+1	+1	+1
	3	-1	+1	-1	-1	-1
	4	+1	-1	-1	-1	-1
	5	-1	+1	-1	+1	+1
	6	+1	-1	-1	+1	+1
	7	+1	+1	+1	-1	-1
	8	-1	-1	+1	-1	-1
	9	-1	+1	+1	+1	-1
	10	+1	-1	+1	+1	-1
	11	+1	+1	-1	-1	+1
	12	-1	-1	-1	-1	+1
	13	-1	+1	+1	-1	+1
	14	+1	-1	+1	-1	+1
	15	+1	+1	-1	+1	-1
	16	-1	-1	-1	+1	-1
N_λ	17	+1	0	0	0	0
	18	-1	0	0	0	0
	19	0	+1	0	0	0
	20	0	-1	0	0	0
	21	0	0	+1	0	0
	22	0	0	-1	0	0
	23	0	0	0	+1	0
	24	0	0	0	-1	0
	25	0	0	0	0	+1
	26	0	0	0	0	-1
n_0	27	0	0	0	0	0



Таблиця 10

Симплекс-решітчаті плани для побудови моделей
трикомпонентних систем "склад-властивість"

№ дос- лід	Модель												y																																																
	Першого порядку			Другого порядку			Неповна третього порядку			Третього порядку																																																			
	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃																																																	
1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	y ₁																																																
2	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	y ₂																																																
3	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	y ₃																																																
4				1/2	1/2	0	1/2	1/2	0	-	-	-	y ₁₂																																																
5				1/2	0	1/2	1/2	0	1/2	-	-	-	y ₁₃																																																
6				0	1/2	1/2	0	1/2	1/2	-	-	-	y ₂₃																																																
7										1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	y ₁₂₃																																													
8																			1/3	2/3	0	y ₁₂₂																																							
9																												2/3	1/3	0	y ₁₁₂																														
10																																					1/3	0	2/3	y ₁₃₃																					
11																																														2/3	0	1/3	y ₁₁₃												
12																																																							0	1/3	2/3	y ₂₃₃			
13																																																													



Типові норми витрат цементу (СНІП 82-02-95)

Таблиця 1

Клас бетону за міцністю при стиску	Базові норми витрати цементу марки 400 для важкого бетону при твердінні, кг/м ³					
	в природних умовах	в умовах теплової обробки при відпускній міцності, %				
		55-60	70	80	90	100
В7,5	180	180	200	210	225	240
В10	200	200	215	235	245	260
В12,5	225	225	235	260	270	285
В15	225	255	265	280	295	315
В20	305	310	315	340	360	380
В22,5	335	340	350	370	395	420
В25	365	370	380	400	425	450
В30	415	430	440	450	480	520
В35	480	500	510	520	540	570
В40	550	570	580	590	600	

Таблиця 2

Товщина виробу, см	Клас бетону за міцністю при стиску	Базові норми витрати цементу марки 400 для виробів, виготовлених в касетних установках, кг/м ³ при відпускній міцності, %		
		70	80	90
	В 10	280	315	335
	В12,5	310	360	380
10 і менше	В15	350	395	420
	В20	415	480	500
	В22,5	450	520	540
	В10	270	290	325
	В12,5	295	325	355
більше 10	В15	325	360	395
	В20	385	440	475
	В22,5	420	475	520



Таблиця 3

Клас бетону за міцністю при стиску	Базові норми витрати цементу марки 400 для виробів, виготовлених в касетних установках, кг/м ³ при відпускній міцності, %			
	в природних умовах	в умовах теплової обробки при відпускній міцності, %		
		70	80	90
B7,5	280	300	330	355
B10	315	325	355	390
B12,5	350	360	390	420
B15	400	410	450	490
B20	500	500	530	590
B22,5	535	535	580	-
B25	550	550	600	-

Таблиця 4

Умови твердіння	Проектний клас бетону за міцністю при стиску	Відпускна міцність бетону, % проектного класу	Коефіцієнт переходу від цементу марки 400 до цементу марки	
			300	500
Природні при плюсовій температурі	B15 і менше	60-70	1,13	0,85
	Від B20 до B30	60-70	-	0,90
	B35 і більше	60-70	-	0,92
Теплова обробка	B20 і менше	60 і менше	1,14	0,87
	Від B15 до B30	70-80	-	0,87



Таблиця 5

Легкоукладальність			Базові норми витрати цементу для бетону марок, кг/м ³								
марка бетонної суміші за легкоукладальністю	осадка конусу, см	жорсткість, с	за морозостійкістю (перший метод за ГОСТ 10060)					За водонепроникністю			
			F75 і менше	F100 і F150	F200	F300	F400 і більше	W2	W4	W6	W8 і більше
P2	5-9	-	260	300	370	400	455	300	330	400	455
P1	1-4	-	240	280	340	380	430	280	310	380	430
Ж1	-	5-10	220	260	325	360	405	260	290	360	405
Ж2	-	11-20	210	245	300	335	385	245	270	335	385

Таблиця 6

Марка бетону за середньою густиною	Базові норми витрати цементу марки 400 для конструкційно-теплоізоляційного бетону на гравієподібних заповнювачах залежно від проектного класу бетону, кг/м ³				
	B2	B2.5	8 3,5	B5	B7.5
D 600	230	240	—	—	—
D 700	220	230	240	—	—
D 800	210	220	230	240	—
D 900	—	210	220	230	270
D 1000	—	—	210	220	250
D 1100	—	—	—	210	240
D 1200	—	—	—	—	225
D 1300	—	—	—	—	215



Таблиця 7

Клас бетону за міцністю при стиску	Базові норми витрати цементу марки 400 для пустотних вібропресованих стінових каменів з легкого бетону, кг/м ³ на		
	пористому гравію марки 500	пористому щебені марки 800	золошлакостійкій суміші
B5	170	180	140
B7,5	190	190	150
B10	210	210	170
B12,5	240	230	185
B15	290	270	220
B20	350	310	260

Таблиця 8

Клас бетону за міцністю при стиску	Базові норми витрати цементу марки 400 для конструкційного легкого бетону при твердінні, кг/м ³		
	в природних умовах	в умовах теплової обробки і відпускної міцності, %	
		70	90
B7,5	230	230	250
B10	245	245	270
B12,5	290	290	315
B15	320	320	350
B20	410	410	450
B25	480	480	540
B30	560	560	600



З М І С Т

	Стор.
Передмова.....	3
1. СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ. ПОБУДОВА ТА АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ	5
1.1. Статистичні характеристики. Кореляція та регресія	5
1.2 Математичне планування експерименту. Експериментально-статистичні моделі.....	16
2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПОНЕНТІВ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ.....	48
2.1. Цементи.....	48
2.2. Заповнювачі бетону.....	64
2.3 Додатки. Вода замішування.....	88
3. ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ ТА БЕТОНУ	111
3.1. Властивості бетонних сумішей.....	111
3.2. Фізичні та структурні характеристики бетону.....	125
3.3. Міцність бетону.....	146
3.4. Деформативні властивості бетону.....	181
3.5. Стійкість бетону до дії фізико-механічних та хімічних впливів.....	196
3.6. Корозійна стійкість бетону.....	225
4. РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ	238
4.1. Розрахункові залежності для прогнозування властивостей бетонних сумішей.....	239
4.2. Розрахункове прогнозування міцності бетону.....	260
4.3. Розрахункове прогнозування властивостей бетону з урахуванням його міцності, особливостей складу та структури.....	309
5. ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БЕТОНУ. ОСНОВИ МЕТОДОЛОГІЇ.....	349
5.1. Основні задачі.....	349



5.2. Розрахунково-експериментальний метод проектування складів важких бетонів.....	355
5.3. Проектування складів легких та ніздрюватих бетонів..	376
5.4. Багатопараметричне проектування складів бетону (БПСБ).....	420
5.5. Коригування розрахункових складів. Робочі склади бетонних сумішей.....	446
6. ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ ОКРЕМИХ ВИДІВ БЕТОНІВ.....	470
6.1. Дорожні і гідротехнічні бетони.....	470
6.2. Бетони для зимового бетонування.....	498
6.3. Високоміцні швидкотверднучі бетони.....	519
6.4. Бетони з активними мінеральними добавками.....	528
6.5. Дрібнозернисті бетони.....	540
7. Аналіз ефективності складів бетону.....	564
Список використаної літератури.....	589
Основні роботи докт. тех. наук, професора Дворкіна Л.Й. з проблеми методології проектування складів бетонів....	594
Додаток А.....	598
Додаток Б.....	601
Додаток В.....	608
Зміст.....	612