



Національний університет
водного господарства та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування

Кафедра технології будівельних виробів
і матеріалознавства

059-172

Методичні вказівки

для практичних занять, курсового і дипломного проектування з дисципліни „Бетони і будівельні розчини ” (розрахунок складів бетонів для дорожнього будівництва з комплексом нормованих властивостей) для студентів за напрямом підготовки 6.060101 „Будівництво” професійного спрямування “Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів” денної та заочної форм навчання

Рекомендовано методичною
комісією за напрямом підготовки
„ Будівництво ”
Протокол № ____ від _____

Рівне 2010



Національний університет

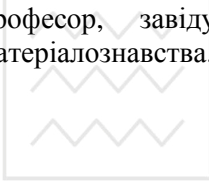
водного господарства

та природокористування

Методичні вказівки для практичних занять, курсового і дипломного проектування з дисципліни „Бетони і будівельні розчини” (розрахунок складів бетонів для дорожнього будівництва з комплексом нормованих властивостей) для студентів за напрямом підготовки 6.060101 „Будівництво” професійного спрямування “Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів” денної та заочної форм навчання / О. Л. Дворкін, Т. О. Поліщук-Герасимчук, М. Г. Кундос. – Рівне: НУВГП, 2010. – 41 с.

Упорядники: О. Л. Дворкін, д-р технічних наук, професор, Т. О. Поліщук-Герасимчук, канд. технічних наук, асистент, М. Г. Кундос, асистент.

Відповідальний за випуск: Л. Й. Дворкін, д-р технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства.



водного господарства
та природокористування

© О. Л. Дворкін,
Т. О. Поліщук-Герасимчук,
М. Г. Кундос, 2010
© НУВГП, 2010



ЗМІСТ

1. ДОРОЖНІ І ГІДРОТЕХНІЧНІ БЕТОНИ	4
2. БЕТОНИ, ЩО ТВЕРДІЮТЬ ПРИ ПОНИЖЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	11
2.1. Бетони для зимового бетонування із застосуванням протиморозних добавок	11
2.2. Бетони для термосного витримування конструкцій.....	16
ДОДАТОК.....	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	41





1. ДОРОЖНІ І ГІДРОТЕХНІЧНІ БЕТОНИ

Дорожні і гідротехнічні бетони об'єднують звичайно жорсткі умови експлуатації і відповідно підвищені вимоги до властивостей, що визначають їх довговічність.

Алгоритми розрахунку складів дорожнього і гідротехнічних бетонів на відміну від звичайних включають визначення водоцементного (B/C), витрат води (B) і цементу (C), частки піску в суміші заповнювачів, витрат окремих його фракцій і вміст добавки, що, у загальному випадку, забезпечують досить значний комплекс нормованих властивостей. Безпосередньо або через кореляційний зв'язок із міцністю бетону при стиску з B/C пов'язані всі міцнісні характеристики, зносостійкість, модуль пружності, гранична розтяжимість, морозостійкість, водонепроникність тощо.

Об'єм втягнутого (емульгованого) повітря (V_n , %) за допомогою повітрявтягувальної добавки, що забезпечує при заданій міцності R'_{cm} необхідну марку за морозостійкістю (F), визначається з виразу:

$$V_n = \frac{\ln\left(\frac{F}{A_1 \cdot R_{cm}^{A_2}}\right)}{0,35}, \quad (1.1)$$

де A_1 , A_2 - коефіцієнти, що визначаються легкоукладальністю суміші і особливостями вихідних матеріалів [9] (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Значення коефіцієнтів A_1 і A_2 у формулі (1.1) для бетонних сумішей з різною легкоукладальністю

Легкоукладальність бетонних сумішей	A_1	A_2
Рухливі бетонні суміші (ОК=9...12 см)	0,34	1,68
Малорухливі бетонні суміші (ОК=1...4 см)	0,91	1,47
Жорсткі бетонні суміші	2,48	1,25

Водовміст бетону визначається показниками легкоукладальності, усадки та ін. Витрата цементу являється не тільки наслідком необхідних значень B/C і B , але може визначатися прямо деякими нормованими властивостями, наприклад, тепловиділенням бетону.



Для розрахунку тепловиділення бетону (Q_t) використовують формулу (8, Додаток).

Для портландцементу питоме тепловиділення q_t визначають за формулою (9, Додаток), шлакопортландцементу за формулою (10, Додаток).

Необхідну температуру вкладання бетонної суміші ($t_{б.н}$) визначають з умови:

$$t_{б.н} \leq t_{б.кр} - K \frac{Q_t}{C\rho_0}, \quad (1.2)$$

де $t_{б.кр}$ – лімітоване значення температури бетону до певного терміну твердіння (температура розігріву); C – питома теплоємність бетону ($C \approx 1,05$ кДж/кг \cdot °C); ρ_0 – середня густина бетону, кг/м 3 ; K – коефіцієнт, що залежить від умов охолодження ($K \approx 0,8 \dots 1$).

Кількість піску може вибиратися не тільки з умови мінімальної водопотреби, але і визначатися з умов водовідділення і розшарування, повітрявтягування та ін.

Ряд залежностей для модуля пружності, повзучості поряд із міцністю при стиску чи V/C припускає вплив концентрації цементного каменю. При використанні таких залежностей після визначення витрати води і цементу перевіряється можливість досягнення необхідних нормованих показників і при необхідності здійснюється коректування значень V і C .

Оптимізація складів спрямована на досягнення заданих умов оптимальності, наприклад, зменшення V і C за допомогою повітрявтягувальних, пластифікуючих та інших добавок.

У табл. 1.2...1.3 наведені схеми характерних алгоритмів багатопараметричного проектування дорожніх і гідротехнічних бетонів.

Таблиця 1.2

Схема алгоритму проектування складу дорожнього і немасивного гідротехнічного бетону

1. Визначають необхідні середні рівні міцності бетону (R_{cm1}), що забезпечують задані класи бетону за міцністю на стиск та іншим видам міцності (Додаток, формули 1-2).



2. Визначають міцність бетону на стиск (R_{cm2}), що забезпечує значення інших властивостей бетону (Додаток, табл. 5).

3. Для подальшого розрахунку вибирають більше із значень R_{cm1} і R_{cm2} значення міцності бетону на стиск R'_{cm} .

4. За формулою (1.1) визначають об'єм втягнутого (емульгованого) повітря за допомогою повітрявтягувальної добавки V_n , що забезпечує при заданій міцності R'_{cm} необхідну марку за морозостійкістю, %.

5. Уточнюють значення міцності бетону з урахуванням впливу втягнутого повітря, приймаючи, що введення в бетонну суміш 1% втягнутого повітря знижує міцність бетону в середньому на 5%:

$$R''_{cm} = R'_{cm} - 0,05 \cdot V_n \cdot R'_{cm} \quad (1.3)$$

6. Знаходять необхідну міцність бетону:

$$R_{cm} = R'_{cm} \frac{R'_{cm}}{R''_{cm}} \quad (1.4)$$

7. Розраховують B/\mathcal{L} бетонної суміші, що забезпечує задану міцність бетону на стиск за формулами 3-4 (Додаток).

8. Знаходять витрату води з урахуванням легковкладальності бетонної суміші й особливостей заповнювачів (Додаток, табл.1).

9. Визначають витрату цементу.

10. Визначають коефіцієнт розсуву зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином α (Додаток, табл. 2) і витрату крупного заповнювача щебеню (\mathcal{L}) за формулою 5 (Додаток). Для дорожніх покриттів згідно ВСН 139-80 "Інструкція з будівництва цементобетонних покриттів автомобільних доріг" і ВБН В.2.3-218-008-97 "Проектування і будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожніх одягів" коефіцієнт розсуву приймається в залежності від крупності піску:

1,7 – для дрібних пісків з $M_{кр}$ від 1,5 до 2,2;

1,8 – для середніх пісків з $M_{кр}$ від 2,0 до 2,5;

1,9 – для крупних пісків з $M_{кр}$ більше 2,5.

11. Розраховують витрату піску (\mathcal{L}) з умови абсолютних об'ємів з урахуванням втягнутого повітря за формулою 6 (Додаток).



Схема алгоритму проектування складів масивного гідротехнічного бетону з обмеженням температури розігріву

1. Визначають середній рівень міцності бетону в проектному віці за формулою 2 (Додаток), а потім за логарифмічною формулою 7 (Додаток) середній рівень міцності бетону в 28 діб.
2. Розраховують V/C бетонної суміші, що забезпечує задану міцність бетону на стиск із формули 4 (Додаток).
3. Визначають витрату води (Додаток, табл.1) для забезпечення заданої легковкладальності бетонної суміші.
4. Визначають витрату цементу.
5. За формулами 8-10 (Додаток) знаходять тепловиділення бетону (Q_t).
6. З умови (1.2) визначають необхідну температуру укладання бетонної суміші ($t_{\sigma,н}$).
7. Витрати заповнювачів знаходять, визначивши коефіцієнт розсуву α (Додаток, табл.2).
8. При необхідності визначають можливі технологічні рішення для досягнення необхідної температури вкладання бетонної суміші.

Нижче наводяться приклади розрахунку складів дорожнього і гідротехнічного морозостійких бетону відповідно із схемами алгоритмів наведеними в табл. 1.2-1.3.

Приклад 1.1. Розрахувати склад бетону для одношарового покриття автомобільної дороги з класами за міцністю B25 і $V_{вв}$ 3,2. Марка бетону за морозостійкістю F300. Бетонна суміш укладається в покриття бетоноукладальною машиною (ОК=2 см).

Вихідні матеріали: портландцемент М500, НГ=25,5%; кварцовий пісок із модулем крупності $M_k=2,2$, вмістом пилюватих домішок 2,5%, густиною $\rho_n=2,67$ кг/л, $\rho_{n,n}=1,55$ кг/л; гранітний щебінь фракції 5-40 мм, $\rho_{щ}=2,7$ кг/л, $\rho_{n,щ}=1,4$ кг/л; вміст пилюватих домішок 0,8%. Вводиться повітрявтягувальна добавка.



Для розрахунку використовуємо алгоритм, наведений у табл. 1.2:

1. Середні рівні міцності бетону на стиск (R_{cm}) і згин ($R_{p.з}$) за формулами 2 а, 2 б (Додаток)

$$R_{cm} = \frac{1,1 \cdot B}{0,778} \cdot 1,12 = \frac{1,1 \cdot 25}{0,778} \cdot 1,12 = 39,6 \text{ МПа} ;$$

$$R_{p.з} = \frac{B_{16}}{0,778} = \frac{3,2}{0,778} = 4,1 \text{ МПа} .$$

2. За формулою 12 (Додаток, табл.5) визначимо необхідну міцність на стиск (R_{cm_1}), що забезпечує нормовану міцність при згині

$$R_{cm_1} = \left(\frac{4,1}{0,08} \right)^{1,5} / 10 = 36,7 \text{ МПа} .$$

3. Оскільки $R_{cm_1} < R_{cm}$ прийmemo значення R_{cm} для подальших розрахунків ($R'_{cm} = 39,6$ МПа).

4. За формулою (1.1) визначимо об'єм втягнутого повітря V_n , за допомогою повітрявтягувальної добавки, що забезпечує при заданій міцності— необхідну марку за морозостійкістю. Коefіцієнти A_1 , A_2 вибираємо з табл.1.1 для заданої рухливості ОК=2 см:

$$V_n = \frac{\ln \left(\frac{F}{0,91 \cdot (R'_{cm})^{1,47}} \right)}{0,35} = \frac{\ln \left(\frac{300}{0,91 \cdot 39,6^{1,47}} \right)}{0,35} \approx 1,1 \% .$$

5. Уточнюємо значення міцності бетону з урахуванням впливу втягнутого повітря

$$R''_{cm} = R'_{cm} - 0,05 \cdot V_n \cdot R'_{cm} = 39,6 - 0,05 \cdot 1,1 \cdot 39,6 = 37,4 \text{ МПа} .$$

6. Необхідна міцність бетону:

$$R_{cm} = R'_{cm} \frac{R'_{cm}}{R''_{cm}} = 39,6 \frac{39,6}{37,4} = 41,9 \text{ МПа} .$$

7. Розрахуємо B/Π бетонної суміші, що забезпечує задану міцність бетону на стиск, приймаючи коefіцієнт $A=0,55$ (Додаток)

$$B / \Pi = \frac{AR_u}{R_{cm} + 0,5AR_u} = \frac{0,55 \cdot 50}{41,9 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 50} = 0,49 .$$



8. Витрата води для забезпечення заданої рухливості бетонної суміші з урахуванням особливостей заповнювачів складе 180 л/м^3 (Додаток, табл. 16).

9. Витрата цементу складе

$$Ц = \frac{B}{B/C} = \frac{180}{0,49} = 367 \text{ кг/м}^3.$$

Розрахуємо витрати заповнювачів, прийнявши коефіцієнт розсуву згідно Додатк, табл. 1-2.

10. Витрата щебеню (прийємо коефіцієнт розсуву $\alpha=1,41$; пустотність щебеню $\Pi_{щ}=0,48$):

$$\Pi = \frac{1000}{\frac{1}{2,7} + 1,41 \cdot 0,48 \frac{1}{1,4}} = 1176 \text{ кг/м}^3.$$

11. Витрату піску знайдемо з урахуванням втягнутого повітря:

$$\Pi = \left[1000 - \left(\frac{367}{3,1} + \frac{1176}{2,7} + 180 + 11 \right) \right] 2,67 = 681 \text{ кг/м}^3$$

Розрахунковий склад бетону:

$$Ц=367 \text{ кг/м}^3; B=180 \text{ кг/м}^3; \Pi=1176 \text{ кг/м}^3; \Pi=681 \text{ кг/м}^3; V_n=11 \text{ л/м}^3.$$

Розрахуємо витрати заповнювачів, прийнявши коефіцієнт розсуву згідно ВСН 139-80, ВБН В.2.3-218-008-97.

12. Витрата щебеню (прийємо коефіцієнт розсуву $\alpha=1,7$; пустотність щебеню $\Pi_{щ}=0,48$):

$$\Pi = \frac{1000}{\frac{1}{2,7} + 1,7 \cdot 0,48 \frac{1}{1,4}} = 1049 \text{ кг/м}^3$$

13. Витрату піску знайдемо з урахуванням втягнутого повітря:

$$\Pi = \left[1000 - \left(\frac{367}{3,1} + \frac{1049}{2,7} + 180 + 11 \right) \right] 2,67 = 807 \text{ кг/м}^3$$

Розрахунковий склад бетону:

$$Ц=367 \text{ кг/м}^3; B=180 \text{ кг/м}^3; \Pi=1049 \text{ кг/м}^3; \Pi=807 \text{ кг/м}^3; V_n=11 \text{ л/м}^3.$$

Приклад 1.2. Розрахувати склад бетону для блока греблі ГЕС класу В15 у віці 180 діб із температурою розігріву у віці 28 діб не більш 28°C. Рухливість бетонної суміші ОК=2 см. Визначити необхідну температуру вкладання бетонної суміші при використанні:

- а) портландцементу М400, НГ=25,5%;
- б) шлакопортландцементу М300, НГ=26,2%.

Вихідні матеріали: кварцовий пісок із модулем крупності $M_k=2,2$, вмістом пилюватих домішок 2,5%, густиною $\rho_n=2,67$ кг/л; гранітний щебінь фракції 5-40 мм із $\rho_{щ}=2,7$ кг/л і $\rho_{н.щ}=1,4$ кг/л, вмістом пилюватих домішок 0,8%.

Розв'язок:

Для розрахунку використовуємо алгоритм, наведений у табл. 1.3.

1. Визначимо міцність бетону у віці 180 діб, а потім по логарифмічній формулі ($R_{cm} = R_{cm}^{180} \frac{\lg 28}{\lg 180}$) знайдемо середній

рівень міцності бетону у віці 28 діб: $R_{cm}^{180} = 22 \text{ МПа}$; $R_{cm} = 14 \text{ МПа}$.

2. Необхідне В/Ц при використанні портландцементу

$$B/C = \frac{0,6 \cdot 40}{14 + 0,5 \cdot 0,59 \cdot 40} = 0,9;$$

шлакопортландцементу

$$B/C = \frac{0,6 \cdot 30}{14 + 0,5 \cdot 0,59 \cdot 30} = 0,77 \cdot$$

3. Витрата води $V=180$ л/м³ (Додаток, табл. 1б).

4. Витрата цементу:

- при використанні портландцементу $C=200$ кг/м³;
- шлакопортландцементу: $C=234$ кг/м³.

5. Знайдемо тепловідлення бетону. Прийемо згідно формул 9-10 (Додаток) q_{28} для портландцементу 315 кДж/кг, шлакопортландцементу 250 кДж/кг.

Тоді при використанні портландцементу

$$Q_{28}^{мц} = 315 \cdot 200 = 63000 \text{ кДж} ;$$

шлакопортландцементу

$$Q_{28}^{щч} = 250 \cdot 234 = 58500 \text{ кДж} .$$



6. Температуру вкладання бетонної суміші ($t_{б.н}$) визначимо з

умови $t_{б.н} \leq t_{б.кр} - K \frac{Q}{C\rho}$.

Прийmemo $K=0,8$; $C=0,966$ кДж/(кг \cdot $^{\circ}$ С); $\rho=2400$ кг/м 3 .

Тоді,

при застосуванні портландцементу

$$t_{б.н} \leq 28 - 0,8 \frac{63000}{0,966 \cdot 2400} \leq 6^{\circ} \text{С};$$

при застосуванні шлакопортландцементу:

$$t_{б.н} \leq 28 - 0,8 \frac{58500}{0,966 \cdot 2400} \leq 8^{\circ} \text{С}.$$

7. Витрати заповнювачів знайдемо за формулами 5-6 (Додаток), розрахувавши коефіцієнт розсуву α (Додаток, табл.2), при застосуванні портландцементу: $\text{Щ}=1283$ кг/м 3 ; $\text{П}=820$ кг/м 3 ; при застосуванні шлакопортландцементу: $\text{Щ}=1283$ кг/м 3 ; $\text{П}=783$ кг/м 3 .

Розрахункові склади бетону:

при застосуванні портландцементу

$$\text{Ц}=200 \text{ кг/м}^3; \text{Щ}=1283 \text{ кг/м}^3; \text{П}=820 \text{ кг/м}^3; \text{В}=180 \text{ кг/м}^3;$$

при застосуванні шлакопортландцементу

$$\text{Ц}=234 \text{ кг/м}^3; \text{Щ}=1283 \text{ кг/м}^3; \text{П}=783 \text{ кг/м}^3; \text{В}=180 \text{ кг/м}^3.$$

2. БЕТОНИ, ЩО ТВЕРДІЮТЬ ПРИ ВІД'ЄМНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

2.1. Бетони для зимового бетонування із застосуванням протиморозних добавок

До найменш енергоємних технологій зимового бетонування відносяться технології, що передбачають введення в бетонні суміші протиморозних добавок. Застосування їх можливе в комплексі з іншими відомими технологіями зимового бетонування: термосу, електропрогріву, паророзігріву тощо. В усіх випадках вихідною техніко-економічною задачею є призначення розрахункової



температури твердіння бетону $t_{\delta,ср.}$, для визначення якої використовується відома формула:

$$t_{\delta,ср.} = t_{\delta,к.} + \frac{t_{\delta,н.} - t_{\delta,к.}}{1,03 + 0,181 \cdot M_n + 0,006(t_{\delta,н.} - t_{\delta,к.})} \quad (2.1)$$

де $t_{\delta,ср.}$ – початкова температура укладання бетонної суміші, °С; $t_{\delta,к.}$ – кінцева температура твердіння бетону, °С; M_n – модуль поверхні конструкції, що бетонується (відношення сумарної площі конструкції до її об'єму).

У конкретних технологічних умовах необхідного значення $t_{\delta,ср.}$ можна досягнути як за рахунок регулювання початкової температури бетону, так і обмеженням кінцевої температури твердіння.

Для регулювання початкової температури бетонної суміші використовують вираз теплового балансу формула 1а (Додаток).

На вибір кінцевої температури впливають, насамперед, температурні умови навколишнього середовища і можлива конструкція опалубки.

Визначення необхідної $t_{\delta,ср.}$ повинно бути ув'язане із заданими значеннями нормованих властивостей і можливих обмежень у часі. При можливому забезпеченні позитивної температури бетону, що твердіє ($t_{\delta,ср.} \geq 0$, °С), вихід міцності η (%) до моменту часу τ (діб) можна знайти за формулою:

$$\eta = R_{\tau,t} / R_{28,20} = k_u t \tau^{K_t} \quad (2.2)$$

де η – рівень міцності бетону $R_{\tau,t}$, що твердіє при температурі t (°С), у віці τ (діб) відповідно до марочної міцності $R_{28,20}$; k_u – коефіцієнт, що залежить від виду цементу; K_t – коефіцієнт, що залежить від температури твердіння.

Для портландцементу можна прийняти $k_u = 0,012$

$$K_t = 0,001(0,37t^2 - 25,7t + 814).$$

При позитивній температурі твердіння $t_{\delta,ср.}$ хімічні добавки виступають у якості прискорювачів твердіння, збільшуючи відповідно η або зменшуючи при заданому η термін твердіння τ .



При від'ємному значенні $t_{б.ср.}$ виникає необхідність у

застосуванні протиморозних добавок. У цьому випадку можливе застосування залежності, встановленої нами з врахуванням відомих рекомендацій та ДБН В.2.7-64-97 "Правила застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах":

$$\eta = \frac{k_y \cdot \ln(\tau)}{-k_1 \cdot t_{б.ср.} + 0,7} - \frac{k_2}{0,0035 t_{б.ср.} + k_3} \quad (2.3)$$

де k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, що враховують вид добавки і її концентрацію, k_y – коефіцієнт, що враховує вид цементу. Значення коефіцієнтів у формулі (2.3) для найбільш відомих протиморозних добавок наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1
Значення коефіцієнтів у формулі (2.3)

Вид добавки	k_1	k_2	k_3	k_y
НН	0,05	12,9	0,7	23,5
ХК+ХН	0,07	5,9	1	24,5
ННХК, ХК+ННК	0,04	2,9	0,3	23,5
П	0,04	1,5	4,9	21,1
ННК, НКМ, НК+М, ННК+М	0,04	1,1	0,2	18

Примітка: НН – нітрит натрію, ХК – хлорид кальцію, ХН – хлорид натрію, ННХК – нітрит-нітрат-хлорид кальцію, П – поташ, ННК – нітрит-нітрат кальцію, НКМ – нітрат кальцію з сечовиною, М – сечовина (карбамід).

Концентрацію протиморозних добавок в залежності від $t_{б.ср.}$ можна прийняти згідно ДБН В.2.7-64-97 "Правила застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах" (табл.2.2).

Формули (2.1-2.3) в сукупності з відомими розрахунковими методиками і залежностями дозволяють сформулювати алгоритми проектування складів бетону із заданими властивостями з



одночасним вибором визначальних параметрів прийнятого способу зимового бетонування конструкцій.

Нижче наводиться схема алгоритму проектування складу бетону для зимового бетонування при можливому застосуванні протиморозних добавок (табл. 2.3).

Таблиця 2.2
Рекомендовані концентрації протиморозних добавок

Вид добавки	Бетон з $B/C < 0,5$					Бетон з $B/C > 0,5$				
	Розрахункова температура твердіння бетону, $^{\circ}\text{C}$									
	-5	-10	-15	-20	-25	-5	-10	-15	-20	-25
НН	4	6	8	-	-	6	8	10	-	-
ННХК	3	6	7	8	10	5	9	10	12	14
НКМ	3	6	7	9	-	5	9	10	12	-
НК, ННК	5	8	12	-	-	7	10	14	-	-
П	5	6	8	10	12	6	8	10	12	15
ХН+ ХК	3+0	3,5+ 3,5	3+ 4,5	2,5+ 6	-	3+2	4+ 2,5	3,5+5	3+7	-
НК+М; ННК+М	3+1	5+ 4,5	6+2	7+3	-	4+ 1,5	7+ 2,5	8+3	9+4	-
ННХК+М	2+1	4,5+ 1,5	6+2	7+2	8+3	4+1	7+ 2,5	8+3	9+4	10+ 4
ХК+НН; ХК+ННК	1,5+ 1,5	3+3	4+4	5,5+ 5,5	5,5+ 5,5	2,5+ 2,5	4,5+ 4,5	6+6	8+8	8+8

Таблиця 2.3
Схема алгоритму розрахунку складів бетону для зимового бетонування при застосуванні протиморозних добавок

<p>1. Визначають середню температуру твердіння бетону за формулою (2.1).</p> <p>2. Визначають вихід міцності бетону η_t в заданому віці τ. У випадку твердіння бетону в опалубці методом термосу η_t знаходиться за формулою (2.2). При застосуванні хімічних добавок η_t знаходять за формулою (2.3).</p>
--



3. Визначають середню проектну міцність бетону у віці 28 діб R'_{np} і фактичну міцність бетону R_{ϕ} , що забезпечує досягнення заданого виходу міцності η .

4. Визначають проектну міцність бетону R'_{np} , що забезпечує досягнення R_{ϕ} за формулою:

$$R'_{np} = \frac{R_{\phi}}{\eta}$$

5. Розраховують витрати компонентів бетонної суміші, що забезпечують досягнення проектної міцності бетону R'_{np} і задану легкоукладальність бетонної суміші у відповідності з відомими рекомендаціями (Додаток).

Нижче наведено приклад розрахунку складів бетону для зимового бетонування у відповідності зі схемою алгоритму приведеній в табл.2.3.

Приклад 2.1. Проектний клас бетону для фундаментних блоків В15. Модуль поверхні фундаментних блоків $M_n=6$. Необхідно через 14 діб, при температурі бетонної суміші в момент її укладання $t_{б.н}=20^{\circ}\text{C}$, одержати міцність 85% від проектної ($\eta=0,85$). Середня температура навколишнього середовища -20°C . Використовується протиморозна добавка ННХК. Осадка конуса бетонної суміші $OK=4$ см.

Характеристика вихідних матеріалів: портландцемент М400; пісок із вмістом домішок 2% і $M_{кр}=2,0$, густиною $\rho_n=2,71$ кг/л ; щебінь із вмістом домішок 1%, фракції 10-40 мм, насипною густиною $\rho_{н.ш}=1,4$ кг/л, густиною $\rho_{ш}=2,85$ кг/л.

Розрахувати склади бетону при застосуванні протиморозної добавки ННХК.

Розв'язок:

1. Середня температура твердіння (2.1)

$$t_{б.ср.} = -20 + \frac{20 + 20}{1,03 + 0,181 \cdot 6 + 0,006 \cdot (20 + 20)} = -3^{\circ}\text{C} \cdot$$

2. Вихід міцності бетону у віці 14 діб (2.3)



$$\eta = \frac{23,5 \cdot \ln(14)}{0,04 \cdot 3,0 + 0,7} - \frac{2,9}{-0,035 \cdot 3,0 + 0,3} = 61\% \text{ або } 0,61.$$

3. Середня проектна міцність бетону (у віці 28 діб) і фактична міцність для досягнення 85% від проектної відповідно складають $R_{np} = 21,6$ МПа; $R_{\phi} = 18,4$ МПа.

4. Для досягнення R_{ϕ} необхідно збільшити проектну міцність до

$$R'_{np} = \frac{R_{\phi}}{\eta} = \frac{18,4}{0,61} = 30,2 \text{ МПа}.$$

5. Розрахунок витрат компонентів бетонної суміші, що забезпечують проектну міцність бетону $R'_{np} = 30,2$ МПа і задану осадку конуса бетонної суміші, проводиться у відповідності з рекомендаціями (Додаток).

Розрахунковий склад бетону:

$$B = 175 \text{ л/м}^3; \text{ Ц} = 328 \text{ кг/м}^3; \text{ Щ} = 1196 \text{ кг/м}^3; \text{ П} = 812 \text{ кг/м}^3.$$

2.2. Бетони для термосного витримування конструкцій

Задачі проектування складу бетону при витримуванні конструкції методом термоса передбачають визначення такого співвідношення компонентів бетонної суміші, яке дозволить забезпечити задані властивості бетону до моменту його замерзання. В залежності від характеру обмежень, що враховуються, можна виділити три основні типи задач:

- із заданими характеристиками вихідних матеріалів і параметрами термосного витримування бетону;
- із заданими параметрами термосного витримування бетону і можливістю вибору виду і марки цементу;
- із можливістю вибору виду і марки цементу і параметрів термосного витримування бетону.

Розрахунки складів бетону зводяться до вирішення оптимізаційних задач з використанням рівнянь:

- марочної міцності бетону;



- теплового балансу, при якому забезпечується необхідний тепловологісний режим твердіння бетону;
- збільшення міцності бетону в часі для прийнятих температурно-вологісних параметрів режиму твердіння;
- абсолютних об'ємів.

Критеріями оптимальності в задачах зазначених типів можуть бути мінімальна 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.

Із (2.2) необхідний термін витримування бетону способом термоса до замерзання рівний:

$$\tau = \left(\eta / k_{\text{ц}} t_{\text{б.ср.}} \right)^{1/K_t} \quad (2.4)$$

Модуль поверхні конструкції і коефіцієнт теплопередачі опалубки визначають за відомими формулами, потім призначають конструкцію опалубки і, при необхідності, для задач третього типу вибирають і додатково розраховують товщину теплоізоляції.

Рівняння теплового балансу бетону, що твердіє при термосному витримуванні, має загальний вигляд:

$$Q_n + Q_{e.ц} = Q_{on} + Q_{арм} + Q_v, \quad (2.5)$$

де Q_n – початковий тепловміст бетонної суміші; $Q_{e.ц}$ – тепло, що виділяється за рахунок екзотермії цементу; Q_{on} , $Q_{арм}$, Q_v – теплові витрати на нагрівання опалубки і арматури та теплові втрати в навколишнє середовище.

Екзотермію бетону за весь період твердіння визначають за формулою 8 (Додаток). Питоме тепловиділення цементу можна знаходити за відомими довідковими даними або використовуючи формули 9-10 (Додаток).

Приймаючи за температуру ізотермічного витримування бетону середню його температуру $t_{\text{б.ср}}$ за період охолодження $\tau_{\text{ср}}$ з формули теплового балансу можна знайти необхідну витрату цементу при термосному витримуванні бетону, що забезпечує при даному коефіцієнті теплопередачі опалубки таку екзотермію, яка необхідна для підтримки $t_{\text{б.ср}}$:



$$Q_t = [KM_{\Pi}(t_{\delta, \text{ср.}} - t_{\delta})\tau - C\rho_{\delta}(t_{\delta, \text{н.}} - t_{\delta, \text{к.}})] / q_{\tau} \quad (2.6)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі опалубки, Вт/(м²·°C); M_{Π} – модуль поверхні конструкції, м¹; $t_{\delta, \text{ср.}}$ – середня температура бетону за період охолодження конструкції, °C; t_{δ} – середня температура повітря за період охолодження бетону; °C, τ – тривалість охолодження бетону, год; C – питома теплоємність бетону, кДж/(кг кДж/(кг ·°C)); ρ_{δ} – густина бетону, кг/м³, $t_{\delta, \text{н.}}$ – початкова температура бетону після укладання, °C; $t_{\delta, \text{к.}}$ – кінцева температура бетону, до якої розраховують тривалість охолодження, °C.

Витрата цементу, прийнята з умови теплового балансу (2.6), може суттєво перевищувати необхідну витрату цементу з умови міцності. У цьому випадку фактична міцність бетону як на момент замерзання R_{ϕ} , так і марочна $R_{28,20}$ будуть значно завищені. Тому оптимальну витрату цементу можна визначити шляхом спільного вирішення рівнянь (2.4), (2.6) і рівняння марочної міцності бетону $R_{28,20}$ (наприклад, формули Болемея–Скрамтаева). Очевидно, що це можливо лише за допомогою методу послідовних наближень. Розрахунок вважають завершеним, коли різниця між значеннями витрати цементу з умов міцності і теплового балансу не перевищує 5%.

Критерієм ефективності обраного складу бетону з точки зору витрати цементу може бути показник Δ :

$$\Delta = (Q_t - Q_{н.т.}) / Q_{н.т.} \quad (2.7)$$

де Q_t і $Q_{н.т.}$ – необхідні витрати цементу для досягнення заданої міцності відповідно при термосному витримуванні і нормальному твердінні (базовий склад) бетону.

Для задач першого типу Δ можна зменшити за рахунок добавок прискорювачів твердіння, переходу на більш тверді суміші, застосуванням ефективних пластифікаторів. Для задач другого типу додатковим ресурсом зменшення Δ може бути перехід на цементу з підвищеною екзотермією, 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 , цільовою функцією оптимізації буде:

$$Q = KM_{\Pi}(t_{\delta, \text{ср.}} - t_{\delta})\tau - q_{\tau}Q \quad (2.8)$$



При електропрогріві цільова функція при оптимізації буде додатково включати енерговитрати на електропрогрів бетону $Q_{ел}$:

$$Q = KM_n(t_{\sigma, cp} - t_v)\tau + Q_{ел} - q_{\tau}Ц \quad (2.9)$$

За умови, що міцність бетону після термосного витримування повинна бути не нижче заданої, за рівняннями (2.8, 2.9) можна оцінити енергетичну ефективність різних можливих технологічних прийомів зменшення Δ в межах кожного із зазначених типів задач, у тому числі і доцільності деякої перевитрати цементу.

Найбільшу складність становлять задачі з використанням вартісного критерію оптимальності, особливо задачі третього типу, коли оптимізація складу бетону розглядається нерозривно з оптимізацією параметрів термосного витримування бетону. У цьому випадку цільова функція:

$$Z = C_{\sigma, c} + C_{оп} + C_{нагр} \quad (2.10)$$

де $C_{\sigma, c}$ – вартість бетонної суміші на момент закінчення укладання; $C_{оп}$ – вартість опалубки; $C_{нагр}$ – вартість попереднього нагрівання бетонної суміші.

Усі складові рівняння (2.10) взаємозалежні. До того ж рішення оптимізаційних задач пов'язане з деякими обмеженнями, викликаними наявністю матеріальних ресурсів і умовами виконання робіт.

На стадії проектування 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 терміну твердіння бетону (утеплення опалубки, застосування цементів з підвищеною екзотермією і прискорювачів твердіння, зменшення водопотреби суміші та ін.). Схема алгоритму розрахунку складу бетону при термосному витримуванні наведена в табл.2.5.

При розрахунках складів бетону для зимового бетонування, що піддаються електропрогріву або іншим способам термічної обробки необхідно враховувати різний приріст міцності при розігріві, ізотермічному прогріві та охолодженні бетону, оскільки середні значення температур в кожний період обробки суттєво відрізняються. Міцність бетону на момент охолодження:

$$R_{\tau} = \Delta R'_{\tau} + \Delta R''_{\tau} + \Delta R'''_{\tau} \quad (2.11)$$



де $\Delta R_{\tau}'$, $\Delta R_{\tau}''$, $\Delta R_{\tau}'''$ – прирости міцності за періоди розігріву, ізотермічного прогріву та охолодження.

$$\Delta R_{\tau}' = k_{\text{и}} t' (\tau')^{K_{\tau}'} \cdot R_{28.20} \quad (2.12)$$

$$\Delta R_{\tau}'' = k_{\text{и}} t'' \left[(\tau' + \tau'')^{K_{\tau}''} - (\tau'')^{K_{\tau}''} \right] \cdot R_{28.20} \quad (2.13)$$

$$\Delta R_{\tau}''' = k_{\text{и}} t''' \left[(\tau' + \tau'' + \tau''')^{K_{\tau}'''} - (\tau' + \tau'')^{K_{\tau}'''} \right] \cdot R_{28.20} \quad (2.14)$$

У приведених формулах τ' , τ'' , τ''' , t' , t'' , t''' – відповідно тривалості і температури розігріву, ізотермічного прогріву та охолодження бетону.

Таблиця 2.4

Схема алгоритму розрахунку складів бетону
термосного витримування

1. Обчислюємо витрату цементу $Ц_{н.м.}$ з умови нормального твердіння бетону. Приймаємо $Ц = Ц_{н.м.}$
2. Приймаємо чи розраховуємо температуру твердіння бетону: початкову $t_{\delta.н.}$ (наприклад, за формулою 11 а (Додаток); кінцеву $t_{\delta.к.}$ до моменту замерзання; середню $t_{\delta.ср.}$ за формулою (2.1).
3. Визначаємо необхідний термін твердіння бетону τ .
4. Визначаємо коефіцієнт теплопередачі прийнятої конструкції опалубки K .
5. Визначаємо питоме тепловиділення цементу q_{τ} із рівняння 9 (Додаток) чи 10 (Додаток).
6. Визначаємо $Ц_t$ із рівняння (2.6).
7. Якщо $\Delta = |Ц_t - Ц| \leq 0,05Ц$, то $Ц = \max(Ц_t, Ц)$ і переходимо до п. 16.
8. Якщо $Ц_t < Ц$, то при необхідності зменшення $Ц_t$ і терміну твердіння – переходимо до п.10; при відсутності такої необхідності приймаємо $Ц = Ц_t$ і переходимо до п. 16.
9. Якщо $Ц_t = Ц_{н.м.}$ – переходимо до п.14, інакше $Ц = (Ц + Ц_{н.м.})/2$ – переходимо до п.12.
10. Застосовуємо один зі способів зменшення $Ц_t$ і t :
 - 10.1 Збільшення проектної міцності – переходимо до п.11.
 - 10.2 Збільшення $t_{\delta.н.}$ і зменшення $t_{\delta.к.}$ – переходимо до п.2.
 - 10.3 Введення прискорювачів твердіння – переходимо до п.3.



- 10.4 Зниження необхідного рівня міцності бетону – переходимо до п.3.
- 10.5 Заміна виду цементу – переходимо до п.5.
- 10.6. Заміна марки цементу того ж виду – переходимо до п.1.
- 10.7 Зменшення водопотреби суміші – переходимо до п. 1.
- 10.8 Зменшення теплопровідності опалубки – переходимо до п.4.
11. Приймаємо $C = (C_t + C_{н.т.})/2$.
12. Знаходимо очікувану марочну міцність бетону при новій витраті цементу C .
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 із 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. Визначаємо енерговитрати на будівельному майданчику Q із рівнянь (2.8) або (2.9).
18. Обчислюємо вартість виконання робіт Z за формулою (2.10).
19. Якщо розглянуті всі можливі способи виконання робіт – переходимо до п. 20, інакше – до п. 10.
20. Вибираємо оптимальний варіант виконання робіт із прийнятого критерію з врахуванням обмежень по ресурсах.

Нижче наводиться приклад розрахунку і оптимізації складів бетону, призначеного для бетонування способом термосу у відповідності до схеми алгоритму наведеної в табл.2.4.

Приклад 2.2. Методом термосу бетонується фундамент із модулем поверхні $M_n=6$. Для виготовлення бетонної суміші з ОК=5...7 см використовуються портландцемент М400 і рядові заповнювачі (максимальна крупність щебеню 40 мм). До замерзання бетон повинен мати міцність не менше 14 МПа (70% марочної). Для виготовлення опалубки використовують дошки



товщиною 25 мм. Розглянути можливі варіанти складу. Температуру нагрівання бетонної суміші в бетонозмішувачі прийняти 35⁰С. Початкова температура твердіння бетону $t_{б.н}=27^0\text{C}$, кінцева $t_{б.к}=5^0\text{C}$. Середня температура повітря за період охолодження бетону 0⁰С.

Розв'язок:

I. Розрахунок складу бетону

1. Водоцементне відношення для бетону з $R_b=14/0,7=20$ МПа (прийmemo $A=0,6$ з формули 3 (Додаток))

$$B / Ц = \frac{AR_u}{R_b + 0,5AR_u} = \frac{0,6 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 40} = 0,75 ;$$

Водопотреба бетонної суміші $B=185$ л/м³ (табл.1, Додаток);

Витрата цементу $Ц_{н.т.}=Ц=B:B/C=185 : 0,75=247$ кг/м³.

2. З умови прикладу приймаемо $t_{б.н}=27^0\text{C}$, $t_{б.к}=5^0\text{C}$. Середня температура твердіння бетону

$$t_{б.ср} = 5 + \frac{27 - 5}{1,03 + 0,181 \cdot 6 + 0,006(27 - 5)} = 14,8^0\text{C}$$

3. Необхідний термін твердіння бетону до замерзання згідно (2.2) при $K_t = 0,001(0,37 \cdot 14,8^2 - 25,7 \cdot 14,8 + 814) = 0,52$

$$\tau = \left(\frac{0,7}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 14,4 \text{ дїб } (345,6 \text{ год}) .$$

4. Коефіцієнт теплопередачі опалубки $K=5,838$ Вт/(м²·⁰С) .

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_{\tau} = 46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 14,4 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 14,4 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 14,4 = 274,3 \text{ кДж/кг} .$$

6. Витрата цементу з умови необхідного тепловиділення при середній температурі повітря 0⁰С:

$$Ц_t = [5,838 \cdot 6(14,8-0) \cdot 345,6 - 1,05 \cdot 2400(27-5)] / 274,3 = 451 \text{ кг} .$$

$$7. \Delta = |451 - 247| = 204 \text{ кг} > 0,05 \cdot 247 = 13,4 \text{ кг} .$$

8. Оскільки $Ц_t=451$ кг > $Ц=247$ кг, розглянемо деякі можливі способи зменшення $Ц_t$ і τ для оптимізації складу бетону по витраті цементу - переходимо до п. 10 (табл.2.4).



II. Оптимізація складу бетону

Спосіб 1:

10.1. Застосовуємо збільшення проектної міцності бетону за рахунок збільшення витрати цементу.

11. Нова витрата цементу $C = (451+247)/2=349 \text{ кг/м}^3$.

12. Міцність бетону при витраті цементу $C = 349 \text{ кг/м}^3$

$$R_{\sigma} = AR_{\sigma} (C/B - 0,5) = 0,6 \cdot 40 (349/185 - 0,5) = 33,3 \text{ МПа.}$$

13. Рівень міцності до моменту замерзання $\eta = R_{\sigma, \text{зам}}/R_{\sigma} = 14/33,3 = 0,42$ – переходимо до п. 3 (табл.2.4).

3. Термін термосного витримування бетону

$$\tau = \left(\frac{0,42}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 5,3 \text{ дів (127,2 год).}$$

4. Конструкцію опалубки не змінюємо, тому $K=5,838 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_{\tau} = 46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 5,3 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 5,3 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 5,3 = 215,9 \text{ кДж/кг.}$$

6. Нова витрата цементу з умови тепловиділення

$$C_{\tau} = [5,838 \cdot 6(14,8-0) \cdot 127,2 - 1,05 \cdot 2400(27-5)] / 215,9 = 31,5 \text{ кг/м}^3.$$

7. $\Delta = |31,5 - 349| = 314,5 \text{ г} > 0,05 \cdot 349 = 17,5 \text{ кг}$.

8. $C_{\tau} = 31,5 \text{ кг} < C = 349 \text{ кг}$.

9. $C \neq C_{\tau}$, тому $C = (349+247)/2=298 \text{ кг/м}^3$ і переходимо до п. 12 (табл.2.4).

12. Міцність бетону при витраті цементу $C=298 \text{ кг/м}^3$

$$R_{\sigma} = 0,6 \cdot 40 (298/185 - 0,5) = 26,7 \text{ МПа.}$$

13. Рівень міцності до моменту замерзання $\eta = 14/26,7 = 0,52$ – переходимо до п. 3 (табл.2.4).

3. Термін термосного витримування бетону :

$$\tau = \left(\frac{0,52}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 8,2 \text{ дів (196,8 год)}.$$

4. Для прийнятої конструкції опалубки $K=5,838 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.



5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_{\tau} = 46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 8,2 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 8,2 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 8,2 = 242,4 \text{ кДж/кг.}$$

6. Витрата цементу з умови тепловиділення

$$C_t = [5,838 \cdot 6(14,8-0) \cdot 196,8 - 1,05 \cdot 2400(27-5)] / 242,4 = 166 \text{ кг/м}^3$$

$$7. \Delta = \Delta = |166 - 298| = 132 \text{ кг} > \square 0,05 \cdot 298 = 14,9 \text{ кг.}$$

$$8. C_t = 166 \text{ кг} < C = 298 \text{ кг.}$$

9. $C \neq C_{н.м}$, тому $C = (298+247)/2 = 273 \text{ кг/м}^3$ і переходимо до п. 12 (табл.2.4).

12. Міцність бетону при витраті цементу $C = 273 \text{ кг/м}^3$

$$R_b = 0,6 \cdot 40 (273/185 - 0,5) = 23,4 \text{ МПа.}$$

13. Рівень міцності до моменту замерзання $\eta = 14/23,4 = 0,60$ – переходимо до п.3 (табл.2.4).

3. Термін термосного витримування бетону

$$\tau = \left(\frac{0,60}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 10,5 \text{ днів (252 год).}$$

4. Коефіцієнт теплопередачі опалубки $K = 5,838 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

5. Питоме тепловиділення цементу :

$$q_{\tau} = 46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 10,5 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 10,5 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 10,5 = 256,9 \text{ кДж/кг.}$$

6. Витрата цементу з умови тепловиділення :

$$C_t = [5,838 \cdot 6(14,8-0) \cdot 252 - 1,05 \cdot 2400(27-5)] / 256,9 = 263 \text{ кг/м}^3.$$

7. $\Delta = |263 - 273| = 10 \text{ кг} < \square 0,05 \cdot 273 = 13,7 \text{ кг}$. Остаточню приймаємо $C = 273 \text{ кг/м}^3$ – переходимо до п. 16 (табл.2.4).

Спосіб 2:

10.7. Застосовуємо зменшення водовмісту бетонної суміші і витрати цементу при введенні суперпластифікатора С-3 у кількості 0,7...1% – переходимо до п. 1 (табл.2.4).

1. Визначаємо витрату цементу при зменшеному водовмісті бетонної суміші $B = 145 \text{ кг/м}^3$ і нормальному твердінні $C_{н.м} = B : (B/C) = 145 : 0,75 = 193 \text{ кг/м}^3 < C_{\min} = 200 \text{ кг/м}^3$. Приймаємо $C = C_{\min} = 200 \text{ кг/м}^3$.



Оскільки прийнято $U_{н.м}=U_{min}$, то визначаємо фактичну міцність бетону R_{σ} і її рівень до моменту замерзання $R_{\sigma}=0,6 \cdot 40 (200/145 - 0,5)=21,1$ МПа; $\eta=14/21,1=0,66$.

2. Температури твердіння бетону прийняті раніше $t_{\sigma,н}=27^{\circ}\text{C}$, $t_{\sigma,к}=5^{\circ}\text{C}$; $t_{\sigma,ср.}=14,8^{\circ}\text{C}$.

3. Термін термосного витримування бетону :

$$\tau = \left(\frac{0,66}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 12,9 \text{ дiб (309,6 год)} \cdot$$

4. Коефіцієнт теплопередачі опалубки $K=5,838$ Вт/(м²·°C) .

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_{\tau} = 46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 12,9 + 0,038 \cdot 40^2 - \\ - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 12,9 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 12,9 = 268,1 \text{ кДж/кг.}$$

6. Нова витрата цементу з умови тепловиділення

$$U_{\tau} = [5,838 \cdot 6(14,8-0) \cdot 309,6 - 1,05 \cdot 2400(27- 5)] / 268,1 = 355 \text{ кг/м}^3$$

7. $\Delta = |355 - 200| = 155 \square \text{ кг} > \square 0,05 \cdot 200 = 10 \text{ кг}$.

8. Оскільки $U_{\tau}=355$ кг $>$ $U=200$ кг, є необхідність у зменшенні U , і τ - переходимо до п. 10 (табл.2.4).

10.1. Зменшуємо U_{τ} і τ шляхом підвищення марочної міцності бетону.

11. Нова витрата цементу $U=(355+200)/2=278$ кг/м³ .

12. Міцність бетону при витраті цементу $U=278$ кг/м³

$$R_{\sigma}=AR_{u} (U / B - 0,5)=0,6 \cdot 40 (278/145 - 0,5)=34 \text{ МПа.}$$

13. Рівень міцності до моменту замерзання

$$\eta = R_{\sigma, зам} / R_{\sigma} = 14/34 = 0,41 - \text{переходимо до п. 3 (табл.2.5).}$$

3. Термін термосного витримування бетону :

$$\tau = \left(\frac{0,41}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 5,1 \text{ дiб (122,4 год)} \cdot$$

4. Коефіцієнт теплопередачі опалубки $K=5,838$ Вт/(м²·°C) .

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_{\tau} = 46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 5,1 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - \\ - 29,7 \lg^2 5,1 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 5,1 = 213,1 \text{ кДж/кг.}$$

6. Нова витрата цементу з умови тепловиділення :

$$U_{\tau}=[5,838 \cdot 6(14,8-0) \cdot 122,4 - 1,05 \cdot 2400(27- 5)]/213,1=19,7 \text{ кг/м}^3$$

7. $\Delta = |19,7 - 278| = 258,3 \square \text{ кг} > \square 0,05 \cdot 278 = 13,9 \text{ кг}$.



8. $C_i = 19,7 \text{ кг} < C = 278 \text{ кг}$.

9. $C \neq C_{н.м}$, тому $C = (278 + 200) / 2 = 239 \text{ кг/м}^3$ і переходимо до п.12 (табл.2.4).

12. Міцність бетону при витраті цементу $C = 239 \text{ кг/м}^3$
 $R_b = 0,6 \cdot 40 (239 / 145 - 0,5) = 27,6 \text{ МПа}$.

13. Рівень міцності до моменту замерзання
 $\eta = 14 / 27,6 = 0,51$ - переходимо до п. 3 (табл.2.4).

3. Термін термосного витримування бетону :

$$\tau = \left(\frac{0,51}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 7,7 \text{ днів (184,8 год)} \cdot$$

4. Для прийнятої конструкції опалубки $K = 5,838 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_c = 46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 7,7 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 7,7 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 7,7 = 238,5 \text{ кДж/кг}$$

6. Витрата цементу з умови тепловиділення :

$$C_i = [5,838 \cdot 6(14,8 - 0) \cdot 184,8 - 1,05 \cdot 2400(27 - 5)] / 238,5 = 144 \text{ кг/м}^3 \cdot$$

7. $\Delta = |144 - 239| = 95 \text{ кг} > 0,05 \cdot 239 = 12 \text{ кг}$.

8. $C_i = 144 \text{ кг} < C = 239 \text{ кг}$.

9. $C \neq C_{н.м}$, тому $C = (239 + 200) / 2 = 220 \text{ кг/м}^3$ - переходимо до п.12 (табл.2.4).

12. Міцність бетону при витраті цементу $C = 220 \text{ кг/м}^3$
 $R_b = 0,6 \cdot 40 (220 / 145 - 0,5) = 24,4 \text{ МПа}$.

13. Рівень міцності до моменту замерзання
 $\eta = 14 / 24,4 = 0,57$ - переходимо до п. 3 (табл.2.4).

3. Термін термосного витримування бетону :

$$\tau = \left(\frac{0,57}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 9,7 \text{ днів (232,8 год)} \cdot$$

4. Для прийнятої конструкції опалубки $K = 5,838 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_c = 46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 9,7 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 9,7 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 9,7 = 252,3 \text{ кДж/кг}$$

6. Витрата цементу з умови тепловиділення :

$$C_i = [5,838 \cdot 6(14,8 - 0) \cdot 232,8 - 1,05 \cdot 2400(27 - 5)] / 252,3 = 230 \text{ кг/м}^3 \cdot$$



7. $\Delta = |230 - 220| = 10 \text{ кг} < 0,05 \cdot 220 = 11 \text{ кг}$. Остаточню приймаємо $C = 230 \text{ кг/м}^3$ - переходимо до п. 16 (табл.2.4).

Спосіб 3:

10.6. Застосовуємо цемент М500 із більшою екзотермією – переходимо до п. 1 (табл.2.4).

1. Визначаємо необхідне В/Ц при нормальному твердінні

$$B / C = \frac{AR_u}{R_{\sigma} + 0,5AR_u} = \frac{0,6 \cdot 50}{20 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 50} = 0,86;$$

Визначаємо витрату цементу при вмісті бетонної суміші $B = 185 \text{ кг/м}^3$ і нормальному твердінні $C_{н,м} = C = B / (B/C) = 85 : 0,86 = 215 \text{ кг/м}^3$.

2. Температури твердіння бетону прийняті раніше $t_{\sigma,н} = 27^{\circ}\text{C}$, $t_{\sigma,к} = 5^{\circ}\text{C}$; $t_{\sigma,ср.} = 14,8^{\circ}\text{C}$.

3. Термін термосного витримування бетону

$$\tau = \left(\frac{0,7}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{0,52} = 14,4 \text{ днів (345,6 год)}.$$

4. Коефіцієнт теплопередачі опалубки $K = 5,838 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$.

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_{\tau} = 46,59 - 0,365 \cdot 50 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 14,4 + 0,038 \cdot 50^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 14,4 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 14,4 = 304,9 \text{ кДж/кг}.$$

6. Нова витрата цементу з умови тепловиділення

$$C_i = [5,838 \cdot 6(14,8 - 0) \cdot 345,6 - 1,05 \cdot 2400(27 - 5)] / 304,9 = 373 \text{ кг/м}^3.$$

7. $\Delta = |373 - 215| = 158 \text{ кг} > 0,05 \cdot 215 = 10,8 \text{ кг}$.

8. Оскільки $C_i = 373 \text{ кг} > C = 215 \text{ кг}$, зменшуємо C_i і τ – переходимо до п. 10 (табл.2.4).

10.1. Зменшуємо C_i і τ шляхом підвищення марочної міцності бетону.

11. Нова витрата цементу $C = (373 + 215) / 2 = 294 \text{ кг/м}^3$.

12. Міцність бетону при витраті цементу $C = 294 \text{ кг/м}^3$

$$R_{\sigma} = AR_u (C / B - 0,5) = 0,6 \cdot 50 (294 / 185 - 0,5) = 32,7 \text{ МПа}.$$

13. Рівень міцності до моменту замерзання

$$\eta = R_{\sigma, зам} / R_{\sigma} = 14 / 32,7 = 0,43 - \text{переходимо до п. 3 (табл.2.4)}.$$



3. Термін термосного витримування бетону

$$\tau = \left(\frac{0,43}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 5,2 \text{ діб (124,8 год)} .$$

4. Коефіцієнт теплопередачі опалубки $K=5,838 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_\tau = 46,59 - 0,365 \cdot 50 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 5,2 + 0,038 \cdot 50^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 5,2 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 5,2 = 248,7 \text{ кДж/кг} .$$

6. Нова витрата цементу з умови тепловиділення

$$C_t = [5,838 \cdot 6(14,8-0) \cdot 124,8 - 1,05 \cdot 2400(27-5)] / 248,7 = 36,3 \text{ кг/м}^3 .$$

$$7. \Delta = |36,3 - 294| = 257,7 \text{ кг} > 0,05 \cdot 294 = 14,7 \text{ кг} .$$

$$8. C_t = 36,3 \text{ кг} < C = 294 \text{ кг} .$$

9. $C \neq C_{н,м}$, тому $C = (294+215)/2 = 255 \text{ кг/м}^3$ - переходимо до п. 12 (табл.2.4).

12. Міцність бетону при витраті цементу $C = 255 \text{ кг/м}^3$

$$R_{\bar{\sigma}} = 0,6 \cdot 50 (255/185 - 0,5) = 26,4 \text{ МПа} .$$

13. Рівень міцності до моменту замерзання

$$\eta = R_{\bar{\sigma}, зам} / R_{\bar{\sigma}} = 14/26,4 = 0,53 - \text{переходимо до п. 3 (табл.2.4)} .$$

3. Термін термосного витримування бетону

$$\tau = \left(\frac{0,53}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 8,4 \text{ діб (201,6 год)} .$$

4. Коефіцієнт теплопередачі опалубки $K=5,838 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_\tau = 46,59 - 0,365 \cdot 50 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 8,4 + 0,038 \cdot 50^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 8,4 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 8,4 = 274,3 \text{ кДж/кг} .$$

6. Нова витрата цементу з умови тепловиділення :

$$C_t = [5,838 \cdot 6(14,8-0) \cdot 201,6 - 1,05 \cdot 2400(27-5)] / 274,3 = 155 \text{ кг/м}^3 .$$

$$7. \Delta = |155 - 255| = 100 \text{ кг} > 0,05 \cdot 255 = 12,8 \text{ кг} .$$

$$8. C_t = 155 \text{ кг} < C = 255 \text{ кг} .$$

9. $C \neq C_{н,м}$, тому $C = (255+215)/2 = 235 \text{ кг/м}^3$ - переходимо до п. 12 (табл.2.5).

12. Міцність бетону при витраті цементу $C = 235 \text{ кг/м}^3$

$$R_{\bar{\sigma}} = 0,6 \cdot 50 (235/185 - 0,5) = 23,1 \text{ МПа} .$$

13. Рівень міцності до моменту замерзання $\eta = 14/24,4 = 0,61$ - переходимо до п. 3 (табл.2.4).



3. Термін термосного витримування бетону

$$\tau = \left(\frac{0,61}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 10,8 \text{ дiб (259,2 год)} \cdot$$

4. Для прийнятої конструкції опалубки $K=5,838 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_\tau = 46,59 - 0,365 \cdot 50 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 10,8 + 0,038 \cdot 50^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 10,8 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 10,8 = 288,9 \text{ кДж/кг}.$$

6. Витрата цементу з умови тепловиділення

$$C_i = [5,838 \cdot 6(14,8-0) \cdot 259,2 - 1,05 \cdot 2400(27-5)] / 288,9 = 245 \text{ кг/м}^3.$$

7. $\Delta = |245 - 235| = 10 \square \square \text{ кг} < \square \square 0,05 \cdot 245 = 12,3 \text{ кг}$. Остаточню приймаємо $C=245 \text{ кг/м}^3$ - переходимо до п. 16 (табл.2.4).

Сносiб 4:

10.3. Застосовуємо прискорювач твердіння бетону CaCl_2 для збільшення міцності бетону в ранньому віці – переходимо до п. 3 (табл.2.4).

3. Визначаємо термін витримування бетону τ при $R_{б,зам} = 14/1,2 = 11,7 \text{ МПа}$, де 1,2 – коефіцієнт збільшення міцності бетону у віці 7...10 дiб при застосуванні CaCl_2 :

$$\tau = \left(\frac{11,7 / 20}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1}{0,52}} = 10,0 \text{ дiб (240 год)} \cdot$$

4. Для прийнятої конструкції опалубки $K=5,838 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

5. Питоме тепловиділення цементу

$$q_\tau = 46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,1 \cdot 14,8 + 212,98 \lg 10 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,7 \lg^2 10 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 10 = 254,3 \text{ кДж/кг}.$$

6. Витрата цементу з умови тепловиділення

$$C_i = [5,838 \cdot \square 6(14,8-0) \cdot 240 - 1,05 \cdot 2400(27-5)] / 254,3 = 244 \text{ кг/м}^3.$$

7. $\Delta = |244 - 247| = 3 \square \square \text{ кг} < \square \square 0,05 \cdot 247 = 12,4 \text{ кг}$. Остаточню приймаємо $C=247 \text{ кг/м}^3$ - переходимо до п. 16 (табл.2.4).

Сносiб 5:

10.8. Зменшуємо теплопровідність опалубки - переходимо до п. 4 (табл.2.4).



4. Визначаємо максимально можливе значення коефіцієнта теплопередачі опалубки

$$K_{max} = [\alpha (t_{\sigma,н.} - t_{\sigma,к.}) + \alpha_{н.т.} q_t] / [M_{II} (t_{\sigma,сп.} - t_{н.в.}) \tau] =$$

$$[1,05 \cdot 2400 (27 - 5) + 247 \cdot 247,3] / [6 (14,8 - 0) 240] = 4,0 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Приймаємо наступну конструкцію опалубки, для якої $K \approx 4,0 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$: дошки 25 мм; шар толю; мінеральна вата 40 мм; фанера 10 мм. Переходимо до п. 16 (табл.2.4).

16. Далі розраховуємо витрату заповнювачів за методом абсолютних об'ємів для усіх варіантів складу бетону. Остаточні варіанти складу наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Остаточні варіанти складу бетону термосного витримування

№ п/п	Витрата компонентів, кг/м ³					Термін до замерзання, діб
	цемент	вода	пісок	щебінь	добавка ¹⁾	
1	273	185	610	1297	-	10,5
2	230	145	641	1306	2,3 (C-3)	9,70
3	245 ³⁾	185	636	1301	-	10,8
4	247	185	635	1301	2,47(CaCl ₂)	10,0
5 ²⁾	247	185	635	1301	-	14,4

Примітки: ¹⁾ – витрата добавки у перерахунку на суху речовину; ²⁾ – склад опалубки: дошки – 25 мм; шар толю; мінеральна вата – 40 мм; фанера – 10 мм; ³⁾ – використано портландцемент марки 500.

Вибір певного складу здійснюється по собівартості бетонних робіт (табл. 2.4, п.18) з урахуванням особливостей конкретної виробничої ситуації



ДОДАТОК ЗАГАЛЬНІ РОЗРАХУНКОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ І ДОВІДКОВІ ДАНІ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СКЛАДІВ БЕТОНУ

У випадку коли міцність бетону задається класом за міцністю на стиск, розраховують середню міцність бетону за формулою:

$$R_{\sigma} = \frac{B}{1 - 1,64 C_v}, \quad (1)$$

де C_v – коефіцієнт варіації.

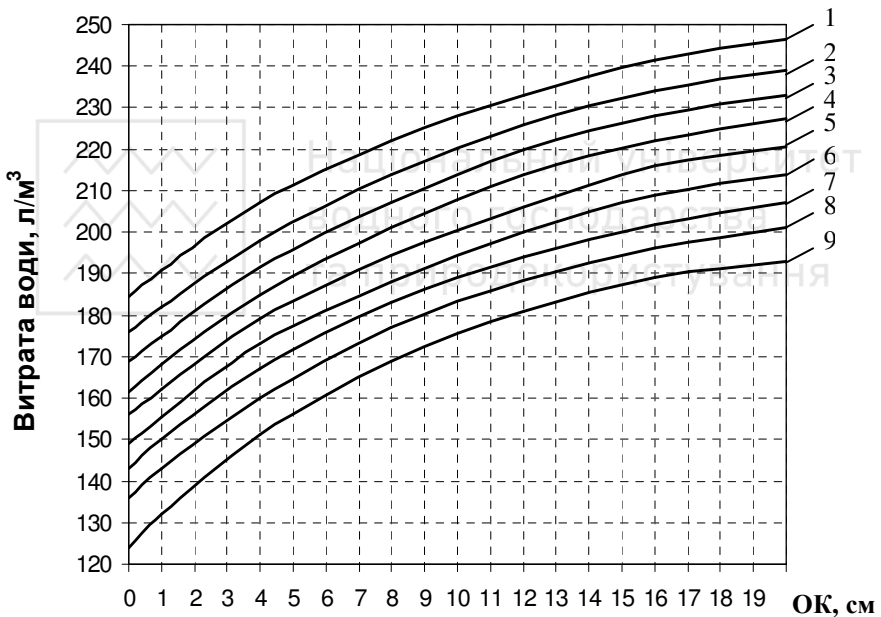


Рис. 1. Графік витрати води на 1 м³ бетону в залежності від рухливості бетонних сумішей [19]: 1 - Пісок $M_{кр}=3$, НК П=5 мм;
2-9 - Щебінь гранітний крупністю 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80 і 150 мм



Поправки для визначення витрати води

Матеріал, витрата цементу, температура бетонної суміші	Витрата води, л/м ³		Додаткові вказівки
	збільшення	зменшення	
Щебінь із метаморфічних і осадових порід	4-13	—	4 л/м ³ при міцності каменю 80 МПа; 13 л/м ³ – при міцності каменю 40 МПа. Для іншої міцності поправки визначаються шляхом інтерполяції.
Гірський гравій	—	5-10	Нижчі значення – при середній окатаності зерен; вищі – при добре окатаній поверхні зерен.
Морський і річковий гравій	—	9-15	
При зміні модуля крупності піску на кожні 0,5%: - у бік зменшення від 3; - у бік збільшення від 3.	3; 4; 5 —	— 3; 4; 5	3, 4 і 5 л при вмісті пилу, мулу та глини відповідно до 1, 3, 5% .
Щебінь із порід каменю з гладкою поверхнею зламу (діабаз, базальт, кварцитовий піщаник тощо)	—	3	—
Пісок з гладкою, добре окатаною поверхнею (типу Вольського)	—	4	—



Матеріал, витрата цементу, температура бетонної суміші	Витрата води, л/м ³		Додаткові вказівки
	збільшення	зменшення	
При зміні нормальної густоти цементного тіста на кожен відсоток: - у бік зменшення від 28%; - у бік збільшення від 28%	4 —	— 4	—
При зміні витрати цементу на кожні 10 кг понад 350 кг/м ³	1	—	—
Промитий щебінь	—	6	—
Промитий пісок	—	7	—
При збільшенні вмісту у щебені пилу, мулу понад 1% і частинок менших 5 мм понад 5% на кожен відсоток понад норми	1-2	—	1 л при вмісті частинок менше 5 мм; 2 л при вмісті тільки мулу і пилу
При збільшенні вмісту у щебені пилу, мулу (але не глини) на кожен відсоток понад 3%	2	—	—



Матеріал, витрата цементу, температура бетонної суміші	Витрата води, л/м ³		Додаткові вказівки
	збіль- шення	змен- шення	
При температурі бетонної суміші, °С:			
5	—	5	Еталон
10	—	4	
15	—	2	
20	—	—	
25	3	—	
30	7	—	
35	11	—	

Якщо C_v невідомий можливе застосування формули:

– для визначення міцності на стиск:

$$R_{cm} = \frac{1,1 \cdot B}{0,778} \cdot 1,12 \quad (2 \text{ а})$$

– для визначення міцності на розтяг при згині:

$$R_{p.z} = \frac{B_{tb}}{0,778} \quad (2 \text{ б})$$

Орієнтовно потрібне C/B або B/C можна знайти за формулою:

$$R_{\sigma} = A R_y (C / B - 0,5), \quad (3)$$

де R_{σ} – міцність бетону у віці 28 діб; A – коефіцієнт, обумовлений якістю заповнювачів.

Формулу (3) застосовують для $C/B < 2,5$. При $C/B > 2,5$ ($R_{\sigma} < 2A R_y$) використовують формулу:

$$R_{\sigma} = A_1 R_y (C / B + 0,5) \quad (4)$$

В залежності від якості матеріалів приймають наступні значення коефіцієнтів A , A_1 :

	A	A_1
Висока якість	0,65	0,45
Рядова якість	0,6	0,4
Низька якість	0,55	0,37



Водопотребу бетонних сумішей визначають відповідно до даних рис.1 та табл.1а або табл.1б.

Таблиця 1б

Водопотреба бетонної суміші

Легкоукладальність			Витрата води, л/м ³ , при максимальній крупності заповнювачів, мм					
Осадка конуса, см	Жорсткість, с		гравій			щебінь		
	за стан- дартом	за техніч. віскози- метром	10	20	40	10	20	40
0	31	120...90	150	135	125	160	145	135
0	30...20	80...60	160	145	130	170	155	145
0	20...11	50...30	165	150	135	175	160	150
0	10...5	15...30	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 з водопотребою $V_n=7\%$. При збільшенні V_n на кожен відсоток витрата води збільшується на 5 л, а при зменшенні V_n зменшується відповідно на 5 л. 2. Якщо використовують дрібний пісок, то витрата води збільшується на 10 л, крупний – зменшується на 10 л.

Для визначення витрат щебеню (гравію) і піску використовують розрахункові формули:

$$W_{ц} = \frac{1000}{\rho_{н.ц} \frac{\alpha}{\rho_{н.ц}} + \frac{1}{\rho_{ц}}} \quad (5)$$



$$П = \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_c} + \frac{Ш}{\rho_{ш}} + B + V_{ен} \right) \right] \rho_n \quad (6)$$

де $Ц, П, Ш, B$ – витрати відповідно цементу, піску, щебеню (гравію) і води; $\rho_c, \rho_n, \rho_{ш}$ – густини відповідно цементу, піску і крупного заповнювача; $\rho_{н.ш}$ – насипна густина крупного заповнювача; α – коефіцієнт розсуву зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином; $V_{ен}$ – об'єм втягнутого (затисненого) повітря; $П_{ш}$ – пустотність крупного заповнювача.

Коефіцієнт розсуву α визначають відповідно до даних табл.2.

Таблиця 2

Коефіцієнт розсуву (для пластичних бетонних сумішей)

Витрата цементу, кг/м ³	Значення α при В/Ц					
	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 з водопотребою $V_n=7\%$. При збільшенні V_n на кожен відсоток α зменшується на 0,03, а при зменшенні V_n зростає відповідно на 0,03. 2. Для жорстких бетонних сумішей ($Ц < 400$ кг/м³) $\alpha = 1,05...1,15$.

Для визначення міцності бетону у віці τ , (дів) використовують логарифмічну формулу:

$$R_{cm}^{28} = R_{cm}^{\tau} \frac{\lg 28}{\lg \tau}, \quad (7)$$

де $R_{cm}^{28}, R_{cm}^{\tau}$ – міцність бетону при стиску відповідно у віці 28 дів і τ .



Для інженерних розрахунків при оцінці тепловиділення бетону в різний термін твердіння (Q_τ) може бути використана формула:

$$Q_\tau = q_\tau \Pi \quad (8)$$

Рівняння для розрахунку питомого тепловиділення портландцементу марок М300...М600 (q_1) і шлакопортландцементу марки М300 (q_2), кДж/кг:

$$q_1 = -46,59 - 0,365 R_y + 7,11 t + 212,98 \lg \tau + 0,038 R_y^2 - 0,054 t^2 - 29,7 (\lg \tau)^2 - 0,36 t \lg \tau ; \quad (9)$$

$$q_2 = 12,24 + 4,886 t + 130,47 \lg \tau - 0,046 t^2 - 18,33 (\lg \tau)^2 . \quad (10)$$

Для регулювання початкової температури бетонної суміші використовують рівняння теплового балансу:

$$t_{\delta.n.} = \frac{0,22(t_n \cdot \Pi + t_{щ} \cdot \Pi + t_u \cdot \Pi) + t_e \cdot B}{0,22(\Pi + \Pi + \Pi) + B} \quad (11 \text{ а})$$

де $t_n, t_{щ}, t_u, t_e$ – відповідно температури піску, щебеню або гравію, цементу і води, $^{\circ}\text{C}$; Π, Π, Π, B – відповідно витрати піску, щебеню або гравію, цементу і води, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При можливому використанні льоду для охолодження води, рівняння теплового балансу має вигляд:

$$t_{\delta.n.} = \frac{0,22(t_n \Pi + t_{щ} \Pi + t_u \Pi) + t_e B - 79,6 L}{0,22(\Pi + \Pi + \Pi) + B + L} \quad (11 \text{ б})$$

де L - витрата льоду, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Таблиця 3

Поправки для коректування водопотреби по температурі бетонних сумішей

Температура бетонної суміші	Поправка ΔB , $\text{л}/\text{м}^3$
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: B_0 - розрахункові витрати води без поправок.



Таблиця 4

Зниження водопотреби бетонної суміші, що містить золу,
від витрати добавок

Добавка	Витрата добавки, % від маси цементу	Зниження водопотреби, %	Добавка	Витрата добавки, % від маси цементу	Зниження водопотреби, %
С-3	0,4...0,5	20...25	С-4	0,5...0,6	15...20
	0,7...0,8	25...30		0,8...1,0	20...25
	0,9...1,0	33...35	ЛСТ	0,25...0,3	5...10

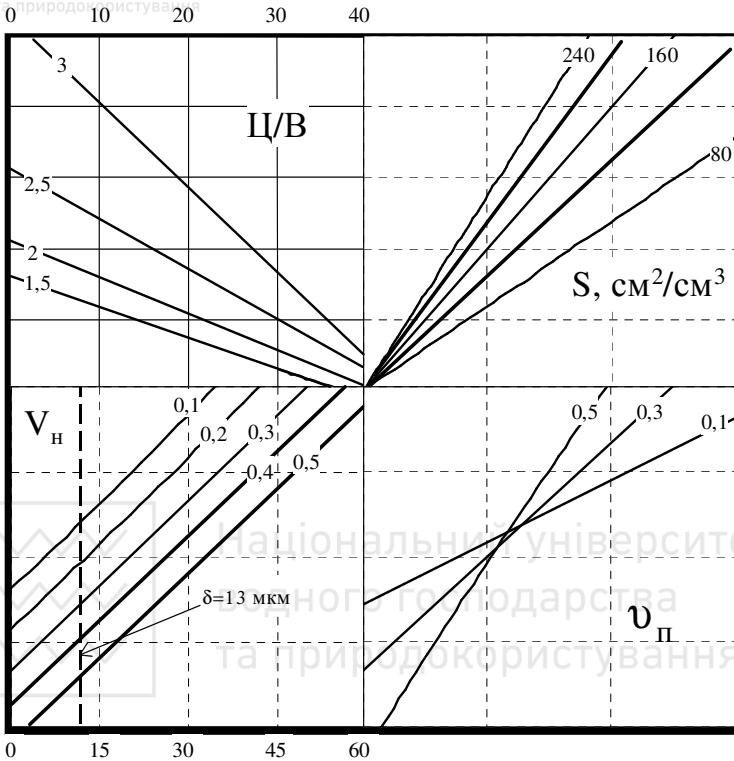
Таблиця 5

Деякі розрахункові формули властивостей бетону,
однозначно пов'язаних з його міцністю на стиск

Нормована властивість бетону	Розрахункова формула
Міцність бетону на розтяг при згині, $R_{p.z}$	$R_{p.z} = 0,08(10R_{cm})^{2/3}$ (12)
Міцність бетону на розтяг при розколюванні, $R_{p.p}$	$R_{p.p} = 0,055(10R_{cm})^{2/3}$ (13)
Міцність бетону при осьовому розтягу, $R_{o.p}$	$R_{o.p} = 0,046(10R_{cm})^{2/3}$ (14)



Ж, с



δ , мкм

Рис. 2. Номограмма для визначення умовної товщини плівки цементного тіста на зернах заповнювача в жорстких бетонних сумішах [9]

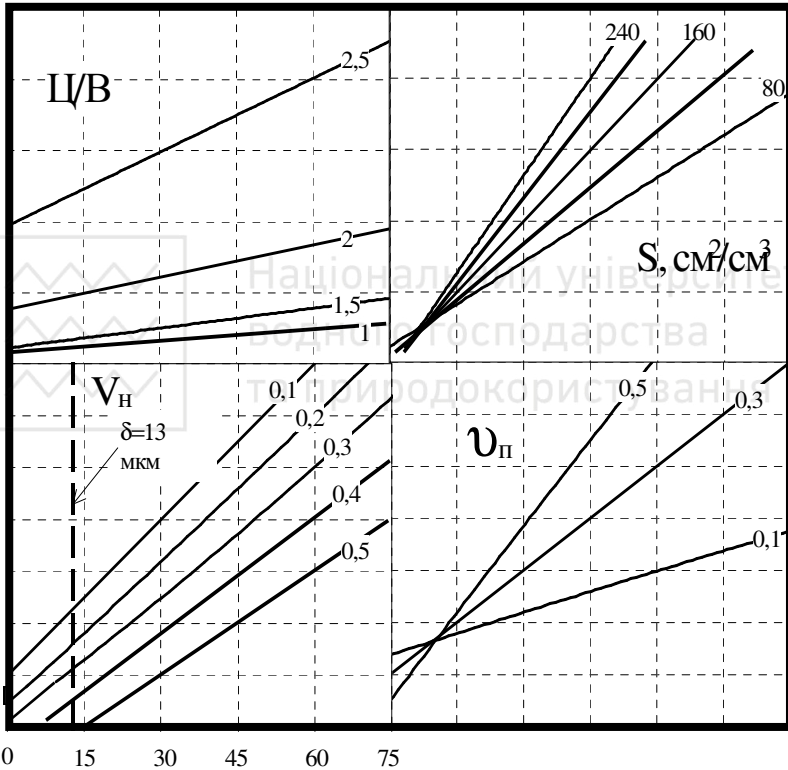
Примітки: 1. Величина V_n характеризує нестачу цементного тіста для заповнення порожнин між зернами заповнювача (а в деяких випадках і на створення плівки умовно-мінімальної товщини (13 мкм), наявність затисненого повітря і зменшення пустотності піску під час ущільнення суміші. У першому наближенні V_n можна приймати рівним обсягові затисненого повітря $V_{з.п.}$, однак у випадку, якщо отримана величина δ буде меншою 13 мкм, V_n потрібно збільшувати, доки умова ($\delta \geq 13$ мкм) не буде виконана.



2. Номограми (рис.2,3) справедливі при застосуванні поргладцементу з нормальною густиною цементного тіста $\text{НГ}=28\%$, при $\text{НГ}<28\%$ товщину δ потрібно зменшувати, а при $\text{НГ}>28\%$ – збільшувати з розрахунку 5% на 1% зміни НГ. Для уточнення V_n по номограмах потрібно відповідно змістити лінію $\delta=13$ мкм вліво, якщо $\text{НГ}>28\%$ і вправо – якщо $\text{НГ} < 28\%$.

ОК, см

5 10 15 20 25



δ , мкм

Рис. 3. Номограма для визначення умовної товщини плівки цементного тіста на зернах заповнювача в пластичних бетонних сумішах [9].



СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баженов Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов. - М.: Стройиздат, 1975. – 272 с.
2. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Высшая школа, 1987. – 449 с.
3. Берг О.В., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон.- М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
4. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Проектирование составов бетона с заданными свойствами. - Ровно, РГТУ, 1999.-202 с.
5. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Корнейчук Ю.А. Эффективные цементно-зольные бетоны. – Ровно:Изд-во"Эден", 1999. – 195 с.
6. Дворкин Л.И., Соломатов В.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. -Киев: Будівельник, 1991. – 137 с.
7. Дворкин О.Л. Многопараметрическое проектирование составов бетона. –Ровно: Изд-во РДТУ, 2001. – 121 с.
8. Запорожец И.Д., Огороков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона. -М.: Стройиздат, 1966. – 314 с.
9. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. -М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
10. Оганесянц С.Я., Львович К.И. Проектирование составов песчаных бетонов в зависимости от технологии их изготовления. // Сб. "Совершенствование методов проектирования составов и контроля качества бетонов". -М.: МДНТП, 1982.- С. 98-104.
11. Руководство по подбору составов тяжелого бетона. -М.: Стройиздат,1979. – 102 с.
12. Руководство по применению бетонов с противоморозными добавками. М.: Стройиздат, 1978. – 39 с.
13. Руководство по применению химических добавок в бетоне. - М.: Стройиздат, 1980. – 55 с.
14. Руководство по производству бетонных работ. - М.: Стройиздат, 1975.-178 с.
15. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона. -М.: Стройиздат, 1980. – 144 с.
16. Design and Control of Concrete Mixture. Portland Cement Association, Ottawa, 1984.-120 p.