

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування

Кафедра технології будівельних виробів
і матеріалознавства

03-09-132М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних занять та самостійної роботи
з дисципліни **«Експериментально-статистичне
моделювання при проектуванні складів бетонів»**
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня
за освітньо-професійною програмою «Технології будівельних
конструкцій, виробів і матеріалів»
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
всіх форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою з
якості ННІБА
Протокол № 2 від 05.11.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання практичних занять та самостійної роботи з дисципліни «Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм навчання. [Електронне видання] / Бордюженко О. М. – Рівне : НУВГП, 2024 – 43 с.

Укладач: Бордюженко О. М., к.т.н, доцент, доцент кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства.

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

Керівник групи забезпечення ОП: Дворкін Л. Й.

Зміст

1. Загальні рекомендації до самостійної роботи з дисципліни ...	4
2. Приклади проектування складів бетонів різних видів.....	5
2.1. Бетони для виробів, що піддають тепловологісній обробці..	5
2.2. Гідротехнічні бетони.....	17
2.3. Фіробетони.....	34
3. Реферат для самостійної роботи	41
4. Рекомендована література	43

1. Загальні рекомендації до самостійної роботи з дисципліни "Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів"

Проектування складів бетону – одна з основних задач, що виникає при технологічній підготовці його виробництва. З нею пов'язані як забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей бетону так і техніко-економічна ефективність його виробництва і застосування.

Предметом вивчення навчальної дисципліни є формування теоретичних знань щодо методологічних основ застосування математичного планування експериментів і системного аналізу при розв'язанні задач проектування оптимальних складів бетонів а також отримання практичних навичок вирішення задач проектування оптимальних складів бетонів різних видів із застосуванням експериментально-статистичного моделювання.

Метою дисципліни є надання студентам навичок самостійно ставити та вирішувати на інженерному рівні задачі, пов'язані із оптимальним проектуванням бетонів складів різних видів а також прогнозування їх властивостей.

Більшу частину часу, відведеного навчальним планом на вивчення дисципліни, передбачено для виконання самостійної роботи. Повноцінне засвоєння теоретичного матеріалу неможливе без його обговорення та розв'язування задач на практичних заняттях, тому окремі теми розглядаються на передбачених планом аудиторних практичних заняттях. В той же час, у зв'язку з недостатністю аудиторного часу для повного охоплення всіх тем дисципліни, самостійна робота набуває особливо важливого значення.

Самостійна робота студента передбачає комплекс заходів, спрямованих на поглиблення знань та набуття практичних навичок. Зокрема, вона включає:

- Систематичне опрацювання лекційного матеріалу: детальне вивчення конспектів, підручників та додаткової літератури для закріплення теоретичних знань.

- Самостійне дослідження нових тем: вивчення розділів програми, які не розглядаються на лекціях, з метою розширення кругозору.
- Практичне застосування знань: розв'язання задач та вправ для закріплення теоретичного матеріалу.
- Індивідуальні завдання: виконання розрахункових робіт під керівництвом викладача для розвитку аналітичних навичок.
- Творчі проекти: підготовка рефератів на обрану тему для демонстрації здатності до самостійного дослідження та аналізу інформації.

Теоретичні відомості дисципліни викладені в навчальному посібнику [1].

Перш ніж приступати до самостійного вирішення задач за кожною із тем, необхідно глибоко засвоїти теоретичний матеріал та зрозуміти зв'язок з іншими темами дисципліни.

2. Приклади проектування складів бетонів різних видів

2.1. Бетони для виробів, що піддають тепловологісній обробці

Розповсюджені розрахунково-експериментальні методи проектування складів не стосуються, як правило, бетонів, що тверднуть при пропарюванні та використовуються у виробництві збірних залізобетонних конструкцій. Підбір складів таких бетонів зазвичай рекомендується емпіричним методом «пробних замішувань» при 3-4 значеннях Ц/В і пропарюванні за прийнятним на підприємстві режимом. На основі отриманих міцнісних показників (R_{cm}) будується залежність $R_{cm}=f(\text{Ц/В})$ і графічно визначається необхідне значення Ц/В.

Труднощі розрахункового визначення Ц/В, що забезпечує необхідну міцність бетону після пропарювання, полягають у тому, що на останню разом з хіміко-мінералогічним і речовинним складом цементу, що використовується, суттєво

впливають режимні параметри прискороного тверднення. Запропонована значна кількість рівнянь регресії міцнісних показників пропарювального бетону. Вони, однак, справедливі лише для конкретних умов і не можуть бути покладені в основу розрахунково-експериментального методу з широким діапазоном можливого застосування.

На даний час багатьма науковими колективами виконані широкі дослідження впливу різних технологічних факторів на міцність пропареного бетону, в результаті яких створена емпірична база для розробки розрахункових залежностей.

При проектуванні складів пропареного бетону на відміну від бетону нормального тверднення крім проектної чи марочної міцності через 28 діб (R_{cm}^{28}) необхідно забезпечити відпускну (розпалубочну, передавальну) міцність після теплової обробки (R_{cm}^{np}). Нормовані міцнісні параметри можуть досягатися як за однакового, так і за різних Ц/В. В останньому випадку можна встановити визначальний міцнісний параметр, для досягнення якого необхідне більше значення Ц/В. Останній може змінюватися залежно від величини і співвідношення R_{cm}^{28} і, режиму пропарювання, терміну подальшого тверднення.

В міру скорочення режиму пропарювання і терміну наступного витримування, збільшення чисельного значення R_{cm}^{np} створюються передумови, щоб остання стала визначальним міцнісним параметром і навпаки. Звуженню інтервалу необхідних Ц/В аж до їх співпадання при зсуві в бік менших значень сприяє застосування швидкотверднучих цементів, добавок-прискорювачів тверднення, оптимізація режимів теплової обробки.

Міцність пропареного бетону у 28 діб може відхилитися від відповідної міцності бетону нормального тверднення в менший або більший бік. Дослідження і практичний досвід показують, що при оптимальному режимі пропарювання можна звести до мінімуму або взагалі усунути зниження 28-добової міцності.

Приклад 1. Розрахувати із застосуванням математичних моделей (1 ... 3) склади пропарених бетонів із міцністю на стиск в 28 діб $R_{cm}^{28} = 24$ МПа і відпускну міцністю (R_{cm}^0) 70 і 85% від

R_{cm}^{28} . Рухомість бетонних сумішей: а) ОК=3 см; б) ОК=8 см. Оцінити можливість економії цементу при збільшенні $R_{ц}$ до 51 МПа, зменшенні НГ до 24,6% і $V_{п}$ до 6,5%, збільшенні $\tau_{го}$ до 18 год. і $T_{із}$ до 80°C.

Характеристика вихідних матеріалів: активність цементу $R_{ц}$ =43 МПа, нормальна густина НГ=26,8%, пісок із $V_{п}$ =9,5%, $\rho_{п}$ =2,65 кг/л; щебінь із $\rho_{щ}$ =2,7 кг/л; $V_{щ}$ =2%. Тривалість теплової обробки $\tau_{го}$ =12 год. при температурі ізотермічного прогріву $T_{із}$ =70°C.

1. Знаходимо шляхом розв'язання рівнянь (1 та 2) табл. 1 необхідне Ц/В для досягнення заданих значень R_{cm}^0 і R_{cm}^{28} при вихідних умовах і умовах, заданих для економії цементу.

2. За допомогою рівняння (3) розрахуємо витрати води (В).

3. З умови $Ц=В \cdot Ц/В$ знайдемо витрати цементу і значення $\Delta Ц$.

4. Витрату щебеню знаходимо за формулою:

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{щ}} + \frac{\alpha P_{щ}}{\rho_{н.щ}}}$$

де $P_{щ}$ – пустотність крупного заповнювача;

$\rho_{н.щ}$ – його насипна густина, кг/л;

$\rho_{щ}$ – густина крупного заповнювачів, кг/л;

α – коефіцієнт розсушення зерен щебеню (гравію) цементно-піщаним розчином.

Таблиця 1

Рівняння регресії для розрахунку пропарених бетонів

Вид бетону і вихідні матеріали	Вихідний параметр	Рівняння регресії	Фактори
Бетон важкий із використаним портландцементу, кварцового піску і гранітного щебеню	R_{cm}^0 , МПа (4 год. після пропарювання)	$y_1 = 24,73 - 1,58x_1 + 12,0x_2 - 0,62x_5 + 3,66x_6 + 3,2x_7 + 2,06x_8 - 0,4x_1^2 - 0,6x_2^2 - 0,4x_5^2 + 0,15x_6^2 - 1,15x_7^2 - 0,68x_8^2 - 1,2x_1x_2 - 0,65x_1x_5 + 0,67x_1x_7 + 2,79x_2x_6 + 1,15x_2x_7 \quad (1)$	$x_1 = (J-1)/1$ $x_2 = (Ц/В-2,1)/0,8$ $x_5 = (НГ-27,2)/2,6$

Бетон важкий із використанням портландцементу, кварцового піску і гранітного щебеню	R_{cm}^{28} , МПа (28 діб після пропарювання)	$y_2 = 31,96 - 1,63x_1 + 12,21x_2 - 0,69x_3 + 4,0x_6 + 2,13x_7 - 0,74x_8 - 0,3x_1^2 - 1,25x_2^2 - 0,4x_3^2 + 0,05x_6^2 - 0,15x_7^2 - 1,45x_8^2 - 0,98x_1x_2 - 1,68x_1x_6 + 1,01x_2x_7 + 0,99x_2x_8 + 0,64x_3x_6$ (42)	$x_6 = (R_u - 43,2)/8,7$ $x_7 = (\tau_{m.o} - 14)/4$ $x'_7 = (lg \tau_{n.m} - 1,85)/0,4$ $x_8 = (T_{is} - 80)/15$ $x_9 = (\tau_{n.m} - 1,85)/0,40$
Важкий із використанням портландцементу, варцового піску і гранітного щебеню	Водопотреба (В), л/м ³	$y_3 = 186,0 + 28,9x_1 + 10,3x_2 + 21,5x_3 + 14,1x_4 + 9,1x_5 - 2,7x_{12} + 6,8x_{22} + 11,3x_{32} + 7,8x_{42} + 5,3x_{52} + 1,6x_{1x_4} + 2,1x_1x_5 + 2,1x_3x_4 - 2,4x_3x_5$ (3)	$x_1 = (L-1)/1$ $x_2 = (Ц/В - 2,1)/0,8$ $x_3 = (В_{ц} - 4)/3$ $x_4 = (В_n - 9)/5$ $x_5 = (НГ - 27,2)/2,6$

Примітки: Л - умовний показник легкоукладальності бетонної суміші, який знаходять за шкалою:

умовний показник	0	0,6	1	1,4	1,8	2
				осадка конуса, см		
жорсткість, с	40 с	2 см	5 см	8 см	11 см	13 см

Ц/В – цементно-водне і водоцементне відношення; НГ – нормальна густина цементу, %; R_u – активність цементу, МПа; $\tau_{m.o}$ і $\tau_{n.m}$ – тривалість теплової обробки і тривалість нормального твердіння, діб; T_{is} – температура ізотермічного прогріву; В – водовміст бетонної суміші, л/м³; $B_{ц}, B_n, B_{шл}$ – відповідно водопотреба щебеню, піску і шлаку, визначені за методикою Ю.М. Баженова, в %.

Коефіцієнт розсунення визначають по довідковим даним (табл. 2).

Таблиця 2

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 $В_p=7\%$.

При збільшенні V_p на кожен відсоток α зменшується на 0,03, а при зниженні V_p - зростає відповідно на 0,03. 2. Для жорстких бетонних сумішей ($C < 400 \text{ кг/м}^3$) $\alpha = 1,05 \dots 1,15$.

5. Витрату піску розрахуємо з рівняння:

$$P = (1000 - C / \rho_c - V / \rho_e - \Pi C / \rho_{\Pi}) \rho_n \dots$$

Для орієнтованих розрахунків по моделях можуть бути використані номограми (рис. 1...3). Розрахункові склади бетонів наведені в табл. 3.

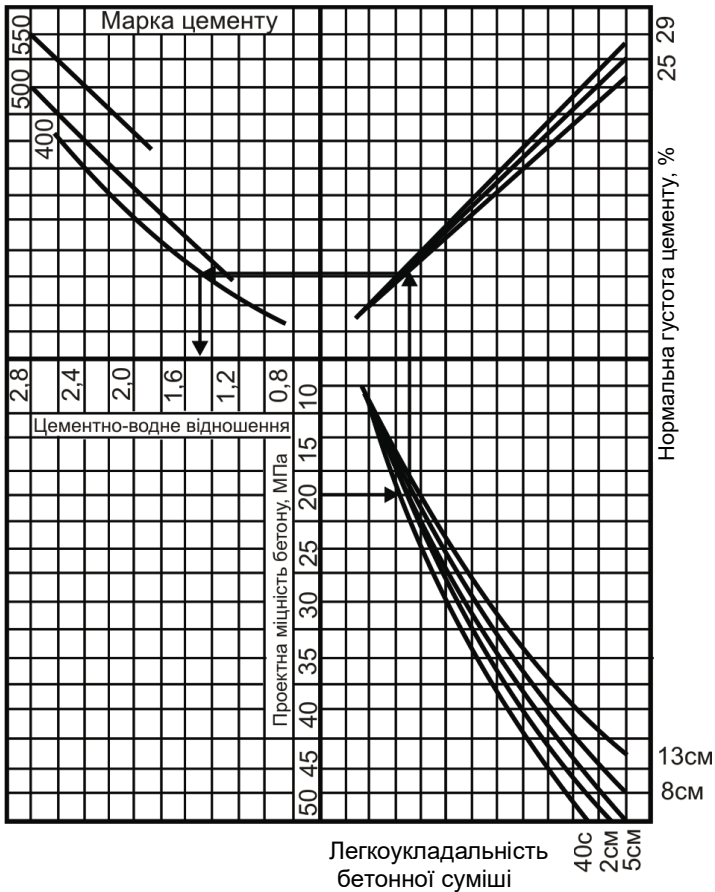


Рис. 1. Номограма для визначення цементно-водного відношення

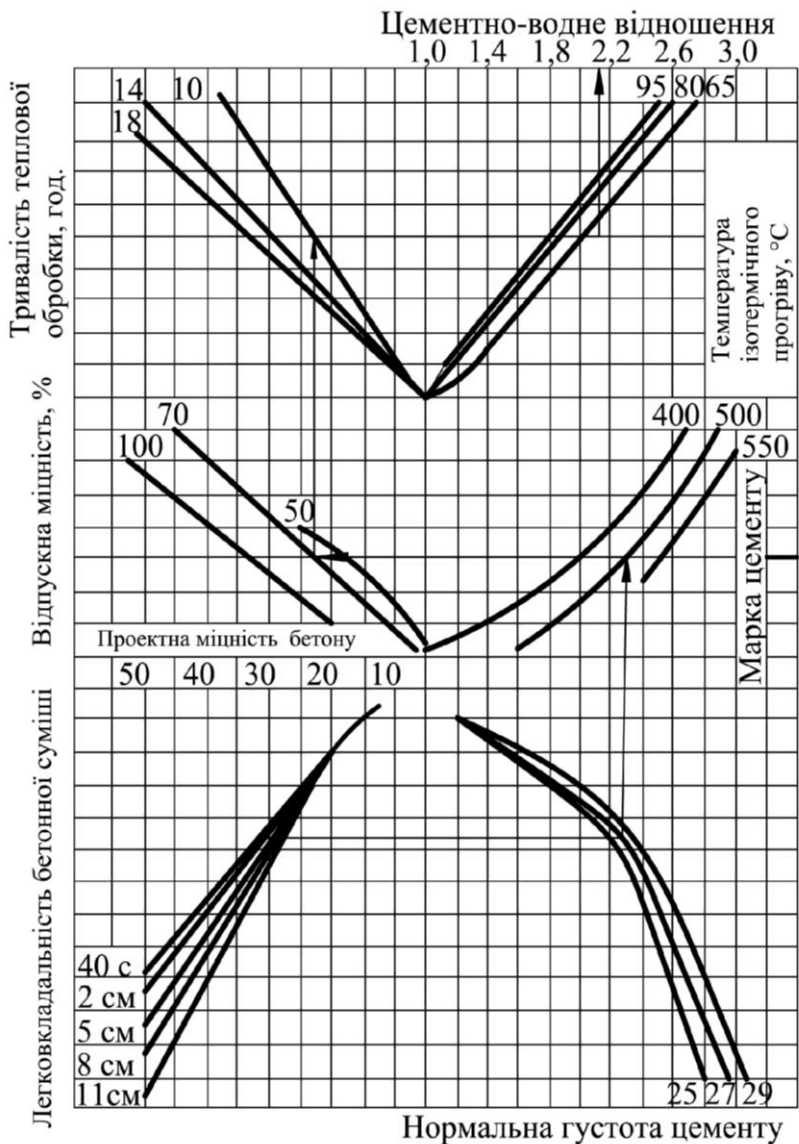


Рис. 2. Номограма визначення цементно-водного відношення бетону, що піддається тепловологісній обробці(ТВО)

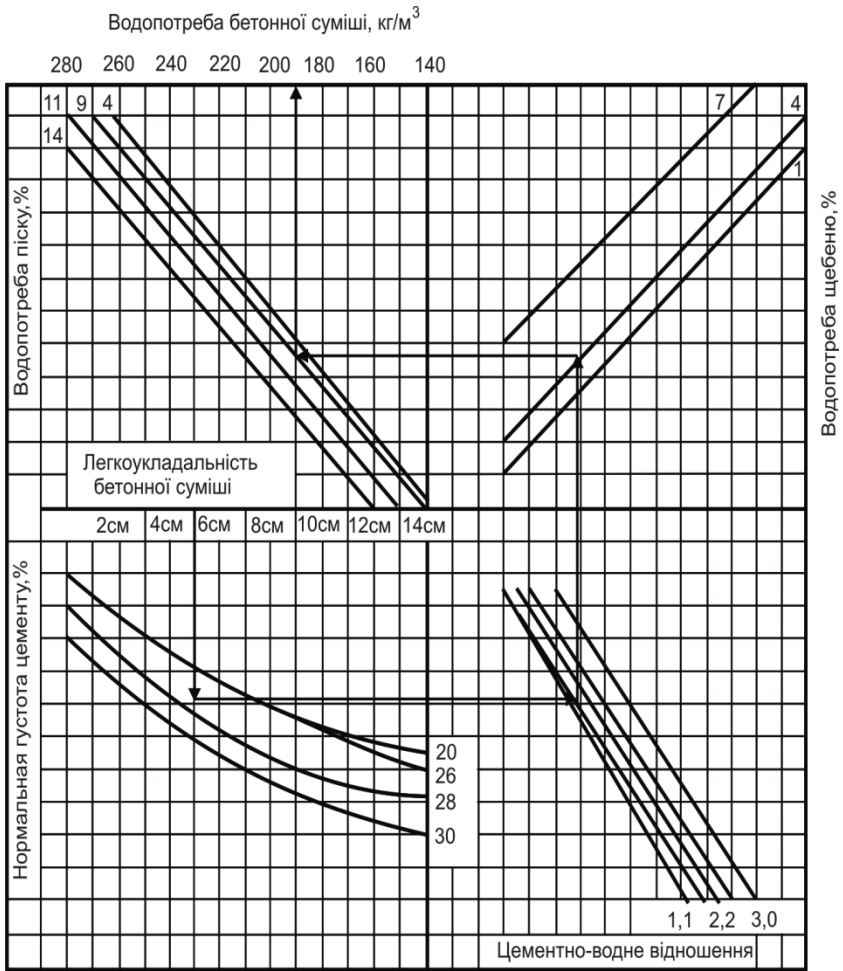


Рис. 3. Номограма визначення водопотреби бетонної суміші

Таблиця 3

Розрахункові склади бетону

№	Нормовані параметри		Вихідні умови			Витрата компонентів, кг/м ³			
	$\frac{R_{cm}^{28}}{R_{cm}^0}$, МПа	ОК см	$\frac{R_{п, МПа}}{HГ, \%}$	$\frac{B_n, \%}{B_{ш}, \%}$	$\frac{\tau_{т.о., год.}}{T_{із}, ^\circ C}$	$\frac{Ц}{\Delta Ц}$	В	П	Щ
1	$\frac{24}{17}$	3	$\frac{43}{26,8}$	$\frac{9,5}{2}$	$\frac{12}{70}$	304	170	621	1330
2	$\frac{24}{17}$	8	$\frac{43}{26,8}$	$\frac{9,5}{2}$	$\frac{12}{70}$	355	192	597	1251
3	$\frac{24}{17}$	3	$\frac{51}{24,6}$	$\frac{6,5}{2}$	$\frac{18}{80}$	$\frac{224}{26,3}$	150	751	1323
4	$\frac{24}{17}$	8	$\frac{51}{24,6}$	$\frac{6,5}{2}$	$\frac{18}{80}$	$\frac{276}{22,2}$	167	707	1278
5	$\frac{24}{21}$	3	$\frac{43}{26,8}$	$\frac{9,5}{2}$	$\frac{12}{70}$	365	178	572	1305
6	$\frac{24}{21}$	8	$\frac{43}{26,8}$	$\frac{9,5}{2}$	$\frac{12}{70}$	417	194	559	1233
7	$\frac{24}{21}$	3	$\frac{51}{24,6}$	$\frac{6,5}{2}$	$\frac{18}{80}$	$\frac{249}{31,8}$	148	750	1309
8	$\frac{24}{21}$	8	$\frac{51}{24,6}$	$\frac{6,5}{2}$	$\frac{18}{80}$	$\frac{290}{30,5}$	165	711	1267

Приклад 2. *Запроектувати склад литого шлаковміщуючого бетону класів В10...В30 прискореного твердіння при забезпеченні максимального значення коефіцієнта ефективності цементу (R_6/C).*

Для розв'язання цієї задачі був отриманий комплекс математичних моделей властивостей литого шлаковміщуючого бетону (табл. 4, 5).

При розрахунку складу литого шлаковміщуючого бетону спочатку розраховується цементно-водне відношення з умови забезпечення проектної (u_3) і відпускнуї (u_2) міцності бетону (рис. 4).

Значення частки щебеню і шлаку розраховують за формулами, отриманими спільним розв'язанням моделей u_4 , u_5 за умови забезпечення максимального значення коефіцієнта

ефективності цементу залежно від значення відпускнуї міцності бетону ($\partial y / \partial x_1 = 0$; $\partial y / \partial x_2 = 0$).

при 70 і 100% відпускнуї міцності :

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,456 - 0,036x_3 + 0,027x_4 - 0,082x_5 + 0,05x_6; \\ x_2 &= 0,006 + 0,028x_3 + 0,024x_4 + 0,048x_5 + 0,027x_6; \end{aligned} \quad (4)$$

при 50% відпускнуї міцності:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,470 - 0,081x_3 - 0,020x_4 - 0,105x_5 + 0,154x_6; \\ x_2 &= 0,088 - 0,015x_3 - 0,035x_4 - 0,011x_5 + 0,144x_6. \end{aligned} \quad (4)$$

Таблиця 4

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Частка щебеню у суміші заповнювачів $r_{щ}$	x_1	0	0,33	0,66	0,33
Частка шлаку у дрібному заповнювачі $r_{ш}$	x_2	0	0,5	1,0	0,5
Водопотреба щебеню, %	x_3	1,5	2,5	3,5	1,0
Водопотреба шлаку, %	x_4	7,0	9,0	11,0	2,0
Водопотреба піску, %	x_5	5,0	10,0	15,0	5,0
Цементно-водне відношення	x_6	1,3	1,9	2,5	0,6

Витрата води для досягнення литої суміші знаходиться за моделлю y_1 або з номограми (рис. 5), побудованої в результаті обробки результатів розрахунку за цією моделлю.

Визначення витрати піску, щебеню та шлаку здійснюється в такій послідовності:

$$r_{щ} = r'_{щ} \cdot r; \quad r_{п} = r - r_{щ}; \quad (5)$$

$$\text{де } r = 1 - r_{щ}; \quad (6)$$

$$Щ = r_{щ} \cdot K; \quad Ш = r_{ш} \cdot K; \quad П = r_{п} \cdot K; \quad (7)$$

$$\text{де } K = (1000 - Ц/\rho_{ц} - В/\rho_{в}) / (r_{щ}/\rho_{щ} + r_{ш}/\rho_{ш} + r_{п}/\rho_{п}) \quad (8)$$

Наприклад, необхідно визначити склад литого шлаковміщуючого бетону класу В22,5 ($R_b = 25,0$ МПа) з відпускнуї міцністю 50 % при використанні портландцементу

марки 400 ($\rho_{ц} = 3,1$ кг/л, $НГ = 27\%$), кварцового піску ($V_{п} = 10$ %, $\rho_{п} = 2,69$ кг/л), гранітного щебеню ($V_{щ} = 2,5$ %, $\rho_{щ} = 2,61$ кг/л), паливного шлаку ($V_{ш} = 9\%$, $\rho_{ш} = 2,45$ кг/л), суперпластифікатора С-3 у кількості 0,7 % від маси цементу.

Таблиця 5

Властивості литого шлаковміщуючого бетону

Властивості	Вид рівняння
Водопотреба бетонної суміші, кг/м ³	$y_1 = 208,6 - 7,7x_1 - 3,4x_2 - 5,5x_3 + 8,4x_4 + 2,5x_5 + 10,0x_6 + 17,0x_1^2 + 26,5x_2^2 + 1,5x_3^2 - 1,0x_4^2 + 12,1x_1x_2 + 5,6x_1x_3 - 5,1x_1x_5 + 8,5x_2x_4 - 10x_2x_5$
Міцність бетону при стиску через 4 год. після ТВО, МПа	$y_2 = 18,9 + 2,1x_1 + 1,0x_2 + 0,4x_3 + 0,5x_4 + 0,5x_5 + 8,9x_6 - 0,8x_1^2 - 2,0x_2^2 + 0,3x_3^2 - 0,7x_4^2 + 1,1x_5^2 + 1,5x_6^2 - 1,3x_1x_3 - 0,3x_1x_5 + 0,7x_1x_6 - 0,3x_2x_3 + 0,3x_2x_4 - 0,2x_2x_5 + 0,7x_2x_6 - 0,9x_3x_4 - 0,3x_3x_5 - 0,8x_4x_5$
Міцність бетону при стиску через 28 доби після ТВО, МПа	$y_3 = 30,9 + 2,6x_1 + 2,5x_2 + 1,3x_3 + 1,8x_4 + 1,8x_5 + 13x_6 + 0,4x_1^2 - 1,5x_2^2 + 1,3x_3^2 - 1,0x_4^2 + 0,9x_5^2 - 0,8x_6^2 - 1,4x_1x_2 - 0,6x_1x_3 - 0,8x_1x_4 - 0,8x_1x_5 + 2,0x_1x_6 + 1,1x_2x_3 - 1,3x_2x_5 + 2,4x_2x_6 - 0,3x_3x_4 - 0,4x_3x_5 - 0,3x_4x_5$
Коефіцієнт ефективності цементу для бетону через 4 год. після ТВО	$y_4 = 0,415 + 0,065x_1 + 0,016x_2 + 0,005x_3 + 0,069x_4 - 0,071x_1^2 - 0,080x_2^2 + 0,009x_3^2 - 0,010x_4^2 + 0,02x_5^2 - 0,009x_6^2 - 0,033x_1x_2 - 0,02x_1x_3 - 0,010x_1x_5 + 0,008x_1x_6 + 0,009x_2x_3 + 0,005x_2x_5 + 0,006x_2x_6 - 0,010x_3x_4 - 0,015x_3x_5 - 0,007x_3x_6 - 0,010x_4x_5 - 0,008x_4x_6 - 0,005x_5x_6$
Коефіцієнт ефективності цементу для бетону через 28 доби після ТВО	$y_5 = 0,772 + 0,082x_1 - 0,015x_2 + 0,008x_3 + 0,006x_5 + 0,095x_6 - 0,028x_1^2 - 0,118x_2^2 - 0,021x_3^2 + 0,026x_4^2 - 0,043x_5^2 - 0,003x_6^2 - 0,050x_1x_2 + 0,013x_1x_4 - 0,021x_1x_5 - 0,005x_2x_5 + 0,009x_2x_6 + 0,010x_3x_4 - 0,015x_3x_5 - 0,021x_3x_6 + 0,008x_4x_5 - 0,009x_4x_6 - 0,029x_5x_6$

За рис. 4 встановлюємо необхідне Ц/В = 1,72. За формулою (5) визначаємо оптимальну частку щебеню у суміші заповнювачів і частку шлаку в дрібному заповнювачі:

$$x_1 = 0,470 - 0,081 \cdot 0 - 0,020 \cdot 0 - 0,015 \cdot 0 + 0,154 \cdot (-0,33) = 0,419;$$

$$x_2 = 0,088 - 0,015 \cdot 0 - 0,035 \cdot 0 - 0,011 \cdot 0 + 0,144 \cdot (-0,33) = 0,040.$$

У натуральних одиницях:

$$r_{\text{ш}} = 0,33 \cdot 0,419 + 0,33 = 0,47; \quad r_{\text{п}} = 0,5 \cdot 0,040 + 0,5 = 0,52.$$

Визначаємо витрату води за рис. 5: $V = 208 \text{ кг/м}^3$

Витрата цементу складе: $\text{Ц} = 208 \cdot 1,72 = 358 \text{ кг/м}^3$.

Витрата добавки С-3: $\text{Д} = 358 \cdot 0,007 = 2,51 \text{ кг/м}^3$

Знаходимо розрахункові значення оптимальної частки шлаку $r_{\text{ш}}$ і піску $r_{\text{п}}$ у суміші заповнювачів за формулами (5, 6):

$$r = 1 - 0,47 = 0,53; \quad r_{\text{ш}} = 0,53 \cdot 0,52 = 0,28; \quad r_{\text{п}} = 0,53 - 0,28 = 0,25.$$

За формулами (7, 8) визначаємо витрату щебеню, шлаку і піску:

$$K = (1000 - 358/3,1 - 208/1) / (0,47/2,61 + 0,25/2,69 + 0,28/2,45) = 1746;$$

$$\text{Щ} = 1746 \cdot 0,47 = 820 \text{ кг/м}^3;$$

$$\text{Ш} = 1746 \cdot 0,28 = 489 \text{ кг/м}^3;$$

$$\text{П} = 1746 \cdot 0,25 = 436 \text{ кг/м}^3.$$

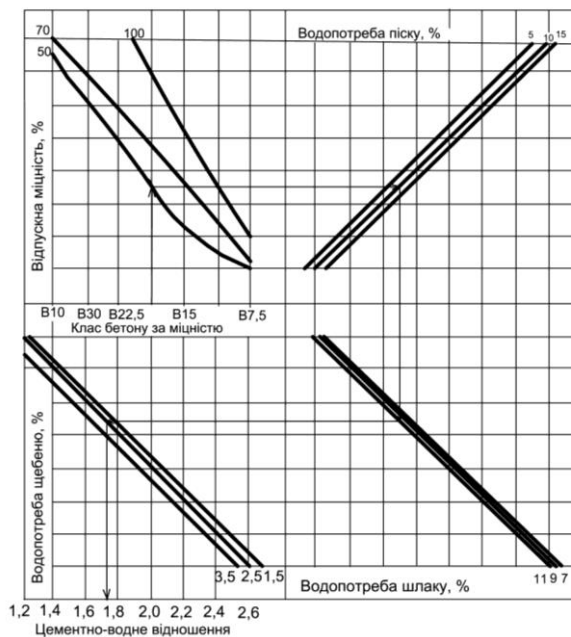


Рис. 4. Номограма визначення цементно-водного відношення

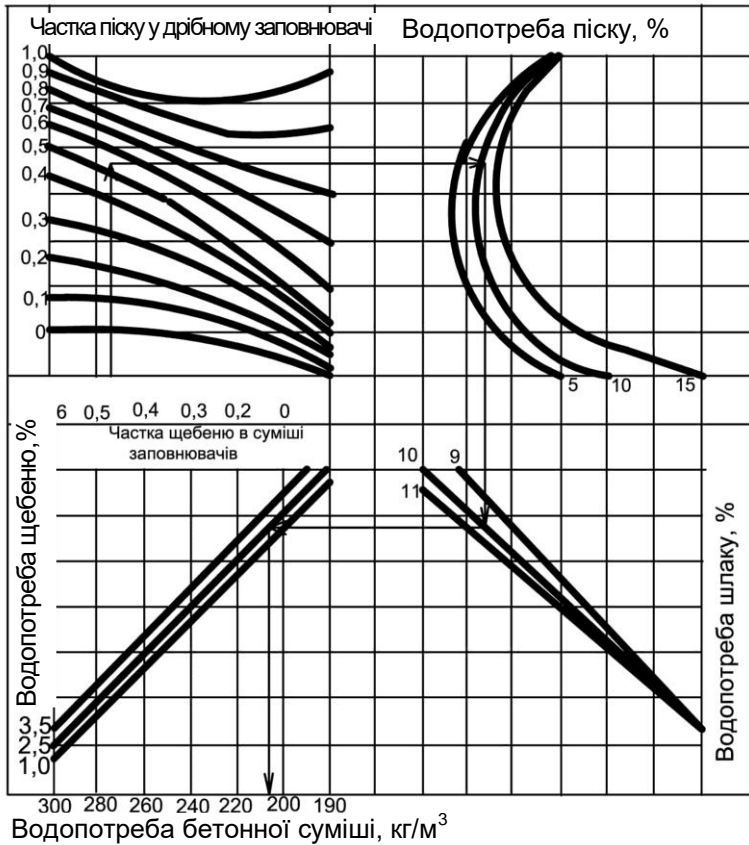


Рис. 5. Номограма визначення водопотреби бетонної суміші

2.2. Гідротехнічні бетони

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.

Вимоги до гідротехнічного бетону пред'являються диференційовано з врахуванням його зонального розподілу в конструкціях (табл. 6).

Таблиця 6

Вимоги до гідротехнічного бетону по зонах

Вимоги до бетону	Масивні споруди						Немасивні споруди		
	Зовнішня зона			Внутрішня зона					
	Зони відносно рівня води								
	Підводна	Перемінного рівня води	Надводна	Підводна	Перемінного рівня води	Надводна	Підводна	Перемінного рівня води	Надводна
Водостійкість	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Водонепроникність	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Морозостійкість	-	+	+	-	-	-	-	+	+
Низьке тепло-виділення	+	+	+	+	+	+	-	-	-

Примітка. Знак "+" означає, що вимога пред'являється.

Комплекс проектних вимог до гідротехнічних бетонів забезпечується вибором вихідних матеріалів і добавок,

проектуванням складів бетонних сумішей відповідно до умов експлуатації з урахуванням рекомендованих обмежень (табл. 7).

Таблиця 7

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	
	морський	прісній	морський	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	0,55	0,58	0,56	0,58
безнапірна	0,60	0,62	0,62	0,62
Надводна зона, частково омивана водою	0,55	0,60	0,65	0,65

Як і для інших видів важких бетонів для гідротехнічних бетонів міцність у проектному віці нормується згідно ДСТУ БВ.2.7-43-96 за класами міцності на стиск, осьовий розтяг і розтяг при згині.

Для бетону конструкцій, що піддаються в процесі експлуатації поперемінному заморожуванню та відтаванню, призначають наступні марки за морозостійкістю (F): 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000. При обмеженні проникності, підвищеній щільності і корозійній стійкості призначають марки за водонепроникністю (W): 2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20.

Крім проектних вимог за міцністю, морозостійкістю і водонепроникністю для гідротехнічного бетону у відповідності до умов роботи та норм проектування можливе пред'явлення ряду додаткових вимог. Проектний вік, у якому повинні бути забезпечені технічні вимоги, вказують у документації на конструкції. Він призначається згідно норм проектування залежно від умов, вимог до бетону, способів зведення та термінів фактичного завантаження

конструкцій. Якщо проектний вік не зазначений, технічні вимоги до бетону повинні бути забезпечені в 28 діб.

Вибір виду і марки (чи класу) *цементу*, його мінералогічного і речовинного складу обумовлені як необхідними міцнісними властивостями бетону і кінетикою наростання міцності в часі, так і рядом інших властивостей, що визначають його довговічність у конструкціях і спорудах при заданих умовах їх експлуатації. Для гідротехнічного бетону масивних споруд поширене застосування помірно- та низькотермічних цементів з нормованим хіміко-мінералогічним складом і підвищеним вмістом активних мінеральних добавок. Для бетону, що працює в умовах поперемінного заморожування і відтавання при впливі мінералізованого водного середовища застосовують сульфатостійкі низькоалюмінатні цементи.

Ефективне застосування пластифікованих і гідрофобних портландцементів з добавками ПАР, що дають можливість покращити весь комплекс будівельно-технічних властивостей бетону, знизити витрату в'язучих, енерго- і трудомісткість бетонних робіт. При необхідності швидкого забезпечення достатньої міцності бетону, особливо при виготовленні збірних залізобетонних елементів застосовують також швидкотверднучі цементи.

Приклад 3. *Запроектувати оптимальні склади гідротехнічного бетону із заданими значеннями міцності, морозостійкості й водонепроникності в умовах нормального твердіння і теплової обробки.*

В якості вихідних матеріалів виступають: середньоалюмінатний портландцемент ($C_3S = 55...59\%$, $C_2S = 16...20\%$, $C_3A = 6...8\%$) із вмістом доменного гранульованого шлаку - 10%; гранітний щебінь фракцій 5...10 мм, 10...20 мм, 20...40 мм і 40...70 мм; кварцовий пісок з модулем крупності 2,1 і водопотребою 7,5%. В якості повітрявтягувальної добавки застосовують добавку СНП.

При пропарюванні зразків температура ізоtermічного витримування становить 80°C. У межах загальної тривалості тепловолгісної обробки (14...18 год.) попереднє витримування – 5 год., при загальній тривалості 10 год. – 3 год. Швидкість підйому температури в камері становить 15°C за годину.

Умови планування експериментів наведені в табл. 8.

Таблиця 8

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Початковий водовміст, 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 добавки СНП, кг/м ³	x ₄	0	0,06	0,12	0,06
Нормальна густина цементу, %	x ₅	24,6	27,2	29,8	2,6
Активність цементу, МПа	x ₆	34,5	41,2	47,9	6,7
Тривалість ТВО, год.	x ₇	10	14	18	4
Умовна легкоукладальність	x ₈	0	1	2	1
Тривалість нормального твердіння, доба	x ₉	lg 28	lg 71	lg 180	lg 2.54
Витрата цементу, кг/м ³	x ₁₀	234	378	522	144

Мінімізація витрати цементу в проектаних складах бетону досягається при оптимальній частці піску в суміші заповнювачів (r), при якій забезпечується мінімальна водопотреба бетонних сумішей. Для знаходження r_{opt} у результаті обробки результатів експериментів, виконаних за планом Na_5 , побудована спеціальна квадратична модель (табл. 9).

Крім того, отримані квадратичні моделі водопотреби бетонної суміші й об'єму емульгованого повітря (табл. 9). При отриманні моделі водопотреби планували (табл. 9) значення умовної легкоукладальності (x_8)(табл. 10).

Таблиця 9

Властивості бетонної суміші

Властивості	Вид рівняння
Об'єм емульгованого повітря, %	$y_1 = 2,27 + 0,72x_1 - 0,63x_{10} - 0,47x_3 + 2,14x_4 - 0,18x_5 - 0,20x_1^2 + 0,24x_{10}^2 + 0,17x_3^2 - 0,22x_4^2 - 0,09x_5^2 - 0,13x_1x_2 + 0,71x_1x_4 - 0,61x_{10}x_4 - 0,46x_3x_4 - 0,13x_3x_5 - 0,19x_4x_5$
Водопотреба суміші, кг/м ³	$y_2 = 169,2 + 26,4x_8 + 13,4x_2 - 20x_3 - 8,3x_4 + 9,3x_5 - 5,2x_8^2 + 5,8x_2^2 + 8,8x_3^2 + 2,8x_4^2 + 3,8x_5^2 + 1,0x_8x_3 + 2,6x_8x_5 - 1,0x_2x_3 + 3,1x_2x_4 + 2,25x_2x_5 - 1,1x_3x_5 + 1,0x_4x_5$
Оптимальна частка піску в суміші заповнювачів	$y_3 = 0,284 + 0,03x_1 - 0,039x_2 - 0,02x_3 + 0,009x_4 + 0,007x_1^2 + 0,016x_2^2 + 0,008x_3^2 + 0,006x_4^2 - 0,005x_1x_2 + 0,01x_1x_3 + 0,009x_2x_4 - 0,004x_3x_4 + 0,007x_4x_5$

Таблиця 10

Планування значень умовної легкоукладальності

Рівень варіювання	-1	-0,4	0	+0,4	+1
Показник легкоукладальності	жорсткість, с		осадка конуса, см		
	20	8	2	5	13

При отриманні моделі об'єму емульгованого повітря замість Ц/В (x_2), варіювали (табл. 8) витрати цементу Ц (x_{10}).

Для бетонів нормального твердіння і пропарених бетонів отримані шестифакторні моделі міцності, морозостійкості й водонепроникності бетону, що враховують вплив легкоукладальності бетонної суміші (x_8), Ц/В (x_2), витрати добавки СНП (x_4), нормальної густоти й активності цементу (x_5 і x_6), а також тривалості нормального (x_9) або прискореного твердіння (x_7).

Таблиця 11

Властивості бетону нормального твердіння

Властивості	Вид рівняння
Міцність при стиску, МПа	$y_4 = 36,93 - 1,88x_8 + 14,73x_2 - 3,62x_4 - 0,86x_5 + 4,97x_6 + 6,08x_9 - 0,05x_8^2 - 1,85x_2^2 - 0,2x_4^2 - 0,3x_5^2 + 0,05x_6^2 - 0,8x_9^2 - 0,61x_8x_4 - 0,45x_8x_5 + 1,23x_8x_6 + 0,97x_2x_4 - 0,63x_2x_5 + 2,12x_2x_6 + 2,14x_2x_9 + 0,99x_4x_6 - 0,46x_5x_6 + 0,88x_6x_7$

Морозостійкість, цикли	$y_5 = 378,9 - 67,8x_8 + 162,3x_2 + 147,7x_4 - 27,4x_5 + 21,8x_6 + 63,2x_9 + 9,7x_8^2 - 38,8x_2^2 + 6,7x_4^2 - 9,8x_5^2 + 11,7x_6^2 + 2,2x_9^2 + 29,4x_8x_2 - 8,7x_8x_5 - 16,6x_8x_9 + 26,6x_2x_4 - 15,8x_2x_5 + 18,7x_2x_9 + 7,1x_4x_6 + 23,7x_4x_9 + 13,8x_6x_9$
Водонепроникність, МПа	$y_6 = 0,92 + 0,04x_8 + 0,56x_2 + 0,02x_4 + 0,01x_5 + 0,06x_6 + 0,25x_9 - 0,05x_8^2 + 0,08x_2^2 - 0,01x_4^2 + 0,004x_5^2 + 0,03x_6^2 - 0,02x_8x_2 + 0,01x_8x_4 - 0,02x_8x_5 + 0,04x_2x_6 + 0,14x_2x_9$

Таблиця 12

Властивості пропареного бетону

Властивості	Вид рівняння
Границя міцності при стиску через 4 год. після ТВО, МПа	$y_7 = 21,98 - 0,93x_8 + 10,5x_2 - 1,03x_4 - 1,61x_5 + 2,32x_6 + 2,65x_7 - 0,49x_8^2 - 0,81x_2^2 - 0,09x_5^2 - 0,06x_6^2 - 0,96x_7^2 - 2,00x_8x_2 - 0,88x_8x_4 - 1,36x_8x_5 - 1,43x_8x_6 + 2,68x_2x_6 + 2,60x_2x_7 - 0,91x_4x_5 - 0,82x_4x_6 - 1,01x_4x_7 + 1,18x_5x_7 + 1,22x_6x_7$
Границя міцності при стиску через 28 доби після ТВО, МПа	$y_8 = 30,6 - 2,24x_8 + 13,03x_2 - 2,86x_4 - 0,99x_5 + 3,97x_6 + 1,94x_7 - 0,05x_8^2 - 1,75x_2^2 - 0,5x_4^2 - 0,35x_5^2 + 0,1x_6^2 - 0,2x_7^2 - 1,29x_8x_2 + 1,18x_2x_4 - 0,63x_2x_5 + 2,71x_2x_6 + 0,97x_2x_7$
Морозостійкість, цикли	$y_9 = 281,9 - 38,3x_8 + 145,4x_2 + 89,2x_4 - 16x_5 + 17,7x_7 + 8,3x_8^2 - 15,7x_2^2 - 12,2x_4^2 - 5,2x_5^2 + 9,3x_6^2 - 2,2x_7^2 - 13,3x_8x_2 + 14,8x_8x_4 + 7,3x_2x_4 + 21,2x_6x_7$
Водонепроникність, МПа	$y_{10} = 0,57 + 0,07x_8 + 0,43x_2 + 0,03x_5 + 0,06x_6 + 0,05x_7 - 0,02x_8^2 + 0,08x_2^2 + 0,02x_4^2 - 0,06x_7^2 + 0,07x_8x_2 + 0,03x_8x_4 - 0,04x_2x_4 + 0,03x_2x_5 + 0,06x_2x_6 - 0,02x_4x_6 - 0,02x_4x_7 + 0,01x_5x_6 + 0,02x_6x_7$

Комплекс поліноміальних моделей дозволяє порівняно просто за допомогою ЕОМ вирішувати задачі оптимізації складів бетону у широкому діапазоні проектних властивостей. Суть методу полягає в тому, що моделі $y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10}$ вирішують відносно Ц/В, фіксуючи інші фактори на необхідних рівнях і задаючись певною міцністю, морозостійкістю й водонепроникністю. Далі підраховують витрату води за рівнянням y_2 й оптимальну частку піску в суміші заповнювачів y_3 , а потім за звичайних формулах – витрату цементу, піску й щебенів на 1 м^3 бетонній суміші.

Розглянемо характерні приклади проектування оптимальних складів бетону, що вирішуються із застосуванням отриманих моделей.

Наприклад необхідно визначити склади гідротехнічного бетону у віці 28 і 180 діб при нормальному твердінні (повітрятягувальні добавки не застосовуються).

На першому етапі встановлюємо значення Ц/В необхідні для досягнення різних марок бетону за міцності на стиск з рівняння u_4 . Визначивши значення x_2 при прийнятих значеннях інших факторів, з рівнянь u_5 і u_6 , знаходимо морозостійкість і водонепроникність бетону, що відповідають маркам бетону за міцністю при стиску. Потім підраховуємо витрату води з рівняння u_2 й оптимальну частку піску в суміші заповнювачів з рівняння u_3 . Витрату цементу, піску та щебеню знаходимо за формулами методу абсолютних об'ємів.

За даними розрахунків, виконаних за допомогою математичних моделей (табл. 8, 11, 12), побудовані номограми (рис. 6, 7), використовуючи які можна визначати витрату води, Ц/В і g при заданих вихідних умовах. При цьому використовується встановлене орієнтовне співвідношення показників властивостей бетону нормального твердіння (табл. 11) і значення поправочних коефіцієнтів для коректування Ц/В для бетону у віці 180 діб (табл. 13).

Таблиця 13

Значення поправочних коефіцієнтів для уточнення Ц/В у віці 180 діб

Марка за міцністю							
150	200	250	300	350	400	450	500
0,96	0,81	0,76	0,73	0,71	0,70	0,68	0,67

Наприклад, якщо для одержання бетону з маркою за міцністю не менше 200, за морозостійкістю F150 і водонепроникності W2 у віці 28 доби використовуються поргланецмент марки 400 ($\rho_{ц} = 3,1$ кг/л, НГ = 27 %), кварцовий пісок ($B_{п} = 11$ %, $\rho_{п} = 2,6$ кг/л); гранітний щебінь фракції 5...20 мм ($B_{щ} = 4$ %; $\rho_{щ} = 2,65$ кг/л) і добавка ЛСТ у кількості 0,25 % від маси цементу, то рухомість бетонної суміші повинна становити 1...4 см.

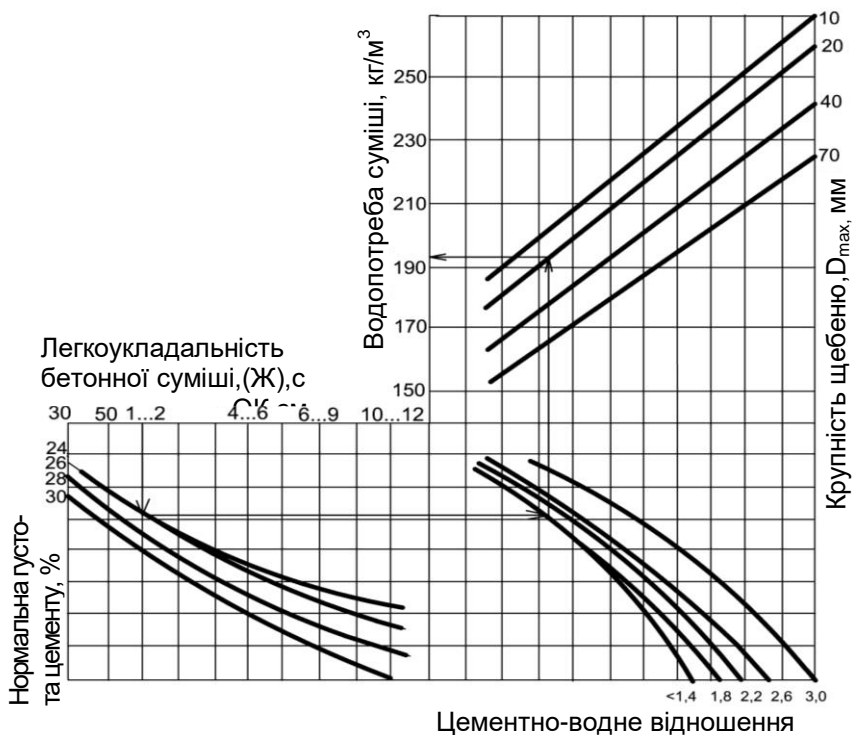


Рис. 6. Номограма визначення водопотреби бетонної суміші

За табл. 14 встановлюємо, що клас бетону за міцністю, що забезпечує необхідну морозостійкість і водонепроникність, повинен становити В25 ($R_b = 30,0$ МПа).

За рис. 3 встановлюємо необхідне цементно-водне відношення: $Ц/В = 1,96$.

Витрата води (рис. 4) складе 190 кг/м^3 , а з урахуванням застосування добавки ЛСТ (табл. 15) $В = 190 \cdot 0,92 = 175 \text{ кг/м}^3$.

Витрата цементу: $Ц = 175 \cdot 1,96 = 343 \text{ кг/м}^3$.

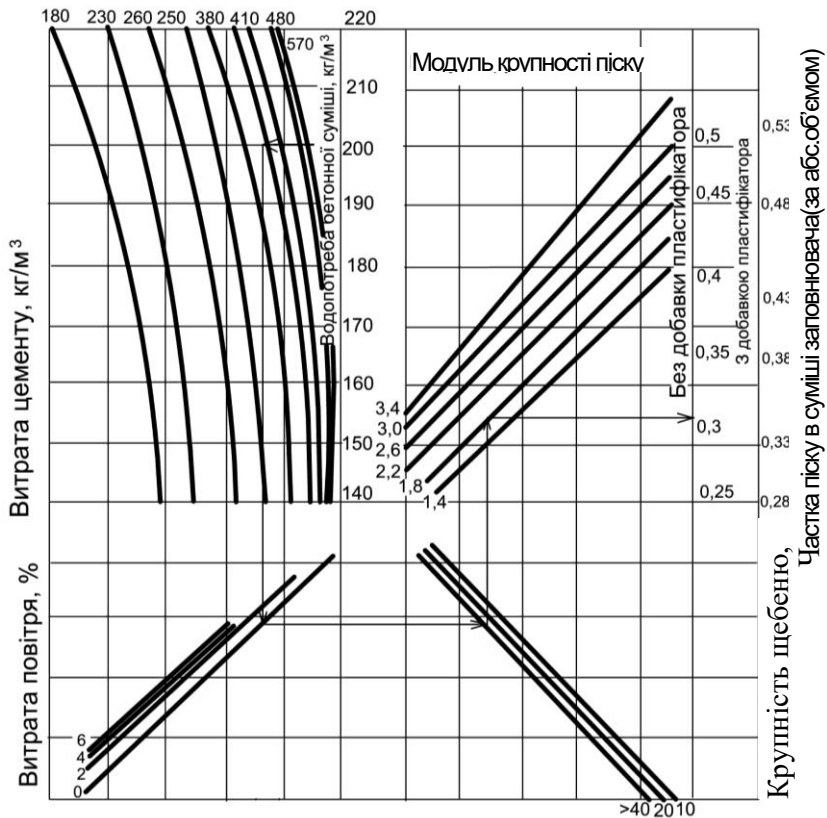


Рис. 7. Номограма визначення частки піску в суміші заповнювачів

Таблиця 14

Орієнтовне співвідношення показників властивостей бетону нормального твердіння без повітрявтягувальних добавок

Рухомість суміші, см	Марки бетону у віці, діб					
	28			180		
	Міцність (М)	Морозостійкість (F)	Водонепроникність (W)	Міцність (М)	Морозостійкість (F)	Водонепроникність (W)
1...4	20	50...75	2	20	50...75	2...4
5...9	20	50...75	2	20	50...75	2...4
10...15	20	50	2	20	50	2...4
1...4	30	100...150	2...4	30	150...200	4...6
5...9	30	100	2...4	30	100...150	4...6
10...15	30	75...100	2...4	30	75...100	4...6
1...4	40	200...250	6...8	40	250	8...10
5...9	40	200...250	6...8	40	200...250	8...10
10...15	40	100...150	6...8	40	150...200	8...10

Оптимальну частку піску в суміші заповнювачів знаходимо за рис. 7: $r = 0,345$.

Таблиця 15

Значення поправочних коефіцієнтів до водовмісту бетонних сумішей при застосування 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 рискою наведені значення при застосуванні добавки ЛСТ у кількості 0,25% від маси цементу, під рискою - суперпластифікатор С-3 у кількості 0,7% від маси цементу.

Витрата піску й щебеню:

$$П = \left[1000 - \left(\frac{343}{3,1} + \frac{175}{1,0} \right) \right] \cdot 0,345 \cdot 2,6 = 641 \text{ кг/м}^3$$

$$Щ = \left[1000 - \left(\frac{343}{3,1} + \frac{175}{1,0} + \frac{641}{2,6} \right) \right] \cdot 2,65 = 1240 \text{ кг/м}^3$$

Якщо ж дані проектні вимоги до бетону необхідно забезпечити у віці 180 доби, то за табл. 12 встановлюємо, що клас за міцністю повинна бути також В25. Установлене значення Ц/В (рис. 8) коректуємо з урахуванням поправочного коефіцієнта (табл. 13):

$$Ц/В = 1,96 \cdot 0,73 = 1,43.$$

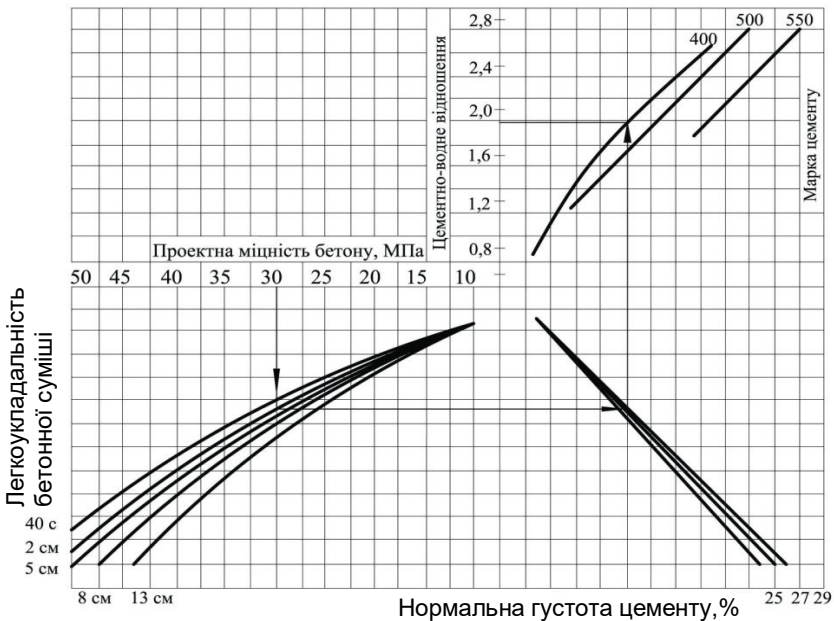


Рис. 8. Номограма визначення цементно-водного відношенням для бетону нормального твердіння

Витрата води складе 190 кг/м^3 (рис. 7) і з урахуванням застосування добавки ЛСТ (див. табл. 3) $V = 190 \cdot 0,92 = 175 \text{ кг/м}^3$.

Витрата цементу: $C = 175 \cdot 1,43 = 250 \text{ кг/м}^3$.

Оптимальну частку піску в суміші заповнювачів знаходимо за рис. 7:

$$r = 0,38.$$

Витрата піску й щебеню:

$$П = \left[1000 - \left(\frac{250}{3,1} + \frac{175}{1,0} \right) \right] \cdot 0,38 \cdot 2,6 = 735 \text{ кг/м}^3$$

$$Щ = \left[1000 - \left(\frac{250}{3,1} + \frac{175}{1,0} + \frac{735}{2,6} \right) \right] \cdot 2,65 = 1223 \text{ кг/м}^3$$

Комплекс математичних моделей (табл. 12) дозволяє розв'язати ці задачі, задаючись будь-яким рівнем відпускної міцності, змінюючи в широкому діапазоні загальну тривалість процесу теплової обробки, легкоукладальність сумішей, активність і нормальну густоту цементу.

Наприклад, необхідно запроектувати склади гідротехнічного бетону споруд, що піддається тепловологісній обробці, при різних значеннях відпускної міцності (повітрявтягувальні добавки не застосовуються).

Алгоритм розв'язання даної задачі відрізняється від попередніх лише тим, що відносно C/V розв'язується модель не тільки проектної u_8 , але й відпускної міцності u_7 . Для визначення витрати цементу вибирається більше із двох знайдених значень цементно-водного відношення. На рис. 2 представлена номограма для пошуку C/V , яке забезпечує проектну міцність і легкоукладальність бетону при заданому рівні відпускної міцності. Орієнтовне співвідношення показників властивостей пропареного бетону наведено в табл. 16.

Наприклад, для бетону класу В15 з вимогою за міцністю при стиску 20,0 МПа і морозостійкістю F150, що піддається тепловологісній обробці протягом 18 год., відпускна міцність повинна становити 70 % від проектної, рухомість бетонної суміші - 1...4 см.

Застосовуються портландцемент з мінеральними добавками марки 400 ($\text{НГ} = 27\%$, $\rho_{\text{ц}} = 3,1 \text{ кг/л}$), кварцовий пісок з модулем крупності $M_{\text{кр}} = 2,3$ ($\rho_{\text{п}} = 2,6 \text{ кг/л}$), гранітний щебінь фракцій 5...20 мм ($\rho_{\text{щ}} = 2,65 \text{ кг/л}$).

Таблиця 16

Орієнтовне співвідношення показників властивостей бетону, підданого тепловій обробці, без повітрявтягувальних добавок (тривалість ТВО = 14...18 год.)

Міцність бетону при стиску в 28-добовому віці, МПа	Відпускна міцність, %	Морозостійкість, цикли	Водонепроникність, МПа
15,0	70	до 50	0,2
	100	50...100	0,2
20,0	50	0...50	0,2
	70	50.....100	0,2...0,4
	100	100... 150	0,4...0,6
25,0	50	50... 100	0,2...0,4
	70	100... 150	0,4...0,6
	100	200...250	0,6
30,0	50	75... 100	0,2...0,4
	70	150... 200	0,4...0,6
	100	200... 250	0,6...0,8
35,0	50	100... 200 150...	0,4...0,6
	70	250 200... 300	0,6...0,8
	100		0,8...1,0
40,0	50	150...250	0,6...0,8
	70	200...300	0,8...1,0
	100	300	1,0...1,2

Примітка. Мінімальні значення морозостійкості й водонепроникності наведені для рухомих сумішей (10...15 см), а максимальні - для малорухомих (1...4 см).

За табл. 16. встановлюємо, що для забезпечення необхідної морозостійкості F150 марка бетону за міцністю при стиску повинна бути 25 МПа. За рис. 2 встановлюємо, що необхідне Ц/В = 1,7. Витрата води (рис. 6) складе 180 кг/м³. Необхідна витрата цементу:

$$\text{Ц} = 180 \cdot 1,7 = 305 \text{ кг/м}^3$$

Оптимальну частку піску в суміші заповнювачів знаходимо за рис. 7: $r = 0,38$.

Витрата піску й щебеню складе:

$$П = \left[1000 - \left(\frac{305}{3,1} + \frac{180}{1} \right) \right] \cdot 0,38 \cdot 2,6 = 713 \text{ кг/м}^3$$

$$Щ = \left[1000 - \left(\frac{305}{3,1} + \frac{180}{1} + \frac{713}{2,6} \right) \right] \cdot 2,65 = 1190 \text{ кг/м}^3$$

Отримані поліноміальні моделі дозволяють розрахувати склади гідротехнічного бетону при введенні повітрявтягувальних добавок.

Наприклад, необхідно запроєктувати склади бетону при введенні повітрявтягувальної добавки СНП (смола нейтралізована повітрявтягувальна).

Алгоритм розв'язання задачі припускає на першому етапі визначення такого вмісту повітрявтягувальної добавки, при якому властивості бетону забезпечувалися б при мінімально можливому Ц/В. Для цього при фіксуванні інших факторів послідовно змінюється вміст добавки; ЕОМ видає на друк Ц/В для кожного набору вихідних параметрів, а потім послідовно – витрату води, цементу, оптимальний об'єм емульгованого повітря, витрату піску й щебеню.

На рис. 9, 10 представлені номограми, за якими можна проводити розрахунки Ц/В і кількості повітрявтягувальної добавки для забезпечення заданого комплексу властивостей, а в табл. 17 наведений оптимальний вміст емульгованого повітря і значення поправочних коефіцієнтів для уточнення Ц/В бетону нормального твердіння у віці 180 діб (табл. 18). Витрату води, встановлену за рис. 9, уточнюють із урахуванням об'єму втягнутого повітря.

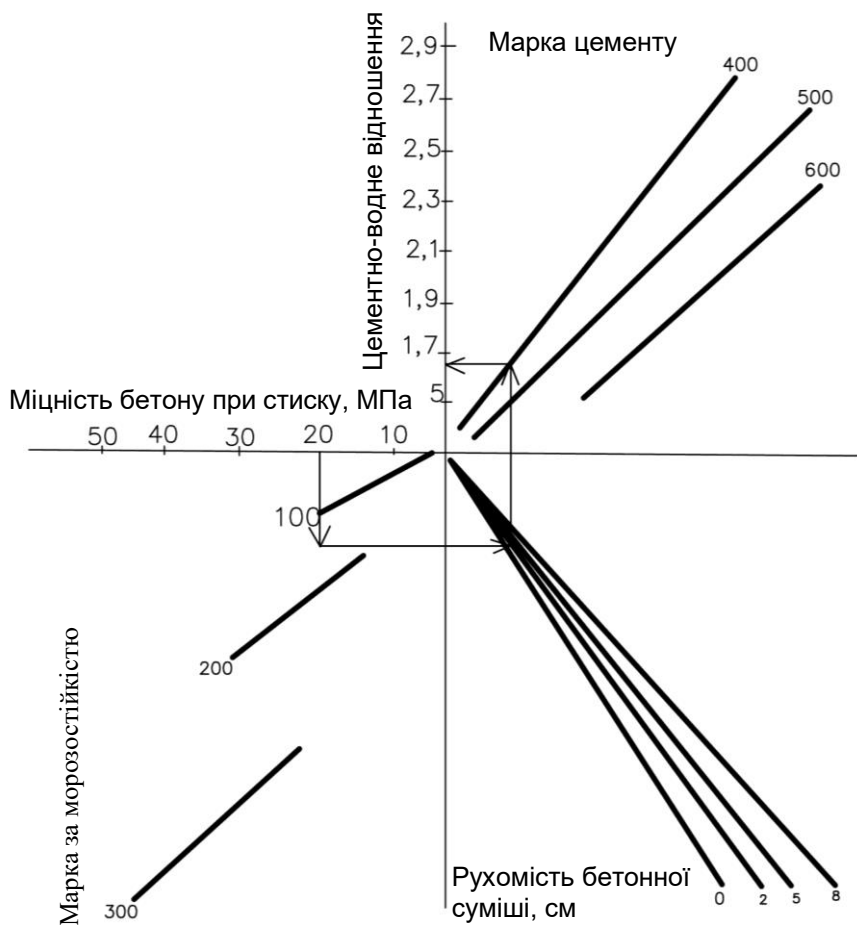


Рис. 9. Номограма визначення Ц/В для бетонів при оптимальному вмісті емульсованого повітря

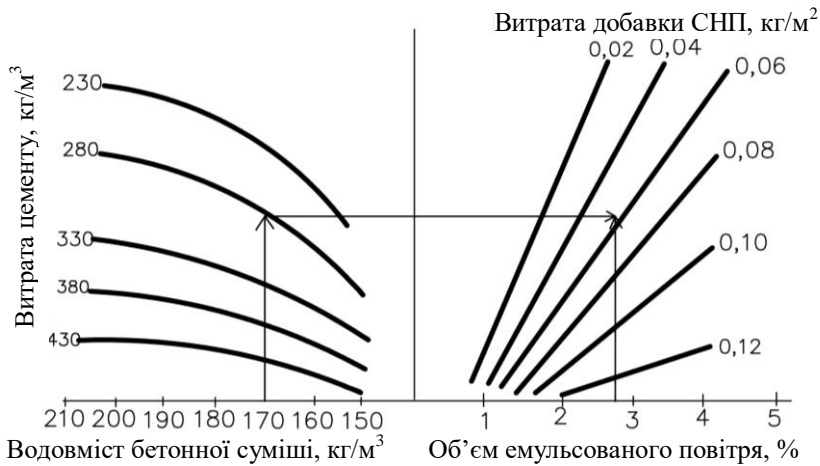


Рис. 10. Номограма визначення витрати добавки СНП

Таблиця 17

Орієнтовний вміст емульгованого повітря для бетону з різними проектними вимогами

Властивості бетону			Необхідний об'єм емульгованого повітря, %
Міцність при стиску у віці 28 доби, МПа	Морозостійкість, цикли	Водонепроникність, МПа	
20,0	100	0,4	1,5...2,0
	150	0,4...0,6	2,5...3,0
	200	0,4...0,6	3,0...3,5
	300	0,4...0,6	3,5...4,0
30,0	200	0,6	1,5...2,0
	300	0,6...0,8	2,5...3,0
	400	0,6...0,8	3,5...4,0
40,0	300	0,8...1,0	3,0...3,5
	400	0,8...1,0	3,5...4,0
	500	1,0...1,2	4,5...5,0

Примітка. Мінімальні значення об'єму емульгованого повітря наведені для малорухомих сумішей (1...4 см), максимальні - для рухомих сумішей (10...15 см).

Таблиця 18

Значення поправочних коефіцієнтів для уточнення цементно-водного відношення бетонів нормального твердіння у віці 180 діб (при застосуванні провітрявляювальних добавок)

Марка бетону за міцністю	Марка бетону за морозостійкістю	Поправочний коефіцієнт
100	100	0,87
100	200	0,77
150	100	0,80
150	200	0,77
200	100	0,81
200	200... 300	0,77
250	200	0,76
250	300... 400	0,74
300	200	0,76
300	300	0,73
300	400	0,75
350	300... 500	0,72
400	400... 500	0,70
450	500... 600	0,67
500	500... 600	0,67

За табл. 17 встановлюємо, що необхідний об'єм емульгованого повітря для заданих проектних вимог до бетону становить 2,5 %. Необхідне Ц/В для забезпечення міцності при стиску 20,0 МПа за рис. 2 становить 1,5. Значення Ц/В при оптимальному вмісті повітря для заданих проектних властивостей за рис. 6 становить 1,65. Для подальших розрахунків приймаємо Ц/В = 1,65.

Витрату води, встановлену за рис. 6, уточнюємо з урахуванням об'єму втягнутого повітря:

$$V = 180 - (4 \cdot 2,5) = 170 \text{ л/м}^3.$$

Необхідна витрата цементу:

$$Ц = 170 \cdot 1,65 = 280 \text{ кг/м}^3.$$

Оптимальну частку піску в суміші заповнювачів встановлюємо за рис. 7:

$$r = 0,36.$$

Витрату піску й щебеню визначаємо з урахуванням об'єму емульгованого повітря:

$$Щ = \left[1000 - \left(\frac{280}{3,1} + \frac{170}{1} + 25 + \frac{680}{2,6} \right) \right] \cdot 2,65 = 1200 \text{ кг/м}^3$$

$$П = \left[1000 - \left(\frac{280}{3,1} + \frac{170}{1} + 25 \right) \right] \cdot 0,36 \cdot 2,6 = 680 \text{ кг/м}^3$$

2.3. Фібробетони

При проектуванні складів фібробетону необхідно враховувати наведені нижче закономірності.

1. Властивості фібробетону визначаються видом і якістю застосовуваних волокон і бетону, їх кількісним співвідношенням і також залежать від стану контактів на межі поділу фаз.

2. Вид волокон, їх відносна довжина (l/d) і процентний вміст у суміші повинні призначатися, виходячи з вимог до виробів і конструкціям з урахуванням прийнятої технології. Відхилення від оптимальних значень зазначених параметрів у більшу або меншу сторону знижує ефективність дисперсного армування.

При оптимальних параметрах армування введення волокон сприяє поліпшенню структури й властивостей вихідного бетону, підвищенню його стійкості й довговічності.

В сталеві фібробетоні на відміну від звичайного бетону, основним фактором, що відповідає за властивості одержуваного композита є вміст дисперсної арматури в об'ємі матеріалу. Найменше значення відсотка армування при і найбільше значення діаметра рекомендується вибирати відповідно до мінімальної середньої відстані між центрами фібр, при якій останні ефективно вступають у роботу. Найменші значення довжини фібр визначається мінімальною необхідною довжиною анкеровки. Максимальні значення відсотка армування й довжини фібр і мінімальне значення діаметра визначаються заданими фізико-механічними показниками матеріалу та обмежуються

можливостями технології приготування сталевібробетону. Введення фібрової арматури у суміш знижує її легкоукладальність, тим суттєвіше, чим більший відсоток армування й довжина фібр і менший діаметр. При досягненні певного ступеня насичення настає такий момент, коли фібри починають комкуватися, утворюючи так звані “їжаки”.

Приклад 4. Розрахувати склад сталевібробетона. Використовується хвиляста фібра $\Phi 1$ з довжиною волокон 60 мм, діаметром 1 мм, опором розриву 1335 МПа, портландцемент ПЦІ М500. Крупний заповнювач – гранітний щебінь 5...20 мм, дрібний заповнювач – кварцовий пісок з $M_k = 1.9$.

Був реалізований трирівневий трьохфакторний близький до D – оптимального експериментальний план у відповідності до умов планування наведених в табл. 19

Статистичний аналіз отриманих результатів експерименту дозволив розрахувати математичні моделі міцнісних параметрів бетону у віці 3, 7 та 28 діб (табл. 20) .

Таблиця 19

Умови планування експериментів при визначенні параметрів складів сталевібробетону

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Витрата цементу, кг/м ³ (Ц)	x ₁	450	500	550	50
Цементно-водне відношення(В/Ц)	x ₂	0,35	0,4	0,45	0,1
Витрата фібри, кг/м ³ (Ф)	x ₃	40	60	80	20

На основі отриманої експериментально-статистичної моделі (табл. 20) побудовано номограму міцності сталевібробетону (рис. 11). Дана номограма в сукупності з комплексом отриманих моделей може бути використана для проектування складів фібробетонів з комплексом заданих властивостей

Таблиця 20

Математичні моделі міцнісних параметрів сталевібробетону

Вихідний параметр		Математичні моделі
Витрата Melflux, %		$y_1=0,21-0,081x_1-0,315x_2+0,099x_3+0,2x_1^2+0,14x_2^2-0,04x_3^2+0,012x_1x_2-0,012x_1x_3-0,034x_2x_3$
Міцність при стиску у віці:	3 доби	$y_2=35,46-0,26x_1-7,7x_2-0,14x_3+4,171x_1^2+1,47x_2^2+0,671x_3^2-8,363x_1x_2-0,388x_1x_3+0,213x_2x_3$
	7 діб	$y_3=46,20-3,9x_1-8,4x_2+0,42x_3+8,618x_1^2+0,418x_2^2-0,682x_3^2-4,850x_1x_2-1,40x_1x_3+0,575x_2x_3$
	28 діб	$y_4=60,6+0,72x_1-16,5x_2-4,8x_3+11,748x_1^2+2,29x_2^2+0,498x_3^2-6,70x_1x_2+1,80x_1x_3-2,70x_2x_3$
Міцність на розтяг при згині у віці:	3 доби	$y_5=2,74+0,1x_1-0,22x_2+0,63x_3+0,171x_1^2-0,129x_2^2-0,279x_3^2-0,625x_1x_2+0,275x_1x_3+0,12x_2x_3$
	7 діб	$y_6=3,27-0,1x_1-0,41x_2+1,15x_3+0,365x_1^2-0,106x_2^2-0,194x_3^2-0,450x_1x_2-0,075x_1x_3-0,225x_2x_3$
	28 діб	$y_7=4,05-0,15x_1-0,44x_2+1,67x_3+0,532x_1^2-0,282x_2^2-0,368x_3^2-0,388x_1x_2-0,087x_1x_3-0,213x_2x_3$

Залежно від конкретних умов визначальними параметрами складу сталевібробетону можуть бути або водоцементне відношення або витрати фібри. При проектуванні складів за табл. 21 визначаємо бажаний діапазон в якому може знаходитись склад фібробетону із заданими значеннями міцності на стиск і розтяг при згині.

Прийнявши певні витрати фібри або значення водоцементного відношення по номограмі наведеній на рис. 11 визначаємо основні параметри складу бетонної суміші, які будуть забезпечувати задану міцність бетону на розтяг при згині.

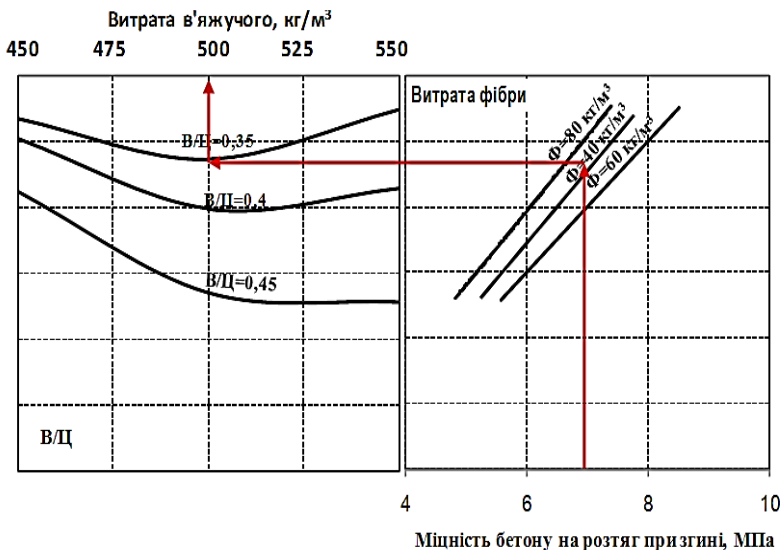


Рис. 11. Номограма міцності сталевібробетону на розтяг при згині у віці 28 дів

Таблиця 21

Орієнтовні значення міцнісних характеристик сталевібробетону у віці 28 дів

Витрата фібри, кг/м ³	B/C	R_{32} , МПа	R_{cm} , МПа
20...40	0,35...0,4	6,02...7,51	65,8...72,2
	0,4...0,45	5,13...6,02	44,6...65,8
40...60	0,35...0,4	7...7,75	60,6...79,3
	0,4...0,45	5,3...7	46,3...60,6
60...80	0,35...0,4	7...7,75	65,8...83,9
	0,4...0,45	5,3...7	48,8...65,8

Переводимо отримані значення параметрів складу бетонної суміші в кодований вигляд використовуючи формули:

$$x_1 = \frac{(C - 500)}{50};$$

$$x_2 = \frac{(B/C - 0,4)}{0,05};$$

$$x_3 = \frac{(\Phi - 60)}{20}.$$

Підставивши отримані значення в рівняння (табл. 20), перевіряємо забезпеченість необхідної міцності бетону при стиску у віці 28 діб.

Розраховуємо при заданому водоцементному відношенні і витраті цементу витрати води за формулою:

$$B = \text{Ц} \cdot V / \text{Ц}.$$

Підставляємо переведені в кодований вигляд значення витрати цементу, фібри та водоцементного відношення в рівняння (табл. 20), і визначаємо витрату суперпластифікатора полікарбоксилатного типу, яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 16-18 см. При необхідності забезпечення іншої рухомості бетонної суміші вміст суперпластифікатора уточнюється експериментально.

Витрати заповнювачів знаходимо за відомими формулами:

$$\text{Щ} = \frac{1000}{\alpha \frac{V_{\text{щ}}^n}{\rho_{\text{щ}}} + \frac{1}{\rho_{\text{щ}}}};$$

$$\text{П} = \left(1000 - \left(\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + B + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} \right) \right) \rho_n.$$

де α – коефіцієнт розсунення зерен, $V_{\text{щ}}^n$ – пористість щебеню, $\rho_{\text{щ}}$ – насипна густина щебеню, $\rho_{\text{ц}}$ – дійсна густина щебеню, ρ_n – дійсна густина піску.

Наприклад, необхідно розрахувати склад високоміцного сталевібробетону з 28-добовою міцністю на стиск 75 МПа та міцністю на розтяг при згині 7 МПа. Насипна густина щебеню $\rho_{\text{щ}} = 1,65 \text{ г/см}^3$, дійсна густина щебеню $\rho_{\text{ц}} = 2,85 \text{ г/см}^3$, дійсна густина піску $\rho_n = 2,65 \text{ г/см}^3$.

1. За табл. 21 визначаємо діапазон $V/\text{Ц}$ та витрати фібри, в якому може знаходитись склад вібробетону із заданими значеннями міцності на стиск і розтяг при згині. В даному випадку – це витрати сталевібробетону 40...60 кг/м³ та водоцементне відношення 0,35...0,4.

2. За номограмою, наведеною на рис. 11, задавшись з позицій економії мінімальною витратою фібри 40 кг/м³, визначаємо необхідну витрату цементу і водоцементне відношення, які б забезпечували виконання поставленої вимоги що до міцності фібробетону на розтяг при згині.

3. Переводимо отримані значення ($C=500$ кг/м³, $B/C=0,35$, $\Phi=40$ кг/м³) в кодовий вигляд:

$$x_1 = \frac{(C - 500)}{50} = \frac{500 - 500}{50} = 0;$$

$$x_2 = \frac{(B/C - 0,4)}{0,05} = \frac{0,35 - 0,4}{0,05};$$

$$x_3 = \frac{(\Phi - 60)}{20} = \frac{40 - 60}{20} = -1.$$

4. Підставляємо отримані значення в рівняння з табл.20 та перевіряємо чи забезпечується необхідна міцність бетону при стиску у віці 28 діб 75 МПа.

$$R_{cm} = 60,6 + 0,72 \cdot 0 - 16,5 \cdot (-1) + 4,8 \cdot (-1) + 11,748 \cdot (0)^2 +$$

$$+ 2,2 \cdot (-1)^2 + 0,4 \cdot (-1)^2 - 6,70 \cdot 0 \cdot (-1) + 1,80 \cdot 0 \cdot (-1) +$$

$$+ 2,70 \cdot (-1) \cdot (-1) = 77,6 \text{ МПа.}$$

Умова виконується $77,6 \geq 75$ МПа.

5. Розраховуємо, при заданому водоцементному відношенні і витраті цементу, витрати води за формулою:

$$B = C \cdot B/C = 500 \cdot 0,35 = 175 \text{ л/м}^3.$$

6. Підставляємо переведені в кодовий вигляд значення витрати цементу ($x_1=0$), фібри ($x_3=-1$) та водоцементного відношення ($x_2=-1$) в рівняння з табл.20, і визначаємо витрату суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux, яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 16-18 см.

$$СП = 0,21 - 0,081 \cdot 0 - 0,315 \cdot (-1) + 0,099 \cdot (-1) + 0,27 \cdot 0^2 +$$

$$+ 0,14 \cdot (-1)^2 + 0,04 \cdot (-1)^2 + 0,012 \cdot 0 \cdot (-1) -$$

$$- 0,012 \cdot 0 \cdot (-1) - 0,034 \cdot (-1) \cdot (-1) = 0,57\% \text{ від маси цементу.}$$

7. При знайдених значеннях витрати цементу та води, за відомими формулами визначаємо витрати заповнювачів.

$$Щ = \frac{1000}{1,5 \frac{0,42}{1,65} + \frac{1}{2,85}} = 1370 \text{ кг/м}^3;$$

$$P = \left(1000 - \left(\frac{500}{3,1} + 175 + \frac{1370}{2,85} \right) \right) 2,65 = 389 \text{ кг/м}^3.$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 500 кг/м³, вода – 175 л/м³, щебінь – 1370 кг/м³, пісок – 389 кг/м³. Витрата суперпластифікатора Melflux складає 0,57% від маси цементу, витрата стальної фібри 40 кг/м³.

3. Реферат для самостійної роботи

Реферат з дисципліни “Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів” є додатковим видом самостійної роботи студента, яка виконується за його бажанням.

Тему реферату студент обирає із запропонованого переліку або формулює сам, попередньо погодивши її з викладачем.

Розкриття теми реферату повинно бути по суті та ґрунтовним, наповнене критичним аналізом стану питання та не повинно містити тривіальної та загальновідомої інформації.

При підготовці реферату необхідно використовувати сучасні інформаційні джерела, зокрема веб-ресурси, посилатися на які потрібно обов'язково.

Бажано використовувати ілюстративний матеріал (схеми, рисунки, діаграми тощо).

Реферат оформлюється у вигляді зброшурованого звіту на стандартних аркушах формату А4 обсягом 15...20 сторінок основного тексту а також переліку використаної літератури та інформаційних джерел. Розкриття теми роботи виконується з однієї сторони аркушів рукописним способом або за допомогою друкарських пристроїв. На титульній сторінці необхідно вказати назву вищого навчального закладу, кафедру, тему реферату, прізвище, ім'я та по батькові студента, посаду, прізвище та ініціали викладача, що перевіряє та зараховує реферат.

Термін здачі реферату – не пізніше, ніж через 1 місяць з моменту призначення та затвердження теми викладачем.

Максимальна кількість балів, якою оцінюється виконання реферату – 10.

Отримана кількість балів повинна узгоджуватись із загальними принципами оцінювання і нарахування балів за весь курс.

У випадках невідповідності змісту реферату його темі, а також очевидного плагіату (повторного використання готових, раніше виконаних робіт, в т.ч. розміщених в Інтернеті), представлений реферат не приймається до захисту, і оцінка за його виконання не ставиться.

Приклади тем рефератів:

1. Роль експериментально-статистичних методів у сучасному бетонознавстві.
2. Математичне планування експериментів при розробці складів бетонів.
3. Оптимізація складів бетонів
4. Застосування факторного аналізу та регресійного аналізу.
5. Програмні засоби для експериментально-статистичного моделювання в бетонознавстві.
6. Вплив мінеральних добавок на властивості бетону: статистичний аналіз .
7. Побудова математичних моделей для прогнозування властивостей.
8. Моделювання процесу твердіння бетону за допомогою статистичних методів.
9. Побудова моделей для прогнозування міцності бетону в різні строки твердіння.
10. Оцінка довговічності бетонних конструкцій на основі статистичних даних..
11. Аналіз факторів, що впливають на довговічність бетону.
12. Статистичний контроль якості бетону на виробництві.
13. Застосування нейронних мереж для прогнозування властивостей бетону.
14. Розробка моделей для прогнозування міцності, деформативності та інших характеристик бетону.
15. Оптимізація складу бетону для конкретних умов експлуатації.
16. Статистичний аналіз даних з довгострокових спостережень за бетонними конструкціями.
17. Вплив умов твердіння на властивості бетону: статистичний аналіз.
18. Застосування методів машинного навчання для оптимізації складів бетонів.
19. татистичний аналіз даних з моніторингу довговічності бетонних споруд.
20. Оцінка невизначеності у результатах експериментальних досліджень бетону.

4. Рекомендована література

1. Дворкін Л. Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів : навчальний посібник. К. : Видавничий дім «Кондор», 2020. 205 с.
2. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2011. 175 с.
3. Будівельне матеріалознавство: задачі та вправи : навч. посіб. / Л. Й. Дворкін, О. М. Бордюженко, В. В. Житковський та ін. ; за ред. д.т.н., проф. Л. Й. Дворкіна. Рівне : НУВГП, 2023. 217 с.
4. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Гарніцький Ю. В. Основні задачі комп'ютерного бетонознавства. Рівне : РДТУ, 1999. 215 с.
5. Ісаханов Г. В., Чорний С. М. Чисельні методи розв'язування задач будівництва. К. : ВШ, 1995. 374 с.
6. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Гарніцький Ю. В. Проектування складів бетону із заданими властивостями. Рівне : РДТУ, 2000. 215 с.
7. Дворкін Л. Й. Теоретичні основи будівельного матеріалознавства : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2022. 799 с.
8. Дворкін Л. Й., Гоц В. І., Дворкіи О. Л. Випрооування і будівельних розчинів. Проектування їх складів. Основа. 2014. 304 с.
9. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers, New York, USA, 2012. p. 172.
10. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Multi-Parametric Concrete Compositions Design. Nova Science Publishers, New York, USA, 2013. p. 223.