

**УДК 666.973.001.2**

**ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДУ ЛЕГКОГО БЕТОНУ З  
ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ "ПРИВЕДЕНОГО Ц/В"**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ЛЕГКОГО БЕТОНА С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА "ПРИВЕДЕННОГО Ц/В"**

**DESIGNING OF LIGHT CONCRETE STRUCTURE BY "EQUIVALENT  
C/W RATIO" METHOD**

**Дворкін Л.Й., д.т.н., проф., Дворкін О.Л., д.т.н., проф., Бордюженко О.М., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)**

**Дворкин Л.И., д.т.н., проф., Дворкин О.Л., д.т.н., проф., Бордюженко О.М., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)**

**Dvorkin L.I., doctor of tech. sc., prof., Dvorkin O.L., doctor of tech. sc., prof., Bordyuzhenko O.M., candidate of tech. sc. (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)**

**Викладено новий підхід до розрахунку складів легких бетонів, що впливає з універсальної фізичної закономірності – залежності міцності твердих матеріалів від їх відносної щільності. Показана можливість використання відповідних рівнянь зв'язку, які включають в себе "приведене цементно-водне відношення" бетону.**

**Изложен новый подход к расчету составов легких бетонов, вытекающий из универсальной физической закономерности – зависимости прочности твердых материалов от их относительной плотности. Показана возможность использования соответствующий уравнений связи, включающих в себя т.н. "приведенное цементно-водное отношение".**

**The new approach to account of light-weight concretes structures implied from general-purpose physical regularity – dependence of solid materials strength on their relative density is stated. The possibility of use applicable of the connection equations including so-called the equivalent cement-to-water ratio is exhibited.**

**Ключові слова:**

**Легкий бетон, розрахунок складу, приведенне цементно-водне відношення.**

Легкий бетон, расчет состава, приведенное цементно-водное отношение.  
Light concrete, calculation of concrete composition, equivalent C/W ratio.

Розрахунок складів легких бетонів на відміну від важких потребує забезпечення поряд із міцністю, також і середньої густини. Для важких бетонів розрахункове визначення складів стало можливим завдяки використанню правила В/Ц, що припускає однозначну залежність міцності бетону від водоцементного відношення.

Залежність міцності бетону від В/Ц, правильно розглядати не як самостійний і основний закон їх міцності, а як наслідок або правило, що випливає з універсальної фізичної закономірності. Ця закономірність полягає в залежності міцності твердих матеріалів від їхньої відносної густини або пористості. Для легких бетонів на пористих заповнювачах правило водоцементного відношення в традиційному формулюванні [1] не є прийнятним, оскільки міцність цього виду бетонів визначається не тільки пористістю і відповідно міцністю цементного каменю, але також міцністю й об'ємною концентрацією пористого заповнювача.

На даний час відома велика кількість розрахункових формул, що описують міцність легких бетонів [2, 3]. Більшість з них ґрунтується на гіпотезі розподілу напружень між компонентами легких бетонів при їхньому руйнуванні. Ці формули з більшою або меншою погрішністю дозволяють прогнозувати міцність при відомих фізико-механічних характеристиках компонентів і складі бетону. Використання їх для проектування складу легких бетонів неможливо або важко, оскільки вони не зв'язані однозначно з тим або іншим визначальним параметром суміші.

Параметром, що однозначно пов'язаний з міцністю, для легких бетонів може бути "приведене Ц/В":

$$Z = \frac{V_{II}}{B + (P_k - W_k^0) \cdot V_k + V_{пов}}, \quad (1)$$

де  $P_k$  і  $W_k^0$  – відповідно пористість та об'ємне водопоглинання пористого заповнювача (керамзиту);  $V_k$  – абсолютний об'єм цементу;  $V_k$  – об'ємний вміст пористого заповнювача в бетонній суміші, л/м<sup>3</sup>;  $V_{пов}$  – об'єм втягнутого і залишкового повітря, л/м<sup>3</sup>.

В параметрі  $Z$  вплив об'єму пор, утворених заповнювачем і втягнутим повітрям "приводиться" до впливу еквівалентної кількості води – основного пороутворюючого фактора в складі бетонної суміші. "Приведене Ц/В" є більш універсальним параметром, ніж Ц/В, яке зазвичай використовується і враховує пори керамзиту та втягнуте повітря. "Приведене Ц/В" трансформується в "звичайне Ц/В" при  $P_k = 0$  і  $V_{пов} = 0$ .

При врахуванні пор заповнювача і втягнутого повітря в бетонній суміші стає можливим покласти фізично обумовлену залежність міцності легких

бетонів від "приведеного Ц/В" в основу розрахунково-експериментального методу проектування їхніх складів.

Врахування пор заповнювача і втягнутого повітря в бетонній суміші дозволяє використовувати фізично обумовлену залежність міцності легких бетонів від "приведеного Ц/В" в основу розрахунково-експериментального методу проектування їх складів.

Обробка довідкових і експериментальних даних (рис.1) показала, що міцність легких бетонів на пористих заповнювачах зв'язана з параметром  $Z$  лінійною залежністю, що підтверджує справедливність правила "приведеного Ц/В":

$$R_d = AR_y Z, \quad (2)$$

де  $A$  – коефіцієнт, що враховує особливості заповнювачів (для керамзитобетону на кварцовому піску  $A \approx 1,7$ );  $R_d$  – активність цементу.

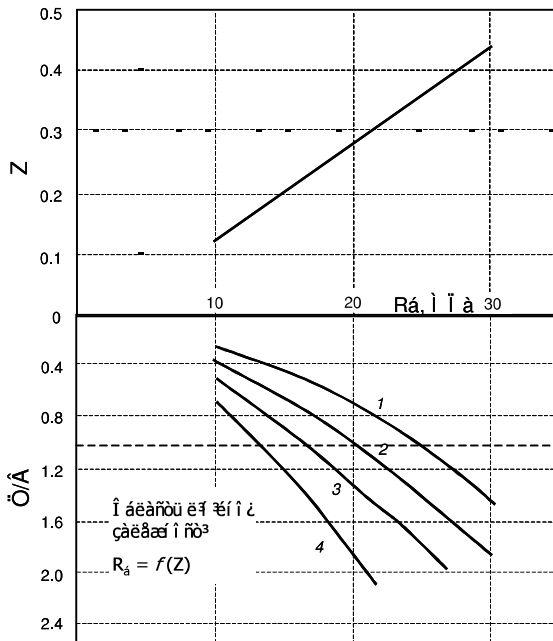


Рис. 1. Залежність міцності конструкційних керамзитобетонів від Ц/В і  $Z$ :

1 – пористість керамзиту 0,4; 2 – 0,5; 3 – 0,6; 4 – 0,7

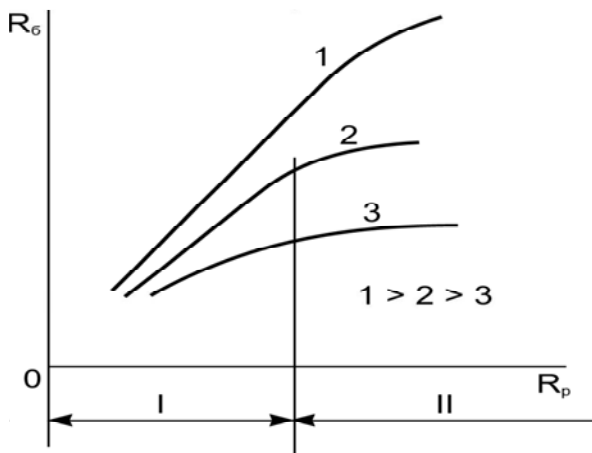


Рис. 2. Залежність міцності керамзитобетону від міцності розчинової частини:

- 1– бетон на гранітному щебені;
- 2–3– бетон на керамзиті різної міцності

Лінійна залежність міцності легких бетонів від приведеного Ц/В зберігається в області т.зв. "ефективних складів", за умов, в яких крупний заповнювач працює разом з розчиновою складовою, тобто в першій фазі кривій  $R_b = f(R_{розч})$  [4]. Як відомо, в другій фазі зі збільшенням міцності розчинової складової ( $R_{розч}$ ) міцність легкого бетону практично не підвищується (рис. 2).

Використання параметра  $Z$  у формулах міцності легких бетонів відкриває можливість розробки досить простих методик розрахунку їхніх складів, заснованих на тих же основних фізичних передумовах, що використовуються в розрахунках складів важких бетонів.

Нижче викладається одна з таких методик, розроблених нами стосовно до конструктивного керамзитобетону. Алгоритм розрахунку наведений на рис. 3. Даний алгоритм включає в себе послідовне визначення водопотреби бетонної суміші ( $V$ , л) для досягнення необхідних значень рухливості ( $OK$ , см) або жорсткості ( $Ж$ , с), знаходження коефіцієнта розсунення зерен ( $K_p$ ) крупного пористого заповнювача цементно-піщаним розчином (табл. 1), розрахунок об'ємної концентрації ( $\phi$ ) і витрати керамзиту ( $K$ ,  $кг/м^3$ ), витрат цементу ( $\Pi$ ,  $кг/м^3$ ) і піску ( $\Pi$ ,  $кг/м^3$ ).

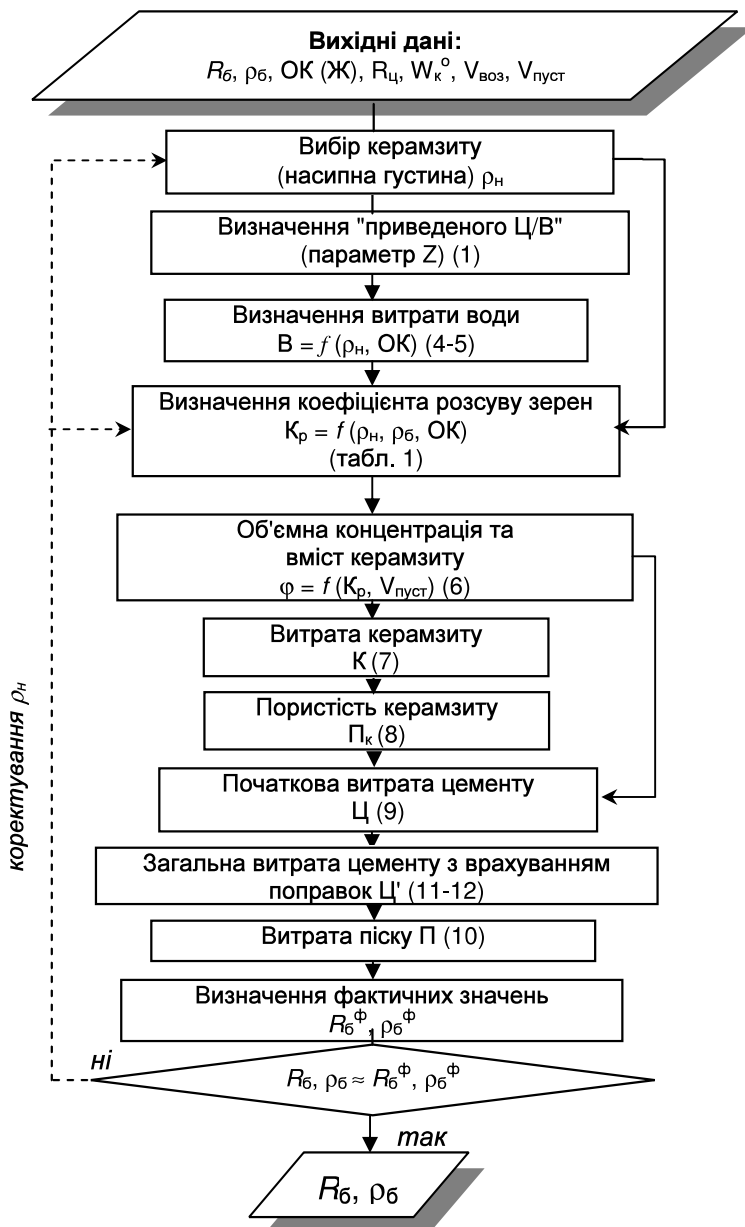


Рис.3. Схема алгоритму розрахунку складу конструкційного керамзитобетону за методом "приведеного Ц/В"

Таблиця 1

Коефіцієнт розсунення зерен керамзиту

Насипна густина керамзиту, кг/м <sup>3</sup>	Густина бетону, кг/м <sup>3</sup>					
	1300	1400	1500	1600	1700	1800
400	1,25	1,33	1,45	-	-	-
500	1,18	1,25	1,36	1,50	-	-
600	1,10	1,19	1,28	1,39	1,54	-
700	-	-	1,20	1,29	1,45	1,59
800	-	-	-	1,21	1,33	1,49
900	-	-	-	-	1,22	1,35

Примітка. Значення  $K_p$  приведені для керамзитобетонних сумішей з ОК=5...9 см. Для сумішей з ОК=10...15 см - значення  $K_p$  збільшуються на 0,05...0,15, з ОК=15...20 см на 0,15...0,2 в залежності від густини бетону. Для жорстких бетонних сумішей  $K_p$  зменшується в залежності від значень жорсткості і густини бетону.

Значення коефіцієнта розсунення, зведені в табл.1, визначені експериментально за результатами підборів складів щільного керамзитобетону з формули:

$$\rho_b = \rho_{злт} \cdot \varphi + (K_p \cdot V_{пуст} - V_{нов}) \cdot \rho_p \quad (3)$$

де  $\rho_b$  - густина бетону, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{злт}$  - густина зерен керамзиту в цементом тесті;  $\varphi$  - об'ємна концентрація керамзиту в бетоні;  $\rho_p$  - густина розчину;  $V_{пуст}$  - міжзернова пористість керамзиту.

Розрахункові залежності для визначення витрат компонентів керамзитобетонної суміші наведені нижче.

$$B_{ок} = 2,33 \cdot ОК - 0,04 \cdot \rho_n + 230. \quad (4)$$

$$B_{жс} = 258 - 21,87 \cdot \ln(\mathcal{J}) - 0,04 \rho_n. \quad (5)$$

$$\varphi = 1 - V_{пуст} \cdot K_p. \quad (6)$$

$$K = 1,89 \varphi \cdot \rho_n. \quad (7)$$

$$П_k = 1 - \frac{1,8 \cdot \rho_n}{\rho}. \quad (8)$$

$$Ц = \frac{R_b (B + П_k V_k - W_k^0 V_k)}{0,32 \cdot 1,7 R_y}. \quad (9)$$

$$П = \rho_b - 1,15 Ц - K. \quad (10)$$

В наведених формулах  $\rho_n$  - насипна густина керамзиту, кг/м<sup>3</sup>;  $B_{ок}$  - водопотреба суміші, кг/м<sup>3</sup> для випадку рухливих сумішей з відповідним значенням ОК;  $B_{жс}$  - водопотреба суміші, кг/м<sup>3</sup> для випадку жорстких сумішей з відповідним значенням Ж;  $\rho$  - істинна густина керамзиту, кг/м<sup>3</sup>.

При одержанні формул (4-10) статистично оброблені відомі довідкові дані [5]. Вони справедливі при приготуванні щільних керамзитобетонних сумішей на пористих заповнювачах крупністю до 20 мм і середньозернистому кварцовому піску. При зменшенні крупності заповнювача до 10 мм розрахунково витрата води збільшують, а при збільшенні до 40 мм зменшують на 10...20 л/м<sup>3</sup>.

Доцільним є введення також інших поправок, зокрема, що враховують активність цементу та легкоукладальність суміші.

Загальна витрата цементу знаходиться за наступним виразом:

$$Ц' = Ц \cdot K_{Ц} \cdot K_{OK(Ж)}, \quad (11)$$

де Ц – початкова витрата цементу, визначена з формули (9), К<sub>ц</sub> – коефіцієнт поправки на активність цементу, при використанні цементу з активністю, відмінною від R<sub>ц</sub> = 40 МПа (для R<sub>ц</sub> = 40 МПа К<sub>ц</sub> = 1):

$$K_{ц} = (0,0173 - 0,0004R_{ц})R_{ц} - 0,004R_{ц} + 1,1545, \quad (12)$$

К<sub>ок(ж)</sub> – коефіцієнти поправок на легкоукладальність суміші:

– для пластичних сумішей:

$$K_{OK} = (0,0164 \cdot OK) + 1,054, \quad (13)$$

– для жорстких сумішей:

$$K_{Ж} = 1,038 - 0,094 \cdot Ж. \quad (14)$$

Приклад розрахунку складу конструкційного керамзитобетону за розглянутою методикою наведено нижче.

**Приклад.** *Запроектувати склад конструкційного керамзитобетону міцністю 25 МПа і густиною 1700 кг/м<sup>3</sup> на керамзитовому ґравії з насипною густиною ρ<sub>н</sub> = 700 кг/м<sup>3</sup> і кварцовому піску. Рухливість суміші ОК = 5 см. Активність цементу R<sub>ц</sub> = 50 МПа. Міжзернова пористість керамзиту V<sub>пуст</sub> = 0,44. Кількість втягнутого повітря в бетоні V<sub>нов</sub> = 2%. Дійсна густина керамзиту: ρ = 2700 кг/м<sup>3</sup>. Об'ємне водопоглинання керамзиту W<sub>к</sub><sup>0</sup> = 20%.*

**Рішення:**

1. Визначаємо необхідне "приведене Ц/В" для забезпечення заданої міцності бетону з формули (1):

$$Z = \frac{25}{1,7 \cdot 50} = 0,294.$$

2. Визначаємо витрату води (ф-ла 4).

При ОК=5 см та ρ<sub>н</sub> = 700 кг/м<sup>3</sup>: B<sub>ок</sub> = 2,33 · 5 – 0,04 · 700 + 230 = 214 л.

3. Знаходимо значення коефіцієнта розсуву K<sub>p</sub>. Для прийнятих значень густин бетону та заповнювача K<sub>p</sub> = 1,45 (табл. 1).

4. Розраховуємо об'ємну концентрацію та об'ємний вміст керамзиту в бетоні використовуючи формулу (6). При міжзерновій пористості керамзиту П<sub>к</sub> = 0,44:

$$\varphi = 1 - 0,44 \cdot 1,45 = 0,362.$$

Тоді об'ємний вміст керамзиту: V<sub>з</sub> = 1000 · 0,362 = 362 л.

5. Знаходимо витрату керамзиту (ф-ла 7):  $K = 1,89 \cdot 0,362 \cdot 700 = 479 \text{ кг}$ .

6. Знаходимо пористість керамзиту (ф-ла 8):

$$P_k = 1 - \frac{1,8 \cdot 700}{2700} = 0,53.$$

7. Визначаємо початкову витрату цементу з рівняння "приведеного Ц/В" (ф-ла 9):  $C = 0,294 \cdot (214 + (0,53 - 0,2) \cdot 362 + 20) \cdot 3,1 = 322 \text{ кг}$ .

8. Розраховуємо поправки на:

- активність цементу, для  $R_y = 50 \text{ МПа}$ ;  $K_y = 0,89$ ;

- для пластичних сумішей (ф-ла 13):

$$K_{ок} = 0,0164 \cdot OK + 1,054 = 0,0164 \cdot 5 + 1,054 = 1,136.$$

9. Загальна витрата цементу, визначена за формулою (11) буде складати:

$$C' = 322 \cdot 0,89 \cdot 1,136 = 326 \text{ кг}.$$

10. Використовуючи формулу (10) знаходимо витрату піску:

$$P = 1700 - 1,15 \cdot 326 - 479 = 846 \text{ кг}.$$

*Розрахунковий склад конструкційного керамзитобетону:*

$$C = 322 \text{ кг/м}^3; B = 214 \text{ кг/м}^3; K = 479 \text{ кг/м}^3; P = 846 \text{ кг/м}^3.$$

В табл. 2 приведені результати розрахунку складу конструкційного керамзитобетону, що наведений в прикладі за методом, запропонованим у Керівництві [6] і розглянутим в даній статті.

Таблиця 2

Результати розрахунку складу конструкційного керамзитобетону

Склади	Витрата матеріалів, кг на 1 м <sup>3</sup> бетону			
	цемент	вода	керамзит	кварцовий пісок
за методом: "приведеного Ц/В"	322	214	479	846
довідковими даними [5]	340	210	462	847

Результати розрахунку за традиційним табличним методом та методом "приведеного Ц/В" показують досить високу збіжність значень витрат матеріалів.

Запропонована методика досить легко може бути реалізована в комп'ютерних системах проектування складів і керування якістю бетонних сумішей. Необхідно відзначити, що метод "приведеного Ц/В", як і інші, може використовуватися для розрахунку попередніх складів легких бетонів щільної структури, що повинні уточнюватися на дослідних замісах і у виробничих умовах.

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. – Г.: Высш. шк., 1987. – 415 с. 2. Довжик В.Г., Дорф В.А., Петров В.П. Технология высокопрочного керамзитобетона. – Г.: Стройиздат, 1976. – 136 с. 3. Ваганов А.И. Керамзитобетон. – М.: Стройиздат, 1960. – 356 с. 4. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. – С.–Петербург, О.О.О. "Стройбетон", 2006.– 692 с. 5. Справочник по бетонам и растворам / А.П.Чехов, А.М.Сергеев, Г.Д.Дибров. – К.: Строитель, 1983. – 216 с. 6. Руководство по подбору составов конструктивных легких бетонов на пористых заполнителях. – Г.: Стройиздат, 1974.