



Дворкін Л.Й.



Гарніцький Ю.В.



Кочкар'ов Г.В.

**Дворкін Л. Й., доктор техн.наук, професор,  
Гарніцький Ю. В., кандидат техн. наук, доцент,  
Кочкар'ов Г. В., аспірант,  
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне**

## РОЗРАХУНОК СКЛАДУ ПОЛІСТИРОЛБЕТОНУ

У статті запропонований алгоритм проектування складу полістиролбетону із заданими значеннями міцності на стиск та середньої густини. Використання методу «приведеного» цементно-водного відношення дозволило врахувати можливість застосування активних мінеральних добавок для зниження витрати цементу. Наведені приклади розрахунку складу теплоізоляційного та конструктивно-теплоізоляційного полістиролбетону.

Одним із ефективних теплоізоляційних і конструкційно-теплоізоляційних матеріалів, який знаходить певне застосування в будівництві, є полістиролбетон. Тому актуальною є задача розробки методики розрахунку його складу при умові забезпечення заданих значень міцності і середньої густини. Певні спроби розробити таку методику на основі суто емпіричного підходу наведені в роботах В.А. Рахманова [1, 2]

Нашими роботами [3, 4] доведено, що міцність бетону як на щільних, так і на пористих заповнювачах можна описати лінійною залежністю, яка включає «приведене» цементно-водне відношення:

$$f_c = pA_i R_u \left( \frac{C + k_{u,e} D}{B + V_n} + b \right), \quad (1)$$

де  $pA_i$  – мультиплікативний коефіцієнт, який враховує якість вихідних матеріалів, легкоукладальність суміші, вид і концентрацію добавок і ін.;

$R_u$  – активність цементу, МПа;

$C$  – витрата цементу на  $1 \text{ м}^3$  бетону,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$k_{u,e}$  – коефіцієнт цементуючої ефективності або «цементний еквівалент» 1 кг активної мінеральної добавки, якщо вона вводиться в бетон;

$D$  – витрата активної мінеральної добавки,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$B$  – витрати води на  $1 \text{ м}^3$  бетону,  $\text{л}/\text{м}^3$ ;

$V_n$  – об'єм повітря, залученого в бетонну суміш у т.ч. пористими заповнювачами, який «приводиться» до впливу води, що в основній своїй масі утворює капілярні пори цементного каменю, л.

На міцність полістиролбетону великий вплив чинить пористий заповнювач, в якості якого застосовують пінополістирольні гранули. В зернах пінополістирольних гранул міститься майже 98 % повітря, яке умовно можна вважати еквівалентом води, що не приймає участі в утворенні цементного каменю і відповідно знижує міцність бетону. У роботі [5] встановлено, що лінійна залежність (1) справедлива і для полістиролбетону, якщо у величину  $V_n$  включати об'єм повітря, яке защемлене при перемішуванні чи втягнуте завдяки повітровтягувальній добавці, а також об'єм гранул пінополістиролу. З певним наближенням можна припустити, що гранули впливають на міцність аналогічно втягнутому чи защемленому повітрю.

Для розрахунку міцності полістиролбетону можна прийняти

$$V_n = V_{nc} + V_{v,n} + V_{z,n}. \quad (2)$$

де  $V_{nc}$  – об'єм пінополістирольних гранул, л;  $V_{v,n}$  – об'єм повітря, яке вводиться завдяки повітровтягувальній добавці чи технічній піні,  $V_{z,n}$  – об'єм залишкового повітря в бетонній суміші після формування, л.

Якщо значення  $V_{v,n}$  і  $V_{z,n}$  невідомі, виходячи з методу абсолютних об'ємів з достатньою точністю можна вважати, що

$$V_n = V_{nc} + V_{v,n} + V_{z,n} = 1000 - (C/\rho_c + D/\rho_d + P/\rho_p + B), \quad (3)$$

де  $P$  – витрата піску на 1000 літрів полістиролбетонної суміші,  $\rho_c$ ,  $\rho_d$ ,  $\rho_p$  – дійсна густина цементу, активної мінеральної добавки та піску відповідно.

Середню густину легкого бетону можна описати відомою [6] залежністю

$$\rho_o = 1,15C + 3 \quad (4)$$

де  $3$  – сумарна витрата заповнювачів та активних наповнювачів на  $1 \text{ м}^3$  бетону. Виходячи з правил «приведеного»  $C/B$  і абсолютних об'ємів [7] можна запропонувати наступний алгоритм (рис.1) розрахунку полістиролбетону із заданими міцністю та густиною.

**Крок 1.** Визначаємо витрату цементу

Запишемо рівняння густини бетону (4) у вигляді

$$\rho_o = 1,15C + P + D + P_c = 1,15C + C_n C + C_d C + C_{pc} C = C(1,15 + C_n + C_d + C_{pc}), \quad (5)$$

де  $P$  – витрата інертних заповнювачів (піску) на  $1 \text{ м}^3$  бетону;  $C_n = P/C$  – співвідношення «пісок : цемент»;

$C_d = D/C$  – співвідношення «активна мінеральна добавка : цемент»;

$C_{pc} = P_c/C$  – співвідношення «пінополістирольні гранули : цемент».

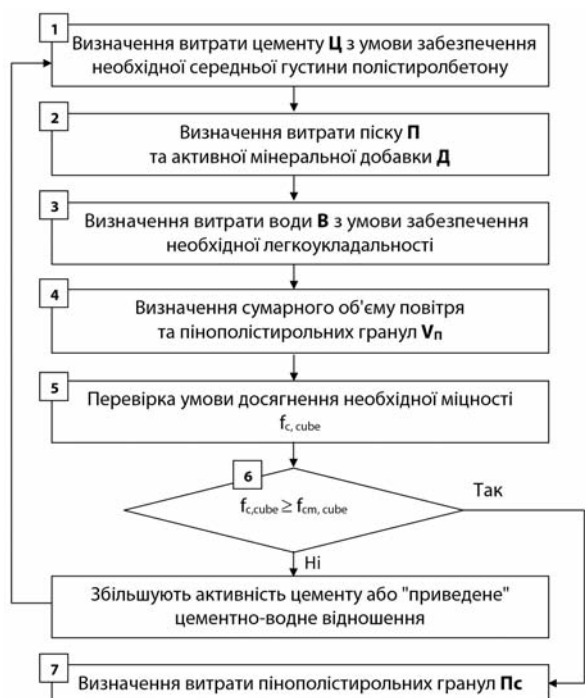


Рис. 1. Алгоритм розрахунку складу полістиролбетону із заданими міцністю і густиною

Оскільки витрата пінополістирольних гранул становить 3...5% від маси цементу, то на стадії розрахунку його складу можна прийняти  $C_{пс} = Пс/Ц \approx 0$ .

Тоді витрата цементу з умови забезпечення необхідної густини:

$$Ц = \frac{\rho_0}{1,15 + C_{п} + C_{д}} \quad (6)$$

В першому наближенні на стадії проектування складу значення  $C_{п}$  для теплоізоляційного бетону можна приймати в межах  $C_{п} = 0,25 \dots 0,5$ , для конструкційно-теплоізоляційного  $C_{п} = 0,5 \dots 1,5$  з врахуванням заданих вимог до полістиролбетону. Коефіцієнт  $C_{д} = 0,25 \dots 0,5$  для молотого доменного шлаку та  $C_{д} = 0,5 \dots 1$  для золи-виносу.

**Крок 2.** Визначаємо витрату піску та активної мінеральної добавки:

$$П = C_{п}Ц, \quad (7)$$

$$Д = C_{д}Ц. \quad (8)$$

**Крок 3.** Призначаємо витрату води для досягнення необхідної текучості полістиролбетонної суміші. При формуванні литтям вона складає 190...210 кг/м<sup>3</sup>. Можливе зменшення вказаного значення при застосуванні добавок пластифікаторів.

**Крок 4.** Визначаємо сумарний об'єм в бетоні пінополістирольних гранул та повітря згідно залежності (3).

**Крок 5.** Перевіряємо можливість досягнення необхідної міцності за залежністю (1).

У формулі (1) коефіцієнти можна приймати  $b = -0,2$ ;  $pA_i = 0,19$  при використанні піску в якості заповнювача і  $pA_i = 0,16$  при відсутності піску (використанні тільки тонкомолотих активних компонентів).

Якщо умова міцності виконується, тобто розраховане значення міцності полістиролбетону не менше нормованого  $f_{с, cube} \geq f_{с, cube, норм.}$ , то переходять до наступного кроку. При суттєвому (більше 20%) перевищенні  $f_{с, cube}$  його нормованого значення  $f_{с, cube, норм.}$  приймають заходи по економії цементу – замінюють його частину на пісок чи активну мінеральну добавку, збільшивши коефіцієнти  $C_{п}$  і  $C_{д}$  у рівнянні (6).

У разі невиконання умови міцності (1) слід використати цемент з вищою активністю або збільшити значення «приведеного» цементно-водного відношення, застосувавши один із наступних прийомів:

- зменшення вмісту піску  $C_{п}$  або повна заміна піску на активну мінеральну добавку;
- використання мінеральної добавки з більшою «цементуючою ефективністю»;
- повна заміна усіх компонентів цементом ( $C_{п} = C_{д} = 0$ ).

Якщо вказані прийоми не дозволяють забезпечити необхідну міцність, то задане співвідношення «міцність : середня густина» забезпечити неможливо.

Орієнтовні співвідношення «максимальна міцність : середня густина» полістиролбетону, а також рекомендовані значення співвідношень  $C_{п}$  (між витратою цементу і піску) та  $C_{д}$  (між витратою цементу і пуцоланової добавки) наведені в таблиці.

**Крок 6.** Визначаємо витрату пінополістирольних гранул та повітрявтягуючої (піноутворюючої) добавки, якщо вона вводиться:

- при дозуванні гранул за об'ємом (у насипному стані):

$$Пс^v = \frac{V_{п} - V_{в.п.} - V_{з.п.}}{1 - П_{пс}}$$

де об'єм втягнутого повітря визначається за рекомендаціями до застосування повітрявтягуючої добавки (як правило [4] він становить 40...60 л),  $V_{з.п.} = 10 \dots 20$  л.

- при дозуванні гранул за масою:

$$Пс = Пс^v \rho_{пс}$$

Тут  $\rho_{пс}$  – насипна густина суміші пінополістирольних гранул, кг/м<sup>3</sup>.

Розрахункові склади полістиролбетону як і інших видів бетонів підлягають експериментальному уточненню.

Таблиця 1.

Співвідношення «максимальна міцність: середня густина» для полістиролбетону

Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	Параметри складу					
	$C_{д} = C_{п} = 0$	$C_{д} = 0,5; C_{п} = 0$	$C_{д} = 0; C_{п} = 1$	$C_{д} = 0,5; C_{п} = 0,5$	$C_{д} = 0,5; C_{п} = 1$	$C_{д} = 0,5; C_{п} = 1,5$
Максимальна міцність полістиролбетону, МПа						
300	0,55	-	-	-	-	-
400	1,40	0,87	-	-	-	-
500	2,31	1,62	0,54	1,02	0,49	-
600	3,27	2,43	1,09	1,77	1,10	0,63
700	-	3,30	1,68	2,57	1,76	1,20
800	-	4,25	2,32	3,45	2,49	1,82
900	-	-	3,03	4,40	3,28	2,50
1000	-	-	3,80	5,45	4,15	3,24

Розглянемо пропонувану методику розрахунку на прикладах.

**Приклад 1.** Запроектувати теплоізоляційний полістиролбетон з середньою густиною у висушеному стані  $\rho_0 \leq 500 \text{ кг/м}^3$  і міцністю  $f_{cm,cube} \geq 1,5 \text{ МПа}$ . В'яжуче – портландцемент з фактичною активністю 48 МПа, заповнювач – кварцовий пісок та пінополістирольні гранули з густиною і пористістю у насипаному стані 15 кг/м<sup>3</sup> і 40% відповідно. Використовується повітровтягувальна добавка СНП.

1. Приймаючи  $C_p = 0,5$ , визначаємо витрату цементу за формулою (6):

$$C = \frac{\rho_0}{1,15 + C_p + C_d} = \frac{500}{1,15 + 0,5} = 302 \text{ кг/м}^3$$

2. Витрата піску  $P = C_p C = 0,5 \times 302 = 151 \text{ кг/м}^3$ .

3. Витрата води без застосування пластифікатора  $B = 210 \text{ кг/м}^3$ .

4. Сумарний вміст пінополістирольних гранул і залишкового повітря

$$V_p = V_{pc} + V_{в.п.} + V_{з.п.} = 1000 - (C/\rho_c + D/\rho_d + P/\rho_p + B) = 1000 - (302/3,1 + 151/2,65 + 210) = 635,6 \text{ л/м}^3$$

5. Перевіряємо умову міцності:

$$f_{c,cube} = p A_i R_u \left( \frac{C + k_{ue} D}{B + V_p} + b \right) = 0,19 \times 48 \left( \frac{302}{210 + 635,6} - 0,2 \right) = 1,44 \text{ МПа} < 1,5 \text{ МПа}$$

Умова міцності не виконується тому замінюємо пісок активною мінеральною добавкою – золою-виносу з коефіцієнтом цементуючої ефективності 0,26. Оскільки дійсна густина золи дещо відрізняється від густини піску, то при тій же її витраті дещо зміниться сумарний вміст пінополістирольних гранул і залишкового повітря:

$$V_p = V_{pc} + V_{в.п.} + V_{з.п.} = 1000 - (C/\rho_c + D/\rho_d + P/\rho_p + B) = 1000 - (302/3,1 + 151/2,4 + 210) = 629,3 \text{ л/м}^3$$

Перевіряємо умову міцності:

$$f_{c,cube} = p A_i R_u \left( \frac{C + k_{ue} D}{B + V_p} + b \right) = 0,16 \times 48 \left( \frac{302 + 0,26 \times 151}{210 + 629,3} - 0,2 \right) = 1,6 \text{ МПа} > 1,5 \text{ МПа}$$

6. Витрата пінополістирольних гранул у насипному стані:

$$P_{cv} = \frac{V_p + V_{в.п.} + V_{з.п.}}{1 - P_{pc}} = \frac{629,3 - 40 - 15}{1 - 0,4} = 957 \text{ л/м}^3$$

Для забезпечення втягування 40 л повітря згідно рекомендацій для добавки СНП її вводимо у кількості 0,02% від маси цементу.

Остаточно маємо наступну витрату компонентів на 1 м<sup>3</sup> полістиролбетонної суміші:

цемент – 302 кг; зола-виносу – 151 кг; пінополістирольні гранули – 0,957 м<sup>3</sup>; добавка СНП – 0,0002х302 = 0,060 кг.

**Приклад 2.** Запроектувати конструктивно-теплоізоляційний полістиролбетон з середньою густиною у висушеному стані  $\rho_0 \leq 800 \text{ кг/м}^3$  і міцністю  $f_{cm} \geq 2,5 \text{ МПа}$ . В'яжуче – портландцемент з фактичною активністю 51 МПа, заповнювач – кварцовий пісок та пінополістирольні гранули з густиною і пористістю у насипаному стані 15 кг/м<sup>3</sup> і 41% відповідно. Використовується активна мінеральна добавка – молотий доменний шлак з коефіцієнтом цементуючої ефективності 0,33 і повітровтягувальна добавка СНП.

1. Приймаючи  $C_p = 1$  і  $C_d = 0,5$ , визначаємо витрату цементу за формулою (6):

$$C = \frac{\rho_0}{1,15 + C_p + C_d} = \frac{800}{1,15 + 1 + 0,5} = 302 \text{ кг/м}^3$$

2. Витрата піску  $P = C_p C = 1,0 \times 302 = 302 \text{ кг/м}^3$ ;

витрата шлаку  $D = C_d C = 0,5 \times 302 = 151 \text{ кг/м}^3$ .

3. Витрата води  $B = 210 \text{ кг/м}^3$ .

4. Сумарний вміст пінополістирольних гранул і залишкового повітря

$$V_p = V_{pc} + V_{в.п.} + V_{з.п.} = 1000 - (C/\rho_c + D/\rho_d + P/\rho_p + B) = 1000 - (302/3,1 + 151/2,7 + 302/2,65 + 210) = 522,7 \text{ л/м}^3$$

5. Перевіряємо умову міцності:

$$f_{c,cube} = p A_i R_u \left( \frac{C + k_{ue} D}{B + V_p} + b \right) = 0,19 \times 51 \left( \frac{302 + 0,33 \times 151}{210 + 522,7} - 0,2 \right) = 2,71 \text{ МПа} > 2,5 \text{ МПа}$$

6. Витрата пінополістирольних гранул у насипному стані:

$$P_{cv} = \frac{V_p + V_{в.п.} + V_{з.п.}}{1 - P_{pc}} = \frac{522,7 - 40 - 15}{1 - 0,41} = 793 \text{ л/м}^3$$

Для забезпечення втягування 40 л повітря згідно рекомендацій для добавки СНП її вводимо у кількості 0,02% від маси цементу.

Остаточно маємо наступну витрату компонентів на 1 м<sup>3</sup> полістиролбетонної суміші:

цемент – 302 кг; доменний шлак – 151 кг; пісок – 302 кг; пінополістирольні гранули – 0,793 м<sup>3</sup>; добавка СНП – 0,0002х302 = 0,060 кг.

#### Висновки:

Наведений метод розрахунку полістиролбетону з використанням «приведеного» цементно-водного відношення дозволяє не тільки запроектувати його склад з достатньою статистичною забезпеченістю, але й розширити діапазон технологічних задач, дозволивши враховувати вплив активних мінеральних та хімічних (повітровтягувальних, пластифікаторів) добавок, які вводяться в бетонну суміш.

#### Література:

1. Рахманов В.А. Инновационная технология полистиролбетона с оптимальными свойствами // Строительные материалы, технологии, оборудование XXI века.- №1, 2009.- С.37-41.

2. Рахманов В.А. Расчетный метод определения состава полистиролбетона с требуемой прочностью и минимальной плотностью // Промышленное и гражданское строительство.- №7, 2009.- С.45-47.

3. Л. И. Дворкин Проектирование составов бетона с применением метода приведенного цементно-водного отношения / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин // Технологии бетонов 2009. – №5. – С. 34-36.

4. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетонознания. – К.: Основа, 2007. – 616 с.

5. Дворкин Л.И. Міцність на стиск полістиролбетону / Дворкин Л.И., Кочкарьов Г.В. // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. – Рівне, 2014. Вип. 28.- С. 32-38.

6. Бужевич Г.А. Легкие бетоны на пористых заполнителях.- М.: Стройиздат, 1970.- 272 с.

7. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Высшая школа, 1987. – 449 с.