



Дворкін Л.І.



Гарніцький Ю.В.



Дворкін О.Л.



Марчук В.В.

**Дворкін Л.І., доктор технічних наук, професор,
Гарніцький Ю.В., кандидат технічних наук, доцент,
Дворкін О.Л., доктор технічних наук, професор,
Марчук В.В., аспірант,
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне**

ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДУ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ ЗОЛОВМІСНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЦЕМЕНТІВ

Одним із шляхів зниження енергомосткості виготовлення бетонів і розчинів є застосування цементів з пониженим вмістом клінкерної складової, зокрема композиційних, наповнених золою-виносу і доменним шлаком. Для підвищення міцності бетону на таких цементах при його виготовленні застосовують тонкий помел (до питомої поверхні 400 м²/кг і більше) та вводять суперпластифікатори (СП) при замішуванні бетону, зокрема і СП останнього покоління – полікарбоксилатні та акрилатні. Актуальною є задача оптимізації складів таких бетонів з умови забезпечення всіх нормованих властивостей та мінімальної собівартості.

В даній роботі пропонується вирішення вказаної задачі за допомогою методів математичного моделювання. Для побудови відповідних моделей досліджували вплив основних технологічних факторів на водопотребу і легкоукладальність бетонних сумішей, а також міцність високоміцних бетонів на композиційному цементі при нормальному твердінні та тепловологісній обробці.

В якості в'язучого був використаний золівмісний композиційний цемент (КЦ), який виготовляли домолот у кульовому млині товарного ПЦ II/A-Ш-500 разом з добавкою золи. Цемент модифікували добавкою поліфункціонального модифікатора (ПФМ), який містив два компоненти – інтенсифікатор помелу – пропіленгліколь, який вводили в однаковій кількості 0,04% від маси цементу у всіх випадках. Другим компонентом ПФМ був суперпластифікатор (СП) полікарбоксилатного типу Sika VC 225, який вводився двома способами – при помелі цементу або при замішуванні бетону. З урахуванням речовинного складу портландцементу склад отриманого в'язучого був наступний: клінкер – 50%, доменний шлак – 12%, зола-виносу – 38%. Отримані результати при введенні ПФМ за першим способом наведені в роботі [1], нижче розглядаються результати, отримані при введенні СП безпосередньо у бетонну суміш.

Для виготовлення бетонної суміші були використані крупний заповнювач – гранітний щебінь з $D_{\max} = 20$ мм, та дрібний заповнювач – кварцовий пісок з $M_k = 1,95$.

Водопотреба та легкоукладальність бетонної суміші

Дослідження водопотреби і легкоукладальності бетонних сумішей на основі композиційних золівмісних цементів з добавкою ПФМ виконували згідно трирівневого чотирьохфакторного плану В₄ [2], умови якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Умови планування експериментів

Фактори впливу	Рівні варіювання				Інтервал
Натуральний вид	Кодований	-1	0	+1	
Вміст добавки ПФМ, %	X ₁	0,4	0,7	1,0	0,3
Питома поверхня КЦ, S _{пит} , м ² /кг	X ₂	350	450	550	100
Витрата цементу Ц, кг/м ³	X ₃	300	400	500	2
Рухомість суміші, ОК, см	X ₄	2	13	24	11

Матриця планування та експериментальні значення водопотреби бетонної суміші (В_{б.с.}) наведені в табл. 2.

Таблиця 2.

Матриця планування та результати визначення водопотреби бетонної суміші

№	Фактори впливу				В _{б.с.} , л/м ³
	ПФМ, %	S _{пит} , м ² /кг	Ц, кг/м ³	ОК, см	
1	1,0	550	500	24	134
2	1,0	550	500	2	123
3	1,0	550	300	24	122
4	1,0	550	300	2	112
5	1,0	350	500	24	125
6	1,0	350	500	2	113
7	1,0	350	300	24	118
8	1,0	350	300	2	107
9	0,4	550	500	24	184
10	0,4	550	500	2	172
11	0,4	550	300	24	174
12	0,4	550	300	2	164
13	0,4	350	500	24	172
14	0,4	350	500	2	160
15	0,4	350	300	24	167
16	0,4	350	300	2	157
17	1,0	450	400	13	117
18	0,4	450	400	13	166
19	0,7	550	400	13	148
20	0,7	350	400	13	140
21	0,7	450	500	13	147
22	0,7	450	300	13	139
23	0,7	450	400	24	146
24	0,7	450	400	2	136

Після обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримали математичну модель водопотреби бетонної суміші при використанні золівмісних композиційних цементів:

$$B_{6,c} = 142 - 24,92 \cdot x_1 + 4,14 \cdot x_2 + 3,92 \cdot x_3 + 5,49 \cdot x_4 - 0,63 \cdot x_1 x_2 + 0,63 \cdot x_1 x_3 + 1,25 \cdot x_2 x_3 - 1,25 \cdot x_2 x_4 + 0,38 \cdot x_3 x_4 - 0,68 \cdot x_1^2 + 1,82 \cdot x_2^2 + 0,82 \cdot x_3^2 - 1,18 \cdot x_4^2 \quad (1)$$

Аналізуючи математичну модель (1) звернемо увагу на наявність суттєвої взаємодії ефектів впливу питомої поверхні цементу та витрати КЦ, а також рухомості бетонної суміші. Зокрема, при збільшенні $S_{\text{пит}}$ КЦ водопотреба бетонної суміші зменшується при збільшенні показника рухомості, а також при зменшенні витрати цементу. Суттєвий нелінійний ефект простежується при аналізі впливу питомої поверхні та рухомості сумішей. Ранжування кількісних ефектів впливу досліджуваних факторів на водопотребу дозволяє розташувати їх за спадячою силою впливу $x_1 > x_2 > x_3 > x_4$.

Визначення водопотреби і її регулювання від зміни основних технологічних факторів здійснюється за допомогою номограм (рис. 1), що побудована на основі математичної моделі (1).

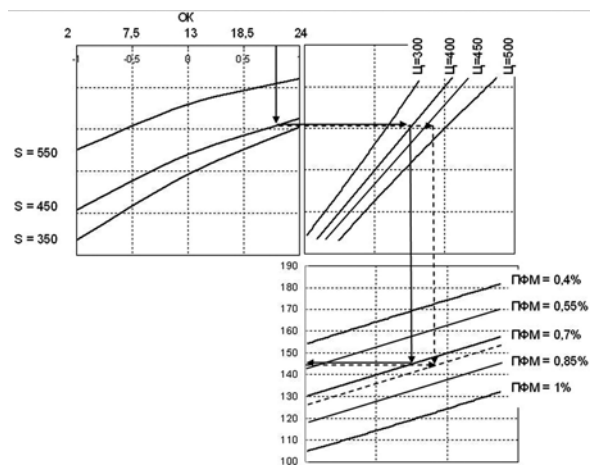


Рис. 1. Номограма визначення водопотреби бетонних сумішей на основі золівмісних КЦ

Міцнісні показники бетонів

Дослідження впливу дисперсності КЦ, вмісту добавки ПФМ та В/Ц на міцнісні показники бетонів на основі золівмісних композиційних цементів були виконані згідно тривірневого трьохфакторного плану В₃, умови планування якого наведені в табл.3.

Таблиця 3.

Умови планування експериментів

Фактори	Кодовий вид	Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
В/Ц	X ₁	0,25	0,3	0,35	0,05
Вміст добавки ПФМ у КЦ, %	X ₂	0,4	0,7	1	0,3
Питома поверхня КЦ, S _{пит} , м²/кг	X ₃	350	450	550	100

У ході досліджень у кожній точці плану для оцінки впливу факторів на міцність бетонів на основі КЦ виготовляли стандартні зразки-куби (10х10 см), що тверділи у нормальних умовах. Визначали міцність зразків-кубів при стиску у віці 1, 7 і 28 діб та міцність при розтягу при осьовому розколюванні у одно та 28-и добовому віці. Матриця планування та отримані експериментальні результати представлені в табл. 4.

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі міцності у вигляді поліноміальних рівнянь регресії.

Статистичні моделі міцності бетонів на основі золівмісних КЦ

$$f_{c, cube}^1 = 36,72 - 2,31 \cdot x_1 + 1,68 \cdot x_2 + 6,3 \cdot x_3 + 0,36 \cdot x_1 x_2 + 0,72 \cdot x_1 x_3 - 0,21 \cdot x_2 x_3 + 0,21 \cdot x_1^2 - 4,8 \cdot x_2^2 - 0,91 \cdot x_3^2 \quad (2)$$

$$f_{c, cube}^{28} = 80,1 - 6,09 \cdot x_1 - 0,3 \cdot x_2 + 9,57 \cdot x_3 + 0,01 \cdot x_1 x_2 + 1,86 \cdot x_1 x_3 + 0,38 \cdot x_2 x_3 - 2,5 \cdot x_1^2 - 4,28 \cdot x_2^2 - 3,78 \cdot x_3^2 \quad (3)$$

$$f_{c, tn}^{28} = 5,08 - 0,262 \cdot x_1 - 0,013 \cdot x_2 + 0,415 \cdot x_3 + 0,069 \cdot x_1 x_3 + 0,001 \cdot x_2 x_3 + 0,027 \cdot x_1^2 - 0,185 \cdot x_2^2 - 0,172 \cdot x_3^2 \quad (4)$$

Таблиця 4.

Матриця планування та експериментальні значення міцнісних показників бетонів на основі золівмісних КЦ

Натуральні значення факторів			ОК, см	Міцність при стиску, $f_{c, cube}$, МПа, у віці			Міцність на розтяг, при розколюванні, $f_{c, tn}$, МПа, у віці		Відношення $\frac{f_{c, tn}}{f_{c, cube}}$	
В/Ц	ПФМ%	S _{пит} , м²/кг		1 доби	7 діб	28 діб	1 доби	28 діб	1 доба	28 діб
0,35	1	350	28	21,2	39,8	58,4	2,65	4,11	0,125	0,070
0,35	1	550	27	35,6	39,3	74,2	3,53	4,82	0,099	0,065
0,35	0,4	350	7	22,0	46,2	59,2	2,93	4,15	0,133	0,070
0,35	0,4	550	9	34,7	46,7	74,6	3,47	4,84	0,100	0,065
0,25	1	350	22	25,0	46,6	67,3	2,94	4,52	0,117	0,067
0,25	1	550	24	41,5	64,7	90,0	3,91	5,49	0,094	0,061
0,25	0,4	350	0	26,4	51,9	67,6	3,25	4,53	0,123	0,067
0,25	0,4	550	2	42,9	64,6	91,0	3,99	5,53	0,093	0,061
0,35	0,7	450	20	36,7	53,5	75,1	3,60	4,86	0,098	0,065
0,25	0,7	450	16	37,4	61,6	86,4	3,65	5,34	0,097	0,062
0,30	1	450	24	34,2	58,8	75,5	3,44	4,88	0,100	0,065
0,30	0,4	450	4	29,9	58,4	75,9	3,14	4,90	0,105	0,065
0,30	0,7	350	16	34,5	51,8	67,0	3,45	4,51	0,100	0,067
0,30	0,7	550	19	37,4	64,3	85,3	3,65	5,30	0,097	0,062
0,30	0,7	450	18	37,2	60,1	80,2	3,63	5,08	0,098	0,063
0,30	0,7	450	17	36,3	59,3	79,3	3,57	5,04	0,098	0,064
0,30	0,7	450	17	35,6	58,1	80,1	3,53	5,08	0,099	0,063

При аналізі математичних моделей (2...4), прослідковується суттєва взаємодія факторів В/Ц та $S_{\text{пит}}$ на міцність як ранню так і марочну, при цьому інші взаємодії чинять незначний вплив. Суттєвий нелінійний ефект впливу всіх факторів простежується у більш пізньому віці. Ранжування кількісних ефектів впливу досліджуваних факторів на міцність при стиску дозволяє розташувати їх в такому порядку $x_3 > x_1 > x_2$. Вплив факторів на міцність на розтяг при розколювання має подібний характер. Основним фактором, що впливає на міцність у дослідженому діапазоні зміни факторів є питома поверхня цементу.

На основі отриманих даних табл. 4 та математичної моделі (3) була побудована номограма (рис. 2).

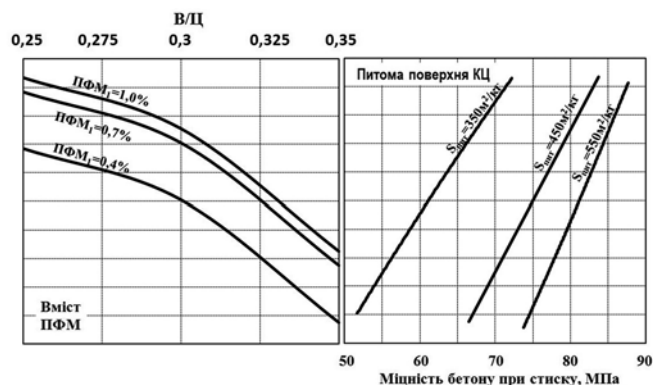


Рис. 2. Номограма визначення міцності бетонів при стиску на основі золовмісних КЦ з добавками ПФМ у віці 28 діб

Важливим технологічним процесом, який впливає на структуру і експлуатаційні властивості бетонних та залізобетонних конструкцій є тепловолісна обробка (ТВО). Ця технологічна стадія в сучасних умовах є ефективним методом прискорення твердіння, що веде за собою скорочення процесу виробництва та підвищення продуктивності. Вона багато в чому зумовлює кінцеві фізико-механічні властивості бетону, і застосування певних режимів дозволяє в тій чи іншій мірі керувати процесами структуроутворення. Це особливо важливо для бе-

тонних та залізобетонних виробів, до яких ставляться підвищені вимоги за довговічністю, наприклад для дорожнього чи водогосподарського будівництва. У цьому випадку слід застосовувати «м'які», низькотемпературні режими, і в той же час необхідно досягти достатньої розпалубочної і передаточної міцності.

Дослідження впливу режимів ТВО виконано з використанням факторного плану B_4 [2], в якому як змінні фактори вибрано: вміст добавки Sika у КЦ (X_1) водоцементне відношення (X_2) тривалість ізотермічної витримки t_{iz} (X_3) та максимальна температура $T_{\text{тво}}$ (X_4). Досліджуваним параметром вибрано міцність при стиску.

У ході досліджень в кожній точці плану для оцінки впливу факторів та ефективності ТВО на міцність бетонів виготовляли стандартні зразки-куби ($10 \times 10 \times 10$ см), які тверднули у нормальних умовах. Водопотреба бетонної суміші в усіх точках була однаковою. Теплова обробка проводилась у лабораторній пропарювальній камері за наступним режимом: попереднє витримання – 2 год; підйом температури зі швидкістю $25^\circ\text{C}/\text{год}$; ізотермічна витримка – згідно умов планування; «термосне» охолодження. Після ТВО визначали міцність зразків при стиску через 4 год. та у віці 28 діб. Для порівняння міцність визначали також зразків, які тверднули при нормальних умовах. Матриця планування та отримані експериментальні результати наведені в табл. 5.

Після обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримали рівняння регресії міцності пропареного бетону:

– через 4 год. після ТВО:

$$f_{c, \text{cube}}^{\text{TBO}} = 58,3 - 0,46 \cdot x_1 - 11,24 \cdot x_2 + 1,36 \cdot x_3 + 2,6 \cdot x_4 + 0,8 \cdot x_1 x_2 + 0,14 \cdot x_1 x_3 + 0,26 \cdot x_2 x_3 - 1,7 \cdot x_1^2 + 4,0 \cdot x_2^2 + 0,8 \cdot x_3^2 + 1,85 \cdot x_4^2 \quad (5)$$

– у віці 28 діб:

$$f_{c, \text{cube}}^{\text{TBO}, 28} = 65,04 + 0,46 \cdot x_1 - 10,5 \cdot x_2 + 0,5 \cdot x_3 + 0,97 \cdot x_4 - 0,49 \cdot x_1 x_2 + 0,24 \cdot x_1 x_4 - 0,3 \cdot x_2 x_3 - 0,16 \cdot x_2 x_4 - 0,5 \cdot x_1^2 + 4,2 \cdot x_2^2 + 0,6 \cdot x_3^2 - 0,6 \cdot x_4^2 \quad (6)$$

Таблиця 5.

Матриця планування та експериментальні результати

№	Фактори впливу				Міцність на стиск, МПа, у віці:		
	ПФМ, %	В/Ц	t_{iz} , год	$T_{\text{тво}}$, $^\circ\text{C}$	4 години після ТВО	28 діб після ТВО	28 діб НТ*
1	1,0	0,35	8	90	57,3	59,0	55,6
2	1,0	0,35	8	60	52,8	56,0	55,8
3	1,0	0,35	4	90	55,1	57,6	54,9
4	1,0	0,35	4	60	47,9	56,9	55,8
5	1,0	0,25	8	90	77,6	81,5	71,8
6	1,0	0,25	8	60	71,9	79,0	70,5
7	1,0	0,25	4	90	74,0	80,1	72,8
8	1,0	0,25	4	60	70,1	77,4	71,3
9	0,4	0,35	8	90	56,2	60,6	54,9
10	0,4	0,35	8	60	51,4	60,2	54,7
11	0,4	0,35	4	90	53,4	60,7	54,7
12	0,4	0,35	4	60	47,9	59,1	54,2
13	0,4	0,25	8	90	80,0	82,1	71,2
14	0,4	0,25	8	60	74,6	80,2	70,5
15	0,4	0,25	4	90	77,9	80,1	70,8
16	0,4	0,25	4	60	72,8	78,9	70,2
17	1,0	0,3	6	75	56,3	64,2	64,5
18	0,4	0,3	6	75	57,1	65,1	65
19	0,7	0,35	6	75	50,5	60,2	65,3
20	0,7	0,25	6	75	74,3	78,5	69,9
21	0,7	0,3	8	75	60,0	66,3	65,1
22	0,7	0,3	4	75	58,4	65,2	65,6
23	0,7	0,3	6	90	62,4	66,2	66,5
24	0,7	0,3	6	60	58,1	62,9	65,1

* – нормальне твердіння

Проектування та оптимізація складу бетонів зводиться до визначення співвідношення компонентів, яке забезпечує комплекс проектних показників, зокрема міцність на стиск та розтяг у різному віці та необхідну рухомість бетонної суміші. Оскільки всі міцнісні характеристики можна однозначно пов'язати з В/Ц, то задача може бути вирішена за наступним алгоритмом.

1. З моделей міцності при твердінні в нормальних умовах (2...4) та після ТВО (5, 6) визначаємо В/Ц, яке забезпечує кожну із заданих міцнісних властивостей.

Для розв'язання цих моделей відносно В/Ц слід задатись значеннями інших факторів, зокрема вмістом ПФМ та параметрами ТВО. В першому наближенні з умови мінімальної собівартості для бетонів з помірно рухомих сумішей можна приймати мінімальний вміст ПФМ (0,4%). Для литих сумішей вміст ПФМ слід збільшити до 0,7%, для бетонів, здатних до самоущільнення – до 1,0%. Параметри ТВО приймаються на мініальному рівні.

2. З визначених значень В/Ц приймають мінімальне, яке забезпечує усі властивості. При суттєвих (більше 25%) відмінностях між отриманими з різних умов значеннями В/Ц змінюють вміст ПФМ та параметри ТВО для зменшення «ножиць» по В/Ц. Для попереднього вибору параметрів складу можна використати номограму (рис. 2).

3. Визначають витрату води для заданої легкоукладальності з моделі (4), або користуючись номограмою (рис. 1) залежно від вихідних параметрів (рухомості, питомої поверхні та витрати цементу, вмісту ПФМ).

4. Визначають витрату композиційного цементу, кг/м^3 :

$$\text{КЦ} = \text{В}/(\text{В}/\text{Ц}) \quad (7)$$

Якщо отримана витрата цементу перевищує 400 кг/м^3 , слід збільшити витрату ПФМ або води, перерахувавши їх за рівнянням (1) або номограмою на рис. 1. Поправку на збільшення витрати води можна також прийняти за табл. 6. Якщо прийнято рішення збільшити водопотребу, то слід перерахувати витрату цементу з урахуванням відкоригованої водопотреби.

Таблиця 6.

Поправка на водопотребу бетонної суміші при витраті цементу, більшій 400 кг/м^3

Питома по-верхня КЦ, $\text{м}^2/\text{кг}$	Витрата композиційного цементу, кг/м^3										
	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	
	Збільшення водопотреби бетонної суміші понад розрахункову, кг/м^3										
550	4	8	12	15	20	25	30	35	40	45	
450	3	6	9	12	15	19	23	27	31	35	
350	2	4	6	8	10	12	15	18	21	25	

5. Визначають витрату заповнювачів за методом абсолютних об'ємів.

6. Приймають параметри складу (дисперсність цементу, вміст ПФМ, параметри ТВО) на інших рівнях і виконують техніко-економічну оптимізацію складу за собівартістю.

Приклад розрахунку складу бетону.

Необхідно запроектувати склад бетону класу C50/60 з рухомістю за осадкою конуса ОК = 22 см при використанні композиційного цементу з питомою поверхнею $S_{\text{пит}} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$. Щебінь гранітний фракції 5...20 мм з $\rho_{\text{щ}} = 2700 \text{ кг/м}^3$ та $\rho_{\text{н.щ}} = 1450 \text{ кг/м}^3$, пісок середньої крупності з $\rho_{\text{п}} = 2650 \text{ кг/м}^3$ та $\rho_{\text{н.п}} = 1470 \text{ кг/м}^3$.

Необхідна середня міцність бетону класу C50/60, визначена на зразках-кубах при коефіцієнті варіації 13,5% становить 77 МПа. Нормується тільки міцність при стиску, тому за номограмою (рис. 2) визначаємо необхідне В/Ц=0,315.

При вихідних параметрах рухомості ОК = 22 см та дисперсності цементу $S_{\text{пит}} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$ задаємось в першому наближенні орієнтовною витратою цементу Ц = 400 кг/м^3 та добавки ПФМ = 0,7%. За допомогою номограми (рис. 2) визначимо витрату води, $\text{В} = 145 \text{ л/м}^3$

– Визначимо витрату цементу, кг/м^3 :

$$\text{Ц} = 145/(0,315) = 460 \text{ кг}$$

– Згідно табл. 2 коригуємо витрату води, при Ц = 460 збільшуємо кількість води на 9 л. Таким чином $\text{В} = 154 \text{ л}$.

– Визначимо витрату цементу, кг/м^3 :

$$\text{Ц} = 154/(0,315) = 489 \text{ кг}$$

– Визначимо витрату заповнювачів за методом абсолютних об'ємів:

– витрата щебеню, кг/м^3 :

$$\text{Щ} = \frac{1000}{\alpha \cdot \frac{V_{\text{щ}}^{\text{п}}}{\rho_{\text{н.щ}}} + \frac{1}{\rho_{\text{щ}}}} = \frac{1000}{1,37 \cdot \frac{0,46}{1,45} + \frac{1}{2,7}} = 1238 \text{ кг/м}^3$$

α – коефіцієнт розсування зерен щебеню;

Пустотність крупного заповнювача

$$V_{\text{щ}}^{\text{п}} = 1 - \frac{\rho_{\text{н.щ}}}{\rho_{\text{щ}}} = 1 - \frac{1,45}{2,7} = 0,46 \text{ кг/л}$$

– витрату піску:

$$\begin{aligned} \text{П} &= \left(1000 - \left(\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \text{В} + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} \right) \right) \cdot \rho_{\text{п}} = \\ &= \left(1000 - \left(\frac{489}{3,1} + 145 + \frac{1238}{2,7} \right) \right) \cdot 2,65 = 609 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

Розрахунковий номінальний склад бетону, кг/м^3 :

КЦ = 489 кг/м^3 ; при В/Ц = 0,315; В = 154 кг/м^3 ; ПФМ = $0,007 \times 489 = 3,42 \text{ кг/м}^3$; П = 609 кг/м^3 ; Щ = 1238 кг/м^3 .

Висновок.

З застосуванням отриманих експериментально-статистичних моделей запропонована методика проектування складів бетонів на основі КЦ з добавками ПФМ з комплексом заданих показників, що характеризують їх властивості. Методика передбачає з урахуванням питомої поверхні, вмісту ПФМ та рухомості бетонної суміші знаходити витрату води та В/Ц за наступним визначенням витрати цементу та заповнювачів. Витрата цементу коригується при її виході за межі області постійності водопотреби.

Література:

1. Дворкін Л.Й. Високоміцні бетони на цементах низької водопотреби з використанням пиловидних відходів промисловості / Л.Й. Дворкін та ін. – Науковий-технічний збірник. Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. Випуск 43. НДІБМВ, Знання, 2012 – с. 73-80.

2. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Житковський В.В. – Рівне: НУВГП, 2011 – 174 с.