

УДК 666.972

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СКЛАДІВ БЕТОНУ

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СОСТАВА БЕТОНА

PERFORMANCE ANALYSIS OF SOURCE MATERIALS DESIGN OF CONCRETE COMPOSITION

Дворкін О. Л., д.т.н., професор (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Дворкин О. Л., д.т.н., профессор (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно)

Dvorkin O. L., doctor of technical sciences, professor, (National University of Water Management and Nature (Rivne)

У статті приводиться аналіз ефективності вихідних матеріалів при проектуванні складів бетону

В статье излагается анализ эффективности исходных материалов при проектировании состава бетона

In the article the basics of the performance analysis of source materials design of concrete

Ключові слова:

Бетон, цемент, заповнювачі, водопотреба.

Бетон, цемент, заполнители, водопотребность

Concrete, cement, aggregates, water demand

Проектування складів бетонів з комплексом необхідних властивостей починається з вибору вихідних матеріалів – цементів, заповнювачів і добавок. Від раціональності цього вибору залежить як забезпечення бажаних експлуатаційних властивостей бетонів, так і їх техніко-економічна ефективність.

Вибір виду цементу. Безпосередньо для підприємств – споживачів цементу, основною перевагою застосування цементу з мінеральними добавками є економічний ефект, що досягається, на даному підприємстві

$$E_{\delta} = \tilde{N}_{\delta} \ddot{O} - \tilde{N}_{\delta}^0 \ddot{O}^0, \quad (1)$$

де $\tilde{N}_{\delta}^0, \ddot{O}^0$ і $C_{\text{ц}}, \ddot{O}$ – відповідно вартість і витрата цементу, що не містить мінеральних добавок, і цементу з мінеральними добавками.

Практично рівноцінним з величиною $E_{\text{ц}}$ порівняльним показником ефективності застосування різних видів цементу є відношення:

$$k_e = \frac{C_{\delta} \ddot{O}}{\tilde{N}_{\delta}^0 \ddot{O}^0}, \quad (2)$$

де $C_{\text{ц}}, \ddot{O}$ і C_{δ}^0, \ddot{O}^0 – витрати на порівнювані цементу для бетонів однакової якості.

Додатковим критерієм ефективності при виборі цементу може бути відношення необхідних на нього витрат (з врахуванням транспортних та інших витрат) до величини визначальних проектних або технологічних параметрів R_i :

$$K_{\text{а.в.}} = \frac{\tilde{N}_{\delta} \ddot{O}}{D_i} \quad (3)$$

Такими параметрами можуть слугувати, наприклад, проектна 28 добова або рання міцність, що досягається бетоном при заданих температурно-вологісних умовах, а також водонепроникність, морозостійкість тощо. При рівній величині $E_{\text{ц}}$ вищі значення $K_{\text{с.ц}}$ свідчать про більшу перевагу даного цементу з позиції забезпечення покращених якісних показників виготовленої продукції.

При проектуванні складів бетону, особливості цементів з мінеральними добавками можна врахувати трьома основними коефіцієнтами:

$$k_1 = R_{\delta} / R_{\delta}^0; \quad k_2 = R_a / R_a^0; \quad k_3 = \hat{A} / \hat{A}^0, \quad (4)$$

де $R_{\delta}, R_{\text{ц}}$ і B – відповідно міцність бетону, активність цементу в 28 діб і водопотреба бетонної суміші на цементі з добавкою; R_a^0, R_{δ}^0, B^0 – без добавки.

При застосуванні цементів з підвищеним вмістом мінеральних добавок, як правило, спостерігається деяке сповільнення зростання міцності в перші 7 днів при збереженні марочної міцності. Якщо для цементів, що не містять мінеральних добавок, 7-добова міцність становить, зазвичай 0,65-0,75 міцності в 28 діб, для портландцементу з 20% доменного шлаку вона знижується до 0,55-0,65, з 35% шлаку – до 0,5-0,6, при заміні 10% шлаку опокою – до 0,4-0,5 [1].

Відомо, що є деякий критичний вміст мінеральної добавки, вище якого активність цементу починає знижуватися, хоча марка цементу і ціна на нього залишаються незмінними. Цей критичний вміст для кожної добавки з

урахуванням її особливостей залежить від хіміко-мінералогічного складу клінкера, тонкості помелу і температурно-вологісних умов твердіння цементу.

Споживачам цементу доводиться зважати на те, що нерідко при однакових марках цементу, який не містить мінеральних добавок, і цементу з мінеральними добавками, активність останнього може бути істотно нижчою. Можна орієнтовно вважати, що кожні 2 МПа активності в середньому еквівалентні витраті 10 кг цементу на 1 м³ бетону [3].

Практично однакова активність цементів з вмістом мінеральних добавок та без них не дає підстави вважати, що виготовлені на їхній основі бетони будуть мати однакову міцність при рівних цементно-водних відношеннях (Ц/В) і забезпечувати при цьому однакові показники легкоукладальності бетонної суміші. Це обумовлено неоднаковими умовами структуроутворення різноманітних цементів у стандартних розчинах визначеної консистенції і бетонах різної рухомості, з високою насиченістю останніх полідисперсними заповнювачами. Коефіцієнт k_2 показує вплив на міцність особливостей структуроутворення бетону при використанні різних цементів і постійних заповнювачів.

Суттєвим є врахування зміни водопотреби бетонної суміші при зміні виду цементу, що прямо враховується коефіцієнтом k_3 .

Як відомо, параметром, що характеризує водопотребу цементу є його нормальна густина, яка визначається при стандартному випробуванні. Відповідно до експериментальних даних В.П. Сизова[4] водопотребу бетонної суміші при зміні нормальної густоти можна представити рівнянням:

$$V = V_0 + 4(NГ - 28), \quad (5)$$

де V_0 – водопотребна бетонної суміші, необхідна для досягнення заданого показника легкоукладальності на застосованих заповнювачах і портландцементі з $НГ=28\%$.

Орієнтовно коефіцієнт k_3 можна знайти з виразу:

$$k_3 = \frac{V + 4(NГ - 28)}{V_0 + 4(NГ^0 - 28)}, \quad (6)$$

де $НГ^0$ і $НГ$ – відповідно нормальна густина цементу, що не містить мінеральних добавок, і цементу з мінеральними добавками.

Однак, нормальна густина не завжди і не повністю характеризує особливості впливу мінеральних добавок на необхідні значення Ц/В і витрати цементу. Підвищенню нормальної густоти, як відомо, сприяє введення добавок з високою молекулярною вологоємністю, особливо осадового походження.

Знаючи, на основі емпіричних досліджень, коефіцієнти k_1 , k_2 та k_3 , витрату цементу можна визначити, знайшовши Ц/В і V з рівнянь:

$$\frac{\Pi}{B} = \frac{R_6 + 0,5k_1k_2AR_{\Pi}^0}{k_1k_2AR_{\Pi}^0}, \quad (7)$$

$$B = k_3B_0. \quad (8)$$

де А – коефіцієнт у формулі міцності бетону, що враховує вплив якості заповнювачів бетону.

При відомих значеннях k_1 , k_2 , k_3 , які варто визначати технологічним службам підприємств-споживачів цементу на основі узагальнення емпіричних досліджень, можна розрахувати інтегральний параметр К із формули:

$$K = k_1k_2k_3. \quad (9)$$

Параметр К характеризує ефективність складів бетону при переході від цементу, який не містить мінеральних добавок, до цементу з мінеральними добавками. Чим він більше і ближче до 1, тим прийнятий склад можна вважати ефективнішим.

Якщо керуватися умовою: $C_{\Pi} \cdot \Pi \leq C_{\Pi}^0 \Pi^0$

можна знайти граничну питому вартість цементу з мінеральними добавками з урахуванням транспортних витрат на підприємстві, при яких його застосування є економічно прийнятним:

$$C_{\Pi} \leq C_{\Pi}^0 \frac{\Pi^0}{\Pi} \quad (10)$$

Нами виконаний аналіз ефективності в бетонах цементів з мінеральними добавками, що випускаються ВАТ "Волинь-Цемнт". Виготовляли бетони класів В15...В40 з ОК=5...9 см на гранітному щебені фракції 5-20 мм і кварцовому піску із $M_{кр}=1,9$. Бетони тверділи як у нормальних умовах, так і при тепловій обробці. У якості еталонного прийнятий портландцемент М500, який не містить мінеральних добавок, (цемент І типу) з нормальною густиною 25,2 %. Хіміко-мінералогічний склад клінкеру: $C_3S=55...58\%$, $C_2S=16...23\%$, $C_3A=6,8...8,3\%$, $C_4AF=11,5...12,5\%$. В цементі вводили при помелі як активні мінеральні добавки доменний шлак за ГОСТ 3476 і опоку за ТУ 21-26-11.10. Останню застосовували для отримання композиційних цементів з НГ=29%.Тонкість помелу цементів характеризувалася питомою поверхнею по Блейну $300 \pm 20 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Аналіз даних, наведених у табл.1, показує, що за практично однакової активності і нормальній густоті витрата цементу з добавкою 20 % доменного шлаку збільшується для бетонів нормального твердіння класів В15...25 на 4,8-5,5 %, класів В25...40 на 6,7-9,9 %, при заміні 10 % шлаку опокою відповідно на 8-8,6% і 11,6-14,9 %. Збільшення вмісту шлаку до 35 % викликає перевитрату цементу на 9,6-13,9 %, композиції шлак-опока на 14,9-19 %. При тепловій обробці перевитрата цементу із введенням мінеральних добавок дещо знижується, особливо при більш тривалих режимах і

підвищеній температурі пропарювання. Відомо також, що збільшення витрати цементу із введенням добавок підвищується з ростом рухомості сумішей і їхньої нормальної густоти [3]. Негативний вплив підвищеної нормальної густоти зростає в міру підвищення міцності бетону, рухомості бетонної суміші і форсуванні режиму теплової обробки.

Таблиця 1

Ефективність цементів з мінеральними добавками

Вид цементу	НГ, %	Умови твердіння	Витрата цементу в кг/м ³ для бетону класів при ОК=5-9 см			
			B15	B22,5	B30	B40
Портландцемент M500, без мінеральних добавок (R _ц =52,5 МПа)	26,5	норм.	<u>248</u> 1	<u>327</u> 1	<u>412</u> 1	<u>487</u> 1
		проп. (2)+3+6+2	<u>268</u> 1,08	<u>350</u> 1,07	<u>425</u> 1,03	<u>512</u> 1,05
		проп. (2)+3+9+2	<u>265</u> 1,07	<u>340</u> 1,04	<u>420</u> 1,02	<u>510</u> 1,05
Портландцемент із 20% доменних шлаків M500 (R _ц =51,8 МПа)	25,8	норм.	<u>260</u> 1,048	<u>345</u> 1,055	<u>440</u> 1,068	<u>535</u> 1,045
		проп. (2)+3+6+2	<u>280</u> 1,044	<u>360</u> 1,029	<u>455</u> 1,070	<u>565</u> 1,10
		проп. (2)+3+9+2	<u>275</u> 1,037	<u>350</u> 1,029	<u>450</u> 1,071	<u>550</u> 1,078
Портландцемент із 35% доменних шлаків M500 (R _ц =51,5 МПа)	26,6	норм.	<u>272</u> 1,097	<u>365</u> 1,12	<u>460</u> 1,12	<u>555</u> 1,14
		проп. (2)+3+6+2	<u>281</u> 1,048	<u>365</u> 1,023	<u>450</u> 1,059	<u>540</u> 1,055
		проп. (2)+3+9+2	<u>275</u> 1,038	<u>355</u> 1,044	<u>440</u> 1,048	<u>535</u> 1,049
Портландцемент із 20% композиційної добавки (10% шлак + 10% опока) M500 (R _ц =52,1 МПа)	27,5	норм.	<u>268</u> 1,08	<u>355</u> 1,086	<u>460</u> 1,12	<u>560</u> 1,15
		проп. (2)+3+6+2	<u>290</u> 1,08	<u>375</u> 1,07	<u>475</u> 1,12	<u>575</u> 1,12
		проп. (2)+3+9+2	<u>280</u> 1,057	<u>360</u> 1,059	<u>465</u> 1,11	<u>570</u> 1,12
Портландцемент із 35% композиційної добавки (25% шлаків + 10% опока) M500 (R _ц =51,5 МПа)	28,2	норм.	<u>285</u> 1,15	<u>375</u> 1,15	<u>485</u> 1,18	<u>580</u> 1,19
		проп. (2)+3+6+2	<u>300</u> 1,12	<u>380</u> 1,09	<u>475</u> 1,12	<u>580</u> 1,13
		проп. (2)+3+9+2	<u>290</u> 1,09	<u>370</u> 1,09	<u>470</u> 1,12	<u>570</u> 1,12

Примітки: 1. $R_{ц}$ - активність цементу в 28-доб віці; 2. Умови твердіння: норм.- нормальне, проп.- пропарювання; 3. Витрата цементу при пропарюванні визначали з умови досягнення бетоном 70 % проектної міцності, температура пропарювання 80⁰С; 4. Під ризикою наведено значення відносної витрати цементів з добавками порівняно з цементом, що не містить мінеральних добавок.

В табл.2 наведені розрахункові значення інтегрального параметра К, що характеризує ефективність складів бетонних сумішей. Незважаючи на практично однакову активність цементу з мінеральними добавками в порівнянні із цементом без мінеральних добавок у деяких випадках і, зокрема, в бетонах з підвищеною міцністю економічний ефект від його застосування може бути незначним або наближатися до нуля. Цей висновок, мабуть, у ще більшій мірі може бути справедливим при зниженні активності цементу з мінеральними добавками в порівнянні з рівним за міцністю цементом, що не містить мінеральних добавок.

Можна також стверджувати, що відносне зменшення вартості цементу з мінеральними добавками повинне бути вище його перевитрати в бетоні по відношенню до витрати цементу без мінеральних добавок:

$$\frac{C_{ц}^0 - C_{ц}}{C_{ц}} > \frac{Ц - Ц^0}{Ц^0} . \quad (11)$$

Таблиця 2

Значення параметра К при застосуванні в бетонах цементів з мінеральними добавками

Вид цементу і умови твердіння бетону	Значення параметра К для бетонів класів			
	В15	В22,5	В30	В40
Портландцемент із 20% доменного шлаку М500 (твердіння при нормальних умовах)	0,88	0,89	0,90	0,89
Портландцемент із 20% доменного шлаку М500 (пропарювання (2) +3+6+2)	0,90	0,91	0,93	0,92
Портландцемент із 20% доменного шлаку М500 (пропарювання (2) +3+9+2)	0,94	0,95	0,97	0,98
Портландцемент із 35% композиційної добавки (25% шлаки + 10% опока) (твердіння при нормальних умовах)	0,83	0,87	0,81	0,80
Портландцемент із 35% композиційної добавки (25% шлаки + 10% опока) (пропарювання (2) +3+6+2)	0,84	0,87	0,86	0,85
Портландцемент із 35% композиційної добавки (25% шлаки + 10% опока) (пропарювання (2) +3+9+2)	0,86	0,88	0,87	0,89

Очевидно, що формування ціни на цемент із мінеральними добавками цементний завод повинен виконувати не тільки з урахуванням кон'юнктурних міркувань і витрат на виготовлення, але й зважаючи на реальну ефективність цих цементів у бетонах. З іншого боку, споживач цементу при вирішенні питання про перевагу застосування цементів з мінеральними добавками повинен враховувати поряд з їхньою вартістю і результати експериментальних досліджень а також проектування складів відповідних бетонних сумішей.

Активні мінеральні добавки в бетонах. Активні мінеральні добавки, що вводять безпосередньо в бетонні суміші (активні наповнювачі), широко застосовуються в практиці для економії цементу і найбільш енергоємного їх компонента – цементного клінкеру.

Для рівних за міцністю бетонів з однаковою легкоукладальністю економія цементу ΔC за рахунок введення активної мінеральної добавки (наповнювача) може бути знайдена з рівняння:

$$\Delta C = K_{ц.е} D - (C/V)_{пр} \Delta V, \quad (12)$$

де $K_{ц.е}$ – коефіцієнт "цементуючої ефективності", D – витрата добавки, $(C/V)_{пр}$ – "приведене" C/V [3], ΔV – зміна водопотреби бетонних сумішей при введенні добавки.

З позицій економії цементу і цементного клінкеру наповнювач можна застосовувати лише в тому випадку, якщо $(C/V)_{пр}$ більше C/V наповненого бетону. З виразу $(C/V)_{пр}$ слідує:

$$(C/V)_{пр} - C/V = K_{ц.е} D/V. \quad (13)$$

Економічний ефект від введення мінеральної добавки в бетонну суміш можна знайти з рівняння:

$$E_d = C_c \Delta C - C_d D, \quad (14)$$

де C_d – вартість добавки.

У показана ефективність введення золи-віднесення ($D=150 \text{ кг/м}^3$) в бетонній суміші з $OK=5...9 \text{ см}$ на портландцементі без добавок і цементі з 20% шлаку М500 при нормальних умовах твердіння.

Введення мінеральних добавок у бетонну суміш має ряд відомих переваг у порівнянні з їхнім введенням у портландцемент. Найбільш ефективне введення золи та інших мінеральних добавок у бетонні суміші на портландцементі без добавок. При цьому можливо більш гнучко керувати властивостями бетону, досягати більшої стабільності його якості. На Україні в наш час, на жаль, відсутній досить розвинений ринок як цементів без добавок, так і кондиційних мінеральних добавок.

Ефективні способи введення значної кількості мінеральних добавок у бетонні суміші можуть бути реалізовані через технології в'язучих з низькою водопотребою (ВНВ), тонкомолених багатоконпонентних цементів (ТБЦ), а також інтенсивну роздільноу технологію (РТ) [4]. Якщо, наприклад, при

звичайному способі введення золи-виношення в бетонні суміші можна досягнути економії клінкеру до 20%, то введення її із ТБЦ при виготовленні бетонів із суперпластифікаторами дозволяє заощадити клінкер в 1,5 рази.

Таблиця 3

Ефективність введення золи-виношення в бетонні суміші

Клас бетону	Умови твердіння	Портландцемент, що не містить мінеральних добавок, (I тип) M500		Портландцемент із добавкою 20% шлаків (II тип) M500	
		Витрата цементу в кг/м ³		Витрата цементу в кг/м ³	
		без золи	із золою	без золи	із золою
B15	норм. твердіння	248	208	260	218
B20		327	292	345	308
B30		412	380	440	410
B40		487	458	535	508
B15	пропарений (2)+3+6+2, 80 ⁰ C	268	200	280	217
B20		350	286	360	300
B30		425	365	455	400
B40		512	455	565	513
B15	пропарений (2)+3+9+2, 80 ⁰ C	265	195	275	209
B20		340	273	350	287
B30		420	357	450	392
B40		510	450	550	495

Примітка: $K_{ц,е}$ прийнятий по даним [].

Економію портландцементного клінкеру на 1 м³ бетону можна знайти з умови:

$$\Delta K_{ц} = \Delta C - D_{м}, \quad (15)$$

де $D_{м}$ – кількість мінеральних добавок, що міститься в зекономленому цементі.

Очевидно, при $\Delta B > 0$ ефект наповнювача знижується, при $\Delta B < 0$ зростає. При $(C/B)_{пр} \Delta B \geq K_{ц,е} D_{м}$, введення активних наповнювачів не дозволяє досягнути економії цементу і клінкеру або приводить навіть до їхньої перевитрати.

Критерієм ефективності використання цементного клінкера в бетонах може слугувати міцність бетону на 1 кг витраченого клінкеру:

$$L = R_{ст} / K_{л}, \quad (16)$$

де $K_{л}$ – витрата клінкеру на 1 м³ бетонної суміші.

Значення критерію L , розраховані за типовими нормами витрати цементів в бетонах, коливаються залежно від виду цементу, легкоукладальності,

проектної марки і відпускної міцності бетону. При використанні, наприклад, портландцементу і його різновидів та твердіння в нормальних умовах для М400 – $L=0,094 \dots 0,156$; М500 – $L=0,106 \dots 0,16$; М600 – $L=0,133 \dots 0,179$ (при розрахунках умовно прийнято, що цемент містить 80% клінкеру).

Для одержання щільних бетонів, при рядовій гранулометрії суміші заповнювачів необхідний об'єм цементного тіста знаходиться в межах 24...40 %. При цьому мінімальну витрату в'язучого незалежно від його активності зазвичай не можна довести менше ніж 200 кг/м³. Збереження необхідної витрати в'язучого при зниженні кількості його клінкерної частини і відповідному збільшенні критерію L можливо при введенні активних наповнювачів (мікронаповнювачів) у процесі виготовлення в'язучого або бетонної суміші без збільшення їх водопотреби.

З виразу критерію L можна встановити, що його збільшення можливо за рахунок підвищення Ц/В без збільшення витрати клінкеру, а також зростання активності цементу. Для підвищення Ц/В можуть застосовуватись всі технологічні прийоми зменшення водопотреби бетонних сумішей, з яких особливо ефективним є введення суперпластифікаторів.

Активність цементу однозначно пов'язана з міцністю цементного каменю, що, як показано багатьма дослідниками, визначається насамперед об'ємом гідратованого цементу і його водопотребою або водоцементним відношенням.

Активні наповнювачі хімічно зв'язують гідролітичний $\text{Ca}(\text{OH})_2$, збільшуючи ступінь гідратації (α). Збільшення значення α можна досягнути, застосовуючи різні способи механічної та хімічної активізації цементно-зольного в'язучого, наприклад домел золи, введення прискорювачів твердіння і деяких інших добавок. При цьому у всіх випадках, очевидно, не можна допускати підвищення В/Ц цементного каменю. Найбільш значний ефект можна чекати при одночасному збільшенні α і зменшенні В/Ц.

Автори досліджували вплив на величину критерію L активованих зольних наповнювачів [14]. У якості активізаторів використані добавки мікрокремнезему (МК) – відходу виробництва феросиліцію і вапняно-карбонатного пилу (ВКП) – відходу виробництва грудкового вапна. В обох випадках суттєво (на 20...25 %) зростає ступінь гідратації цементно-зольного в'язучого, в першому – за рахунок високої пуцоланової активності МК, в другому – за рахунок додатково залученої в процес гідратації золи. Підвищення водопотреби бетонних сумішей компенсувалося добавкою суперпластифікатора С-3.

Структуроутворююча роль активованих наповнювачів не обмежується їх суттєвим впливом на ступінь гідратації. Мікрокремнезем збільшує поверхневу енергію зольного наповнювача, що проявляється по зміні ефекту аутогезії і теплоти змочування. МК та ВКП збільшують міцність коагуляційної структури і поліпшують умови кристалізації новоутворень при твердінні цементно-зольного каменю, зменшують відділення води і

розчину бетонних сумішей, підвищують адгезійну здатність цементного клею [4].

В табл.4 наведені розрахункові значення міцності і критерію L для характерних експериментальних складів бетонних сумішей. З них слідує, що введення оптимальної кількості як мікрокремнезему, так і вапняно-карбонатного пилу дозволяє збільшити ефективність використання клінкеру в 1,2...2 рази.

Таблиця 4

Розрахункові значення міцності бетону і критерію L

Параметри структури				Витрата матеріалів, кг/м ³				Міцність при стиску, МПа, у віці 28 діб	Критерій L
$X_1 = \frac{V_a}{V_a + V_e}$	$X_2 = \frac{V_z}{(V_z + V_c)}$	$X_3 = \frac{V_{ц}}{(V_z + V_c + V_{ц})}$	$X_4 = \frac{V_d}{V_c + V_d}$	Активатор (А)	Зола (З)	Цемент (Ц)	Вода (В)		
Активатор вапняно-карбонатний пил									
0,3	0,56	0,41	0,02	52	113	179	189	25	0,174
0,37	0,56	0,41	0,02	65	101	179	189	28	0,195
0,44	0,56	0,41	0,02	77	90	179	180	30	0,209
0,44	0,70	0,41	0,02	97	113	122	189	23	0,235
0,44	0,70	0,53	0,02	125	146	158	150	28	0,221
0,37	0,63	0,47	0,02	84	131	172	170	29	0,21
Активатор мікрокремнезем									
0,3	0,70	0,53	0,02	63	148	128	122	22	0,215
0,37	0,70	0,53	0,02	78	133	128	122	30	0,293
0,3	0,70	0,41	0,02	48	112	99	153	15	0,189
0,37	0,70	0,41	0,02	60	103	99	153	19	0,24
0,44	0,70	0,53	0,02	93	119	128	122	33	0,32
0,37	0,63	0,47	0,02	62	107	140	138	23	0,20
Без активаторів									
0,0	0,47	0,36	0,0	-	113	174	189	15	0,107
0,0	0,47	0,36	0,02	-	113	174	164	20	0,144

Примітки: 1. $V_a, V_z, V_{ц}, V_d, V_c$ – відповідно об'єми активатору, золи-внесення, цементу, води, суперпластифікатору. 2. Склади бетонів з добавкою МК розраховували при $X_4=0,26$, з добавкою ВКП – при $X_4=0,37$. 3. При розрахунку критерію L витрату клінкеру в порландцементі приймали рівною 80%.

Хімічні добавки. Для виробників бетону (виробів і конструкцій на його основі) важливо диференціювати економічний ефект, забезпечуваний

добавкою за рахунок економії інших ресурсів у процесі виробництва ($E_{д1}$), і ефект, що досягається при застосуванні бетону ($E_{д2}$). Перший безпосередньо позначається на собівартості бетону, другий повинен враховуватися при визначенні ціни на нього. Як $E_{д1}$, так і $E_{д2}$, через зміну собівартості та ціни на бетон повинні активно впливати на прибуток і рентабельність підприємств-виробників. Для споживачів бетону ефективність використання добавок визначається величиною $E_{д2}$. Залежно від цільової настанови введення однієї і тієї ж добавки може бути спрямоване переважно на досягнення ефекту $E_{д1}$ або $E_{д2}$. Відомо, наприклад, що добавки-пластифікатори можуть бути використані або для економії цементу без погіршення властивостей бетону, або для підвищення пластичності бетонної суміші і полегшення її укладання.

В загальному випадку, не враховуючи питомі капітальні вкладення, економічний ефект від застосування добавок можна знайти за формулою:

$$E_{д} = C_{б,д} - C_{б,в}, \quad (17)$$

де $C_{б,д}$ і $C_{б,в}$ – вартість бетону (бетонної суміші, виробів і конструкцій) відповідно з добавкою й без добавки.

На стадії виготовлення бетону введення добавки дозволяє зменшити його вартість, головним чином, за рахунок зменшення вартості необхідних матеріальних ресурсів, наприклад, у результаті зниження витрати цементу, переходу на інші його види або марки та ін. Однак, неврахування додаткових витрат на добавку і нерациональність технологічних рішень може не дозволити знизити вартість бетону. На рис.3.1, як приклад, наведені можливі варіанти зміни ефективності введення добавки в бетонну суміш.

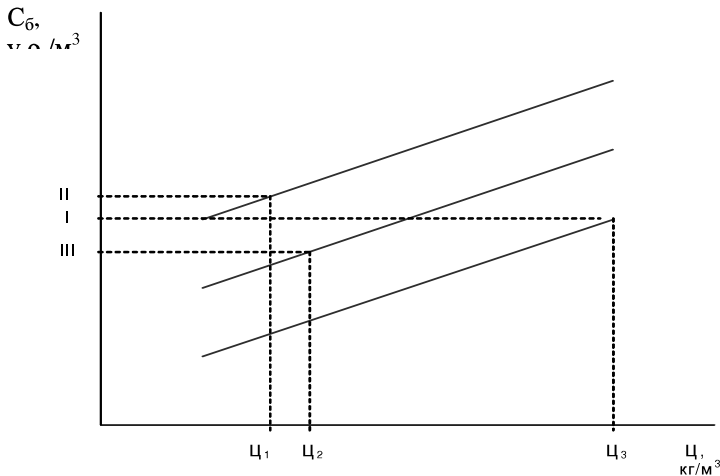


Рис. 3.1. Можливі варіанти зміни вартості бетону при введенні хімічної добавки: I – вартість бетону без добавки, II і III – вартість бетону з добавкою

Нехай нормовані властивості бетону забезпечуються без добавки при витраті цементу Ц₃ (I, рис. 1). При введенні добавки можна забезпечити необхідні властивості бетону при витраті цементу Ц₁ (II, рис. 1), але це невигідно, тому що вартість такого бетону буде вище, ніж бетону без добавки. Зменшивши витрату добавки (III, рис. 1) можна забезпечити необхідні властивості бетону при компромісній витраті цементу Ц₂ і це буде самий вигідний варіант. Підібрати оптимальну витрату добавки в цьому випадку можна шляхом перебирання варіантів, ґрунтуючись на результатах підборів складів або при використанні емпіричних залежностей, що пов'язують нормовані показники властивостей з витратою добавки та іншими параметрами складу.

Затрати на добавку (З_д) при виробництві бетонної суміші виявляються виправданими, якщо дотримується умова:

$$З_{д} < З_{м} + З_{пр} - З'_{м} - З'_{пр}, \quad (18)$$

де З_м і З'_м - затрати на вихідні матеріали бетонної суміші без добавки і з добавкою; З_{пр} і З'_{пр} - інші витрати на виробництво бетонної суміші без добавки і з добавкою.

При виконанні умови (18) передбачається, що показники властивостей бетонної суміші з добавкою не нижче показників без добавки.

Аналогічно можна розрахувати допустимі витрати при виготовленні виробів, конструкцій і зведенні споруд, врахувавши додатково вартість арматури, теплової енергії, будівельних робіт.

Ефективність витрат на добавку з позицій економії ресурсів можна виразити коефіцієнтом К_е^р:

$$К_{е}^{р} = \frac{C_{е.р}}{З_{д}} \left(\sum P_i \geq \sum P_i^n \right), \quad (19)$$

де C_{е.р} - вартість зекономлених ресурсів, $\sum P_i$ і $\sum P_i^n$ - властивості, що досягнуті при введенні добавки і нормовані показники властивостей бетону.

В табл. 5 наведені значення К_е^р для бетонних сумішей з рядом пластифікуючих добавок, введених з метою економії цементу відповідно до підприємств м. Рівне. Аналіз наведених даних показує, що для розглянутих умов коефіцієнт К_е^р більше 1 при економії цементу 10..18 %, коливанні вартості добавок від 75,5 до 1132 у.о. за 1 т і їхній витраті в бетоні від 0,25 до 1% від маси цементу.

Характерно, що при введенні добавок для економії цементу в рядових бетонах найбільш ефективною виявилася традиційна добавка ЛСТ і найменш

ефективною – суперпластифікатор С-3, введення якого безсумнівно більш доцільне при одержанні литих, високоміцних бетонів і т.д.

Незважаючи на значення K_e^p , для ряду підприємств при труднощах, пов'язаних з постачанням цементу, палива, пари на перший план може висуватися ефект фізичної економії відповідних ресурсів при введенні добавок у бетон.

Таблиця 5

Значення K_e^p при введенні добавок, що застосовуються для економії цементу (цемент середньоалюмінатний $C_3A=6...10\%$)

Добавка	Витрата добавки, % від маси цементу	Витрата цементу в бетоні, кг/м ³	Економія цементу при введенні добавки, %	K_e^p
ЛСТ	0,25	до 300	4	16,84
		300... 400	6	25,26
		більше 400	8	33,68
ЛСТ+СН (СН-сульфат натрію)	0,25+2	до 300	6	6,32
		300... 400	8	8,42
		більше 400	10	10,53
С-3	1,0	до 300	22	3,68
		300... 400	24	4,21
		більше 400	25	4,21
С-4 (Дофен-М)	0,4	до 300	14	18,42
		300... 400	15	20,0
		більше 400	15	20,0

Економію витрат на пропарювання бетону можна досягнути як застосуванням добавок-прискорювачів, так і зниженням В/Ц, при введенні суперпластифікатора (табл.6).

Для споживачів бетону з добавками прийнятність рівня ціни на нього впливає з умови:

$$\Delta C_{\bar{b}} = K_e^u C_{e.p}, \quad (K_e^u > 1) \quad (20)$$

де $\Delta C_{\bar{b}}$ - різниця ціни на бетон з добавкою і без добавки; K_e^u - коефіцієнт ефективності ціни на бетон з добавкою.

Значення K_9^p при введенні добавок, що застосовуються
для зниження витрат на ТВО

Назва добавки	Витрата добавки, % від Ц	Коефіцієнт економії ресурсів K_9^p	
		При зниженні витрат на теплову обробку виробів в 2 рази	При безпрогрівної технології
Релаксол – Темп1	0,7...1...1	27,8	55,6
Релаксол - Лідер	0,7...1...1	20,9	41,8
Релаксол – Темп5	0,7...1...1	4,2	8,5
C-3	0,7...1...1	1,2	-

Якісні переваги бетонів з добавками в конкретних умовах застосування бетону можуть використовуватися з різною метою. Так, підвищення міцності бетону може бути використане для зміни перерізу конструкцій, зменшення витрати арматури, прискорення введення будівельних об'єктів в експлуатацію і т.д. Відповідно змінюється вартість зекономлених ресурсів і величина коефіцієнта ефективності.

Для безпосереднього оцінювання ефективності зміни тих або інших властивостей бетону за допомогою добавки при постійних показниках інших властивостей або параметрів складу може слугувати співвідношення:

$$\Delta P = \frac{P'_i - P_i}{z_d}, \quad (21)$$

де P'_i і P_i - порівняльна властивість бетону з добавкою і без добавки.

Коефіцієнт ефективності якісних показників бетону ΔP дозволяє не просто вказати на певний технічний ефект введення добавки (пластифікуючий, прискорюючий, антиморозний і т.д.) але й визначити "ціну" такого ефекту. У деяких випадках вона може бути такою, що традиційні, порівняно дешеві добавки можуть виявитися ефективнішими, ніж новітні "супердобавки". Однак, такий висновок є справедливим лише тоді, коли при порівнянні різних добавок не обов'язковою є приблизна однаковість величини досягнутого технічного ефекту. В останньому випадку, тобто при $P'_i - P_i \rightarrow \text{const}$, оцінюючим критерієм при порівнянні різних добавок є необхідні питомі витрати на них.

1. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные минеральные вяжущие материалы.- М.: Изд-во Инфра-Инженерия, 2011, 544 с. 2. Дворкин Л. Й., Рунова Р. Ф., Дворкин О. Л., Носовский Ю. Д. В'яжучі речовини.- Київ, «Основа», 2012. -448 с. 3. Дворкин Л. Й., Дворкин О. Л. Основи бетонознавства.- Київ, "Основа", 2007. - 613 с. 4. Дворкин Л. И., Соломатов В. I., Вировий В. М., Чудновський С. М. - Цементные бетоны с минеральными наполнителями. - К.: "Будівельник", 1991, 136 с.