

УДК 691.32

КРИТЕРІЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЦЕМЕНТУ І ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦЕМЕНТА И ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

EFFICIENCY OF CEMENT AND THERMAL ENERGY IN PRODUCTION CEMENT COMPOSITE CONSTRUCTION MATERIALS CRITERIA

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

Дворкин Л.И., д.т.н., профессор (Национальный университет водного хозяйства и природоиспользования, г. Ровно)

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

У статті проаналізовані основні показники, що вказують на ефективність використання цементів різного виду у бетонах розчинах. Показано зв'язок запропонованих критеріїв з різними технічними властивостями та технологічними параметрами.

В статье проанализированы основные показатели, указывающие на эффективность использования цементов различного вида в бетонах и растворах. Показано связь предлагаемых критериев с различными техническими свойствами и технологическими параметрами.

The article analyzes the main indicators pointing to the efficiency of various types of cement and concrete solutions. Showing the relationship of the proposed criteria with different technical characteristics and technological parameters.

Ключевые слова:

Витрата цементу, ефективність, шлак, зола, добавка, паливо.
Расход цемента, эффективность, шлак, зола, добавка, топливо.
Cement expense, efficiency, slag, fly-ash, additive fuel.

Основними видами композиційних будівельних матеріалів (КБМ), що застосовуються в сучасному будівництві є цементні бетони і розчини. Для оцінки ефективності використання цементу запропоновані відносні показники, що характеризують витрату цементу або його вартість на одиницю міцності, а також відношення міцності бетону до витрати цементу, тобто показник міцності бетону (розчину) на 1м³ витраченого цементу. Однак за допомогою цих показників зручно порівнювати ефективність різних цементів лише для бетонів з однаковими значеннями міцності в заданий термін і за певних умов твердіння бетону. Більш універсальним показником є коефіцієнт раціонального використання цементу $K_{р.в.ц}$ [1; 2 ; 3; 4 ; 5], що являє собою відношення питомих витрат на цемент, що витрачається на виготовлення бетону або залізобетонних виробів з визначеними властивостями при деякому еталонному варіанті, до витрат на цемент і прийоми, що сприяють зниженню його витрат, при даному технологічному рішенні:

$$K_{р.в.ц} = \frac{S_{ц,ет}}{S_{ц} + S_{т.п}} = \frac{C_{ц,ет} \cdot \Pi_{ет}}{C_{ц} \cdot \Pi + S_{т.п}}, \quad (1)$$

де $S_{ц,ет}$ і $S_{ц}$ – питомі витрати на цемент, що витрачається на 1 м³ бетону або визначену конструкцію відповідно при еталонному і даному варіантах технологічного рішення; $S_{т.п}$ – питомі приведені витрати на комплекс технологічних прийомів, спрямованих на скорочення витрати цементу без погіршення якості бетону (введення добавок, електро- або паророзігрів суміші і т.д.); $C_{ц,ет}$ і $C_{ц}$ – вартості відповідно еталонного і застосованого цементів; $\Pi_{ет}$ і Π – витрати умовно еталонного і порівнювального цементів для одержання бетону з заданими проектними вимогами.

Вартісний критерій $K_{р.в.ц}$ при однаковій вартості еталонного і порівнюваного цементів перетворюється у фізичний – відносну витрату цементу, що виражається, наприклад, відношенням витрати цементу для одержання бетону визначеної якості при нормальному твердінні до необхідної витрати цементу при тепловій обробці.

Критерій $K_{р.в.ц}$ може служити для аналізу ефективності цементів різної вартості і якості при зміні активності, нормальної густоти і т.д. В табл.1 для прикладу показана зміна витрати шлакопортландцементу і портландцементу з мінеральними добавками, питомої витрати цементу на одиницю міцності і $K_{р.в.ц}$ зі зміною рухливості бетонної суміші і класу бетону на щебені з найбільшої крупністю 20 мм, що піддається тепловій обробці до 85 % проектної міцності. При розрахунку $K_{р.в.ц}$ в якості умовно еталонного використана витрата портландцементу М500, необхідного для одержання бетону відповідних класів при нормальному твердінні. З табл.1 видно, що якщо питома витрата цементу марок 400 і 500 на одиницю міцності знижується з підвищенням міцності бетону приблизно однаково, та зміна $K_{р.в.ц}$ істотно відрізняється; для бетонів на цементі марки 400 $K_{р.в.ц}$

залишається практично однаковим в міру підвищення міцності бетону, а на цементі марки 500 він помітно збільшується. Така зміна $K_{p,v,II}$ наочно показує підвищення ефективності цементу марки 500 в міру зростання класу (марки) бетону. Для бетону класу В15 цемент марки 500 менш ефективний, чим цемент марки 400, що обумовлено меншою вартістю останнього.

Таблиця 1

Ефективність цементів в бетонах

Проектний клас (марка) бетону	Осадка конуса бетонної суміші, см	Витрата цементу, кг/м ³		Питома витрата цементу на одиницю міцності		$K_{p,v,II}$	
		M400	M500	M400	M500	M400	M500
В15 (M200)	4...6	355	315	1,775	1,575	$\frac{0,7}{0,98}$	$\frac{0,78}{0,95}$
	1...3	335	295	1,675	1,475	$\frac{0,69}{0,98}$	$\frac{0,78}{0,96}$
В20 (M250)	4...6	405	360	1,620	1,440	$\frac{0,72}{1,03}$	$\frac{0,81}{0,99}$
	1...3	385	340	1,540	1,360	$\frac{0,71}{1,03}$	$\frac{0,71}{1,0}$
В22,5 (M300)	4...6	485	410	1,617	1,433	$\frac{0,73}{1,04}$	$\frac{0,82}{1,00}$
	1...3	430	385	1,433	1,283	$\frac{0,73}{1,05}$	$\frac{0,82}{1,01}$
В25 (M350)	4...6	530	460	1,510	1,310	$\frac{0,73}{1,04}$	$\frac{0,83}{1,02}$
	1...3	495	430	1,410	1,230	$\frac{0,73}{1,05}$	$\frac{0,84}{1,04}$

Примітка. В чисельнику приведений $K_{p,v,II}$ для бетонів на портландцементі, у знаменнику – на шлакопортландцементі.

Величина $K_{p,v,II}$ показує ефективність застосування шлакопортландцементу в умовах теплової обробки при підвищених вимогах до міцності. Питома витрата цементів на одиницю міцності при цьому в умовах приведенного приклада практично однакова.

За допомогою $K_{p,v,II}$ можна оцінювати ефективність використання цементу при аналізі не тільки технологічних, але і проектних рішень, пов'язаних зі зниженням матеріалосемності виробів і конструкцій. Наприклад, при порівняльній оцінці бетону в конструкціях по міцності зручно використовувати вираз:

$$K'_{\text{р.в.ц}} = \frac{S_{\text{ц}}^0 V}{(S'_{\text{ц}} + S_{\text{т.п}}) V'}, \quad (2)$$

де $S_{\text{ц}}^0, S'_{\text{ц}}$ – витрати на цемент для одержання 1 м^3 бетону відповідно еталонної і порівнюваної міцності; V і V' – об'єм відповідно еталонної і порівнюваної конструкції; $S_{\text{т.п}}$ – додаткові витрати, пов'язані зі зміною міцності бетону в конструкції.

При виготовленні конструкцій з високоміцного бетону, незважаючи на збільшення витрати цементу на 1 м^3 бетону в результаті зменшення перерізу й об'єму виробів, ефективність використання цементу виявляється більш високою.

З використанням цементу пов'язані і загальні енерговитрати у виробництві збірного залізобетону.

Для оцінки ефективності рецептурно - технологічних параметрів виробництва КБМ важливе значення набувають критерії енергетичних витрат. З позицій народногосподарської ефективності критерії енергетичних витрат повинні відображати питомі витрати теплової та електричної енергії, не тільки пов'язані безпосередньо з отриманням бетонної (розчинової) суміші, виробів і конструкцій, але і використані на отримання вихідних компонентів і, в першу чергу, цементу. Енерговитрати, пов'язані з отриманням цементу, що витрачаються на 1 м^3 бетону з проектною 28 - добовою міцністю 20 - 50 МПа складають (для портландцементу і портландцементу з мінеральними добавками) 60 - 177 кг умовного палива, тоді як сумарна витрата теплової енергії безпосередньо у виробництві збірного залізобетону в середньому не перевищує 70 , а на передових заводах - 43 кг умовного палива на 1 м^3 . До 70% енерговитрат у виробництві збірного залізобетону витрачається на теплову обробку виробів.

Грунтуючись на структурі енерговитрат можна стверджувати, що народногосподарська ефективність використання енергоресурсів у виробництві бетону і виробів на його основі обумовлена, в основному, оптимальністю технологічних параметрів, що визначають витрати цементу в бетоні (особливо його клінкерної складової) і витрати палива при тепловій обробці виробів.

Найважливіші аспекти раціонального використання цементів у бетоні з позицій ефективності використання теплової енергії проаналізовані в роботах Л.А. Малініної, виконаних у НДІЗБ, [6], де вперше на основі розрахункових значень питомих витрат палива показана важливість раціонального вибору виду цементів та використання в них мінеральних добавок.

Раціональним критерієм раціонального використання енергетичних витрат ($K_{\text{р.в.т}}$) можна прийняти відносну питому витрату умовного палива (теплової енергії) на виробництво 1 м^3 бетону або виробів на його основі, включаючи витрату палива на виробництво цементу [7]:

$$K_{p.v.t} = \frac{C_{ет} \cdot T_{ц.ет} + T_{дод}}{C \cdot T_{ц} + T_{т.о} + T'_{дод}}, \quad (3)$$

де $C_{ет}$ і C - витрати умовно еталонного і порівнюваного цементів в $кг/м^3$ для отримання бетону із заданими проектними вимогами; $T_{ц.ет}$ і $T_{ц}$ - витрата умовного палива для отримання 1 кг еталонного і порівнюваного цементів; $T_{т.о}$ - витрата умовного палива на теплову обробку виробів; $T_{дод}$, $T'_{дод}$ - додаткові витрати палива на технологічні потреби для порівнюваних бетонів.

Пропонований критерій дозволяє привести в співставимий вид енерговитрати на отримання бетонів з різними показниками властивостей і оцінити ефективність використання теплової енергії в різних складах бетону як в умовах нормального твердіння, так і при тепловій обробці. За допомогою критерію $K_{p.v.t}$ можливо вибрати оптимальні по витраті палива режими теплової обробки. При порівнянні бетонів нормального твердіння і підданих тепловій обробці чим ближче виявляється по величині $K_{p.v.t}$ до 1 (за умови застосування однакових видів і марок цементу в еталонному і порівняльному варіантах) тим енергетично ефективніший процес прискореного твердіння бетонів. За допомогою критерію $K_{p.v.t}$ можна порівняти також енергетичну ефективність різних технологічних рішень - введення мінеральних і хімічних добавок, розігріву бетонної суміші та ін.

За допомогою перехідних коефіцієнтів при розрахунку $K_{p.v.t}$ можна враховувати поряд з тепловою і витрати електроенергії ($1кВт.год \approx 0,34кг$ умовного палива). Всі можливі технологічні рішення, що призводять до збільшення $K_{p.v.t}$ без неприпустимого зниження продуктивності лінії і істотного збільшення витрат, є прогресивними і можуть бути рекомендовані до впровадження.

Розглянемо основні закономірності зміни $K_{p.v.t}$ при зміні основних рецептурно-технологічних параметрів виробництва бетону, бетонних та залізобетонних виробів.

Прийmemo як еталонну при розрахунках за формулою (3) витрату умовного палива для отримання бетону із заданими вимогами при нормальному твердінні та застосуванні бездобавочного портландцементу М500 з нормальною густиною $НГ=27\%$. Усереднена питома витрата умовного палива, необхідна для отримання 1 т бездобавочного портландцементу марок 400 і 500 при мокрому способі виробництва клінкеру становить відповідно 280 і 291 кг [8]. Зміна $НГ$ цього цементу за постійної активності може бути обумовлена коливаннями мінералогічного складу і структури клінкеру, зернового складу цементного порошку [4]. Для портландцементів з мінеральними добавками істотна зміна $НГ$ пов'язана зазвичай зі зміною вмісту та виду активної мінеральної добавки. Компенсація зміни активності цементу при цьому регулюється зазвичай тонкістю помелу. За даними [7] зміна $НГ$ портландцементу з мінеральними добавками М400

від 25 до 29% викликає збільшення витрати умовного палива з 233 до 243 кг, а М500 з 254 до 263 кг.

У бетонах збільшення нормальної густоти цементу пов'язане із збільшенням водопотреби бетонних сумішей і в результаті - збільшенням витрати цементу.

Таблиця 2

Значення $K_{p,v,t}$ для бетонів при зміні НГ і марки цементу
(твердіння нормальне 28 діб)

Вид цементу	НГ %	Марка цементу	Проектна міцність бетону, МПа					
			20	25	30	35	40	50
Бездобавочний портландцемент	25	400	<u>0,98</u>	<u>0,96</u>	<u>0,94</u>	<u>0,92</u>	-	-
			1,06	1,03	1,00	0,98	-	-
	27	400	<u>0,95</u>	<u>0,92</u>	<u>0,90</u>	<u>0,87</u>	-	-
			1,02	1,0	0,96	0,90	-	-
25	500	<u>1,01</u>	<u>1,02</u>	<u>1,03</u>	<u>1,03</u>	<u>1,04</u>	<u>1,06</u>	
		1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,07	
27	500	1	1	1	1	<u>1</u>	<u>1</u>	
Портландцемент з мінеральними добавками	25	400	<u>1,17</u>	<u>1,15</u>	<u>1,11</u>	<u>1,10</u>	-	-
			1,27	1,23	1,20	1,16	-	-
	27	400	<u>1,13</u>	<u>1,09</u>	<u>1,07</u>	<u>1,03</u>	-	-
			1,21	1,19	1,14	1,07	-	-
	29	400	<u>1,03</u>	<u>1,01</u>	<u>0,97</u>	<u>0,94</u>	-	-
			1,13	1,11	1,03	0,96	-	-
	25	500	<u>1,15</u>	<u>1,16</u>	<u>1,18</u>	<u>1,19</u>	<u>1,20</u>	<u>1,22</u>
			1,15	1,16	1,17	1,17	1,20	1,23
27	500	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	
29	500	<u>1,08</u>	<u>1,07</u>	<u>1,05</u>	<u>1,03</u>	<u>1,03</u>	<u>1,01</u>	
		1,07	1,06	1,05	1,03	1,02	1,00	

Примітка. У чисельнику наведена величина K_{pvt} для бетонів з Ж = 10-20 с, у знаменнику з ОК = 10-12 см.

У табл.2 і 3 наведені розрахункові дані впливу нормальної густоти цементу на величину $K_{p,v,t}$ для бетонів з різною проектною міцністю виготовлених на портландцементі і портландцементі з мінеральними добавками в умовах нормального твердіння і при тепловій обробці. Розрахунки $K_{p,v,t}$ проводили стосовно складів бетону, підібраних на чистоклінкерному портландцементі ПАТ "Волинь-цемент" і портландцементі цього заводу, що містить 20% доменного шлаку. Збільшення нормальної густоти цементів з 25 до 27% досягали при застосуванні клінкеру з більш високим вмістом трикальцієвого алюмінату, до 29% додатковим введенням в цемент при помелі 10% опоки. Регулювання марки цементу забезпечувалося зміною тонкості помелу цементу.

Бетон виготовляли із застосуванням середньозернистого кварцового піску і гранітного щебеню фракції 5...20 мм. Витрату умовного палива на теплову

обробку бетону розраховували відповідно до "Тимчасових норм розрахунку витрати теплової енергії при тепловологісній обробці збірних бетонних та залізобетонних виробів в заводських умовах" (БН513-79).

Таблиця 3

Значення $K_{p,r,t}$ для бетонів при зміні НГ і марки цементу в умовах теплової обробки (відпускна міцність 50% проектної, ОК = 4...6 см)

Вид цементу	НГ, %	Марка цементу	Проектна міцність бетону, МПа					
			20	25	30	35	40	50
Портландцемент	25	400	<u>0.71</u>	<u>0.71</u>	<u>0.71</u>	<u>0.70</u>	<u>0.68</u>	-
			0,72	0,72	0,74	0,74	-	-
	27	400	<u>0.69</u>	<u>0.69</u>	<u>0.68</u>	<u>0.67</u>	-	-
			0,70	0,71	0,71	0,71	-	-
	25	500	<u>0.72</u>	<u>0.74</u>	<u>0.78</u>	<u>0.81</u>	<u>0.84</u>	<u>0.89</u>
			0,74	0,76	0,79	0,83	0,87	0,95
	27	500	<u>0.70</u>	<u>0.72</u>	<u>0.75</u>	<u>0.78</u>	<u>0.80</u>	-
			0,72	0,74	0,77	0,81	0,84	-
Портландцемент з мінеральними добавками	25	400	<u>0.81</u>	<u>0.81</u>	<u>0.82</u>	<u>0.82</u>	-	-
			0,83	0,83	0,85	0,86	-	-
	27	400	<u>0.78</u>	<u>0.78</u>	<u>0.78</u>	<u>0.76</u>	-	-
			0,80	0,80	0,81	0,82	-	-
	29	400	<u>0.73</u>	<u>0.73</u>	<u>0.72</u>	<u>0.69</u>	-	-
			0,75	0,75	0,75	0,75	-	-
	25	500	<u>0.79</u>	<u>0.83</u>	<u>0.86</u>	<u>0.90</u>	<u>0.93</u>	<u>1.00</u>
			0,81	0,83	0,88	0,92	0,97	1,06
	27	500	<u>0.76</u>	<u>0.79</u>	<u>0.83</u>	<u>0.86</u>	<u>0.89</u>	-
			0,80	0,81	0,85	0,88	0,92	1,00
29	500	<u>0.68</u>	<u>0.72</u>	<u>0.78</u>	<u>0.80</u>	<u>0.82</u>	-	
		0,75	0,77	0,80	0,84	0,86	-	

Примітка. В чисельнику – тривалість теплової обробки 10 год, в знаменнику – 14 год.

Аналіз отриманих даних показує, що вміст клінкеру і нормальна густина цементу істотно впливають на величину $K_{p,r,t}$. З позицій раціонального використання теплової енергії застосування портландцементу з мінеральними добавками виявляється енергетично більш ефективно в порівнянні з бездобавочним портландцементом навіть при більш високих значеннях НГ. Підвищення витрати палива із збільшенням НГ цементу стає все більш істотним в міру підвищення міцності бетону, рухомості бетонної суміші, скорочення тривалості теплової обробки, підвищення рівня відпускної міцності. При високій нормальній густоті енергетична ефективність портландцементу з мінеральними добавками в порівнянні з чистоклінкерним портландцементом із зниженою водопотребою помітно зменшується.

За нормальних умов тверднення, як випливає з табл.2, для бетонів до проектної міцності 40 МПа включно портландцемент з мінеральними

добавками навіть при НГ = 29% залишається більш енергетично вигідним ніж бездобавочний портландцемент з НГ = 25%. При подальшому підвищенні міцності бетону енергетична ефективність цементів з високим значенням НГ стає незначною або взагалі відсутня. Аналогічний висновок можна зробити і з аналізу даних зміни $K_{p,в,т}$ при тривалості теплової обробки 14 годин і більше (табл.3 і 4). При загальній тривалості теплової обробки 10 год, тобто при порівняно форсованих режимах при вказаному розходженні в нормальній густоті застосування портландцементу з мінеральними добавками як М400, так і М500 стає енергетично малоефективним при відпускній міцності 70% і більше від проектної практично в усьому дослідженому діапазоні класів бетону (табл.3).

Таблиця 4

Значення $K_{p,в,т}$ для бетонів при зміні НГ і марки цементу
(тверднення в умовах теплової обробки, $\tau = 14$ год, ОК = 4...6 см)

Вид цементу	НГ, %	Марка цементу	Проектна міцність бетону, МПа					
			20	25	30	35	40	50
Портланд-цемент	25	400	<u>0,68</u>	<u>0,69</u>	<u>0,72</u>	<u>0,74</u>	-	-
			0,56	0,54	0,44	-	-	-
	27	400	<u>0,65</u>	<u>0,67</u>	<u>0,69</u>	<u>0,72</u>	-	-
			0,55	0,52	0,49	-	-	-
	25	500	<u>0,68</u>	<u>0,71</u>	<u>0,76</u>	<u>0,81</u>	<u>0,87</u>	<u>0,94</u>
			0,57	0,59	0,61	0,71	0,65	-
	27	500	<u>0,66</u>	<u>0,70</u>	<u>0,74</u>	<u>0,79</u>	<u>0,84</u>	-
			0,55	0,58	0,6	0,62	-	<u>0,89</u>
Портланд-цемент з мінеральними добавками	25	400	<u>0,75</u>	<u>0,79</u>	<u>0,83</u>	<u>0,85</u>	-	-
			0,63	0,62	0,61	-	-	-
	27	400	<u>0,73</u>	<u>0,76</u>	<u>0,79</u>	<u>0,81</u>	-	-
			0,6	0,59	0,58	-	-	-
	29	400	<u>0,70</u>	<u>0,71</u>	<u>0,73</u>	<u>0,76</u>	-	-
			0,57	0,55	-	-	-	-
	25	500	<u>0,74</u>	<u>0,79</u>	<u>0,85</u>	<u>0,9</u>	<u>0,97</u>	<u>1,02</u>
			0,64	0,66	0,68	0,79	-	-
27	500	<u>0,73</u>	<u>0,77</u>	<u>0,81</u>	<u>0,87</u>	<u>0,92</u>	<u>0,98</u>	
		0,62	0,63	0,66	0,76	-	-	
29	500	<u>0,69</u>	<u>0,72</u>	<u>0,77</u>	<u>0,82</u>	<u>0,86</u>	<u>0,91</u>	
		0,57	0,59	0,61	0,71	-	-	

Примітка. В чисельнику приведена величина $K_{p,в,т}$ для бетонів при 70% відпускної міцності, в знаменнику – 100%.

Очевидно, найбільш ефективними є портландцементи з добавками доменних шлаків, золи-виносу та інших мінеральних добавок, що не викликають підвищення нормальної густоти.

Отримані дані ще раз підтверджують висновок [9] про неможливість однозначно стверджувати про ефективність чи неефективність портландцементів з дисперсними мінеральними добавками, що мають порівняно підвищену водопотребу. Простежимо зміну $K_{p,v,t}$ з підвищенням міцності бетону при різних умовах тверднення. В умовах нормального тверднення підвищення проектної міцності бетону неоднаково відображається на відносній питомій витраті палива при використанні цементів марок 400 і 500. У першому випадку (табл.4) з підвищенням 28-добової міцності бетону від 20 до 35 МПа $K_{p,v,t}$ зменшується на 6 - 10% залежно від нормальної густоти. Це пояснюється дещо більш інтенсивним ростом витрати цементу М400 з підвищенням класу бетону по міцності ніж цементу М500. В умовах теплової обробки при нефорсованих режимах ($\tau \geq 14$ год) зі збільшенням класу бетону $K_{p,v,t}$ зростає при використанні цементу як М400 так і М500, хоча в останньому випадку і більш інтенсивно (табл.3). Цей висновок може виявитися невірним лише при форсованих режимах або при 100% рівні відпускної міцності, тобто в тих випадках, які характеризуються різким збільшенням витрати цементу в міру підвищення класу бетону і в той же час порівняно невеликою витратою палива на теплову обробку (табл. 4).

При оцінці відносного зменшення витрати палива зі збільшенням проектної міцності бетону слід мати на увазі, що абсолютна його витрата значно зростає у зв'язку зі збільшенням витрати цементу. Абсолютні енерговитрати на бетон з проектною міцністю 50МПа (В40) майже в 2 рази більші ніж на бетон класу В15 (проектна міцність 20 МПа). Відношення витрати умовного палива при тепловій обробці до необхідної витрати палива при нормальному твердненні, тобто величина $K_{p,v,t}$ в порівнюваних варіантах виявляється нижчою при використанні цементу М500 на 20-25% (табл.2...4). Останній висновок можна пояснити тим, що витрата теплової енергії безпосередньо на теплову обробку при постійній тривалості процесу істотно не залежить від класу бетону за міцністю, що і відображено в БН 513-79. Таким чином, за енергозатратами, які витрачаються безпосередньо на виробництво виробів та конструкцій, застосування бетону підвищених марок виявляється більш вигідним. Для оцінки народногосподарської ефективності абсолютні енерговитрати на високоміцні бетони та бетони рядових марок правильно порівнювати, очевидно, при отриманні конструкцій однаковою несучою здатності. У цьому випадку для ряду конструкцій в результаті зменшення перерізу і, таким чином, питомої витрати цементу, а також витрати арматури високоміцні бетони повинні виявитися ефективнішими звичайних як з позиції енергетичних так і загальних приведених витрат на виготовлення конструкцій.

Розрахунки $K_{p,v,t}$ (табл.4) показують наскільки істотні резерви економії теплової енергії відкривають зниження величини відпускної міцності бетону. Так, з даних табл.3...4 випливає, що послідовне підвищення відпускної

міцності з 50 до 70, а потім до 100% проектної при тривалості теплової обробки 14 годин для бетону з проектною міцністю 30 МПа на цементі М500 з НГ = 27% потребує збільшення витрати умовного палива відповідно на 4 і 22%. При 10-годинному режимі пропарювання підвищення витрати умовного палива становить відповідно 8 і 35%. Значна частка цих енергетичних витрат може бути компенсована врахуванням наступного за пропарюванням росту міцності бетону і введенням прискорювачів тверднення.

Введення, зокрема, прискорювачів тверднення в оптимальній кількості дозволяє при 9...14 годинних режимах забезпечити приріст міцності через 4 години після пропарювання 10...15% від проектної, врахування наступного росту міцності протягом 24 годин ще 5...10%.

Економія палива при зниженні відпускну міцності або введенні добавок можлива як за рахунок зменшення витрати цементу, так і в результаті скорочення тривалості або зниження температури теплової обробки. Широке впровадження в практику виробництва бетону, виробів і конструкцій на його основі ефективних хімічних добавок і перш за все суперпластифікаторів відкрило великі можливості зниження енергетичних витрат. Вибір варіанту застосування добавок повинен визначатися, очевидно, конкретними умовами підприємства: дефіцитністю цементу і теплової енергії, організацією виробництва і необхідністю скорочення тривалості теплової обробки або взагалі переходу на безпрогрівну технологію виготовлення виробів. Енергетична ефективність добавок проявляється не тільки в результаті їх пластифікуючої і прискорюючої дії тверднення. Застосування ряду добавок дозволяє зменшити енергетичні витрати, знизивши витрату цементу при отриманні, наприклад, бетонів з рівною морозостійкістю або водонепроникністю за рахунок повітрявтягувальної або кольматуючої дії.

У виробничих умовах при оцінці впливу різних технологічних факторів на енергетичні витрати необхідно враховувати експлуатаційні втрати тепла, які поки що складають суттєво значну долю в тепловому балансі заводів збірного залізобетону. Ці втрати можуть відчутно впливати на оцінку ступеня раціонального використання палива і вибір оптимальних режимів.

1. Дворкин Л.И. Снижение расхода цемента и топлива в производстве сборного железобетона К.: "Вища школа", 1985, 170 с.; 2. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Горячих М.В., Шмигальський В.Н. Проектирования і анализ эффективности составов бетона. НУВГП, Рівне, 2009, 173 с.; 3. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Критерий рационального использования тепловой энергии в производстве бетона и железобетонных изделий. Технологии бетонов, №2, 2014, С.4-7; 4. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетонознатства. Основа, Київ, 2007, 613 с.; 5. Дворкин Л.И. Оптимальное проектирование составов бетонов. - Львов: Вища школа, 1989. - 160 с. 6. Малинина Л.А. Снижение энергзатрат путем рационального выбора цементов. //Бетон и железобетон, №3, 1982. - С.8-9; 7. Дворкин Л.И. Многофакторное прогнозирование свойств бетона и анализ эффективности их обеспечения. Автореф. дис. докт. техн. наук. - М.: МИСИ, 1983. - 45 с.