

УДК 666.972

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ СВОЙСТВ  
БЕТОНА С ПОЗИЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ**

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ДОСЯГНЕННЯ НЕОБХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
БЕТОНУ З ПОЗИЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ**

**EFFICIENCY DESIRED PROPERTIES CONCRETE POSITIONS OF  
ENERGY COSTS**

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

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

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

В статье предлагается для оценки достижения требуемых свойств бетона, с позиции энергетических затрат, критерий рационального использования топлива ( $K_{рит}$ ). Анализируется влияние на величину  $K_{рит}$  вида цемента, его нормальной плотности, длительность тепловой обработки, величины отпускной прочности, применение добавок.

У статті пропонується для оцінки досягнення необхідних властивостей бетону, з позиції енергетичних витрат, критерій раціонального використання палива ( $K_{рвп}$ ). Аналізується вплив на величину  $K_{рвп}$  виду цементу, його нормальної густоти, тривалість теплової обробки, величини відпускнуї міцності, застосування добавок.

The paper proposes to assess the achievement of the desired properties of the concrete, from the standpoint of energy costs, the criterion of rational use of fuel ( $C_{ruf}$ ). Analyzes the impact on the value of  $C_{ruf}$  type of cement, its normal density, the duration of the heat treatment, the values of handling strength, the use of additives.

**Ключевые слова:**

Бетон, топливо, критерий рационального использования топлива, прочность.  
Бетон, паливо, критерій раціонального використання палива, міцність.  
Concrete, fuel, fuel efficient criterion, strength.

**На современном этапе развития всех отраслей промышленности,** в том числе производства бетона и железобетонных конструкций для оценки эффективности рецептурно-технологических параметров важнейшее значение приобретают критерии энергетических затрат. С позиций народнохозяйственной эффективности критерии энергетических затрат должны отражать удельные затраты тепловой и электрической энергии, не только связанные непосредственно с получением бетонной смеси, изделий и конструкций, но и использованные на получение исходных компонентов и, в первую очередь, цемента, а для железобетонных конструкций и стальной арматуры. Энергозатраты, связанные с получением цемента, расходуемого на 1 м<sup>3</sup> бетона с проектной 28-суточной прочностью 20 – 50 МПа, составляют для портландцемента и портландцемента с минеральными добавками 60 – 177 кг условного топлива, в то время как суммарный расход тепловой энергии непосредственно в производстве сборного железобетона в среднем не превышает 70, а на передовых заводах – 43 кг условного топлива на 1 м<sup>3</sup>. До 70 % энергозатрат в производстве сборного железобетона расходуется на тепловую обработку изделий.

Основываясь на структуре энергозатрат, не учитывая удельные затраты энергии на получение стальной арматуры, можно утверждать, что народнохозяйственная эффективность использования энергоресурсов в производстве бетона и изделий на его основе обусловлена, в основном, оптимальностью технологических параметров, определяющих расход цемента в бетоне (особенно его клинкерной составляющей) и расход топлива при тепловой обработке изделий.

Важнейшие аспекты рационального использования цемента в бетоне с позиций эффективности использования тепловой энергии проанализированы в работах Л. А. Малининой, выполненных в НИИЖБе, [1,2], где впервые на основе расчетных значений удельных расходов топлива показана важность рационального выбора вида цемента и использования в них минеральных добавок.

В качестве одного из критериев рационального использования энергетических затрат можно принять относительный удельный расход условного топлива на производство 1 м<sup>3</sup> бетона или железобетонных изделий, включая расход топлива на производство цемента ( $K_{\text{рит}}$ ):

$$K_{\text{рит}} = \frac{C_{\text{эт}} \cdot T_{\text{у,эт}} + T_{\text{доп}}}{C \cdot T_{\text{у}} + T_{\text{т.о}} + T'_{\text{доп}}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{эт}}$  и  $C$  – расход условно эталонного и сравниваемого цемента в кг/м<sup>3</sup> для получения бетона с заданными проектными требованиями;  $T_{\text{у,эт}}$  и  $T_{\text{у}}$  – расход условного топлива для получения 1 кг эталонного и сравниваемого цемента;  $T_{\text{т.о}}$  – расход условного топлива на тепловую обработку изделий;  $T_{\text{доп}}, T'_{\text{доп}}$  – дополнительные затраты топлива на технологические цели.

Предлагаемый критерий позволяет привести в сопоставимый вид энергозатраты на получение бетонов с различными показателями свойств и оценить эффективность использования тепловой энергии в различных составах бетона, как в условиях нормального твердения, так и при тепловой обработке. С помощью критерия  $K_{pum}$  представляется возможным выбрать оптимальные по расходу топлива режимы тепловой обработки. При сравнении бетонов нормального твердения и подвергнутых тепловой обработке чем ближе, оказывается по величине  $K_{pum}$  к 1 (при условии применения одинаковых видов и марок цемента в эталонном и сравниваемом вариантах), тем энергетически эффективнее процесс ускоренного твердения бетонов. С помощью критерия  $K_{pum}$  можно сравнить также энергетическую эффективность различных технологических решений - введение минеральных и химических добавок, разогрева бетонной смеси и т.д.

С помощью переводных эквивалентов при расчете  $K_{pum}$  можно учитывать наряду с тепловой и расход электроэнергии (1квт.ч—0,34кг условного топлива). Все возможные технологические решения, приводящие к увеличению  $K_{pum}$  без недопустимого снижения производительности линии и существенного увеличения затрат, являются прогрессивными и могут быть рекомендованы к внедрению.

**Рассмотрим основные закономерности изменения  $K_{pum}$  при изменении основных рецептурно-технологических параметров производства бетона, бетонных и железобетонных изделий.**

Примем в качестве эталонного при расчетах по формуле (1) расход условного топлива для получения бетона с заданными требованиями при нормальном твердении и применении бездобавочного портландцемента М500 с нормальной плотностью НГ=27%. Усредненный удельный расход условного топлива, необходимый для получения 1 т бездобавочного портландцемента марок 400 и 500 при мокром способе производства клинкера составляет соответственно 280 и 291 кг[1]. Изменение НГ этого цемента при постоянной активности может быть обусловлено колебаниями минералогического состава и структуры клинкера, зернового состава цементного порошка [3].

Для портландцементов с минеральными добавками существенное изменение НГ сопряжено обычно с изменением содержания и вида активной минеральной добавки. Компенсация изменения активности цемента при этом регулируется обычно тонкостью помола. По данным [1] изменение НГ портландцемента с минеральными добавками М400 от 25 до 29% вызывает увеличение расхода условного топлива с 233 до 243 кг, а М500 с 254 до 263 кг.

В бетонах увеличение нормальной плотности цемента сопряжено с увеличением водопотребности бетонных смесей и в результате — увеличением расхода цемента [4].

В табл.1 и 2 приведены расчетные данные влияния нормальной густоты цемента на величину  $K_{р\text{ит}}$  для бетонов с различной проектной прочностью изготовленных на портландцементе и портландцементе с минеральными добавками в условиях нормального твердения и при тепловой обработке.

Расчеты  $K_{р\text{ит}}$  производили применительно к составам бетона, подобранным на чистоклинкерном портландцементе ПАТ "Волинь-цемент" и портландцементе этого завода, содержащем 20% доменного шлака. Увеличение нормальной густоты цементов с 25 до 27% достигали применением клинкера с более высоким содержанием трехкальциевого алюмината, до 29% дополнительным введением в цемент при помоле 10% опоки. Регулирование марки цемента обеспечивалось изменением тонкости помола цемента.

Бетон изготавливали с применением среднезернистого кварцевого песка и гранитного щебня фракции 5...20 мм. Расход условного топлива на тепловую обработку бетона рассчитывали в соответствии с "Временными нормами расчета расхода тепловой энергии при тепловлажностной обработке сборных бетонных и железобетонных изделий в заводских условиях" (СН513-79).

Таблица 1

Значения  $K_{р\text{ит}}$  для бетонов при изменении НГ и марки цемента(твердение нормальное 28 сут)

Вид цемента	НГ %	Мар-ка цемента	Проектная прочность бетона, МПа					
			20	25	30	35	40	50
Бездоба-вочный портланд-цемент	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	1	1
	Портландцемент с минеральными добавка-ми	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	

Примечание. В числителе приведена величина  $K_{р\text{ит}}$  для бетонов с Ж=10-20 с, в знаменателе с ОК= 10-12 см.

Анализ полученных данных показывает, что содержание клинкера и нормальная густота цемента существенно влияют на величину  $K_{put}$ . С позиций рационального использования тепловой энергии применение портландцемента с минеральными добавками оказывается энергетически более эффективно по сравнению с бездобавочным портландцементом даже при более высоких значениях НГ. Повышение расхода топлива с увеличением НГ цемента становится все более существенным по мере повышения прочности бетона, подвижности бетонной смеси, сокращения длительности тепловой обработки, повышения уровня отпускной прочности. При высокой нормальной густоте энергетическая эффективность портландцемента с минеральными добавками по сравнению с чистоклинкерным портландцементом с пониженной водопотребностью заметно падает.

Таблица 2

Значения  $K_{put}$  для бетонов при изменении НГ и марки цемента в условиях тепловой обработки (отпускная прочность 50% проектной, ОК=4 – 6 см)

Вид цемента	НГ %	Мар-ка цемента	Проектная прочность бетона, 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	
			<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 с минеральными добавка-ми	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	-		

Примечание. В числителе – длительность тепловой обработки 10 час, в знаменателе – 14 час.

При нормальных условиях твердения, как следует из табл.1, для бетонов до проектной прочности 40 МПа включительно портландцемент с минеральными добавками даже при НГ = 29% остается более энергетически выгодным чем бездобавочный портландцемент с НГ = 25%. При дальнейшем повышении прочности бетона энергетическая эффективность цементов с

высоким значением НГ становится незначительной или вообще отсутствует. Аналогичный вывод можно сделать и из анализа данных изменения  $K_{put}$  при длительности тепловой обработки 14 час и более

(табл.2 и 3). При общей длительности тепловой обработки 10 час, т.е. при сравнительно форсированных режимах при указанном различии в нормальной густоте применение портландцемента с минеральными добавками как М400, так и М500 становится энергетически малоэффективным при отпускной прочности 70% и более от проектной практически во всем исследованном диапазоне классов бетона (табл.3).

Очевидно, наиболее эффективны портландцементы с добавками доменных шлаков, золы-уноса и других минеральных добавок, не вызывающих повышение нормальной густоты.

Полученные данные еще раз подтверждают вывод [2] о невозможности однозначно утверждать об эффективности или неэффективности портландцементов с дисперсными минеральными добавками, имеющих сравнительно повышенную водопотребность. Рациональная область применения этих цементов ограничивается бетонами умеренных классов по прочности, применяемыми при монолитных бетонных работах и для производства сборного железобетона при нефорсированных режимах тепловой обработки. Вместе с тем, очевидно, что повышение нормальной густоты цемента заметно снижает его качество даже при условии сохранения активности. Этот факт, хорошо доказанный практическим опытом, к сожалению, не учитывается при стандартизации технических требований к цементам и формировании цены.

Таблица 3

Значения  $K_{put}$  для бетонов при изменении НГ и марки цемента (твердение в условиях тепловой обработки,  $\tau = 14$  час, ОК= 4–6 см)

Вид цемента	НГ %	Марка цемента	Проектная прочность бетона, 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>	<u>0,89</u>
			0,55	0,58	0,6	0,62	-	-

Продолжение табл. 3

Портландцемент с минеральными 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	-	-

Примечание. В числителе приведена величина  $K_{put}$  для бетонов при 70% отпускной прочности, в знаменателе – 100%.

Представляет интерес проследить изменение  $K_{put}$  по мере повышения прочности бетона при различных условиях твердения. В условиях нормального твердения повышение проектной прочности бетона неодинаково отражается на относительном удельном расходе топлива при использовании цементов марок 400 и 500. В первом случае (табл.1) с повышением 28-суточной прочности бетона от 20 до 35 Крит уменьшается на 6 – 10% в зависимости от нормальной плотности. Это объясняется несколько более интенсивным ростом расхода цемента М400 с повышением класса бетона по прочности чем М500. В условиях тепловой обработки при нефорсированных режимах ( $\tau \geq 14$  ч) с увеличением класса бетона  $K_{put}$  растет при использовании цемента как М400 так и М500, хотя в последнем случае и более интенсивно (табл.2). Этот вывод может оказаться неверным лишь при форсированных режимах или при 100% уровне отпускной прочности, т.е. в тех случаях, которые характеризуются резким увеличением расхода цемента по мере повышения класса бетона и в то же время сравнительно небольшим расходом топлива на тепловую обработку (табл.3).

При оценке относительного уменьшения расхода топлива с повышением проектной прочности бетона следует иметь ввиду, что абсолютный его расход естественно значительно растет в связи с увеличением расхода цемента. Абсолютные энергозатраты на бетон с проектной прочностью 50МПа (В40) примерно в 3 раза больше чем на бетон класса В15 (проектная прочность 20 МПа) [2]. Отношение расхода условного топлива при тепловой обработке к необходимому расходу топлива при нормальном твердении, т.е. величина  $K_{put}$  в сравниваемом варианте оказывается ниже при использовании цемента М500 на 20-25% (табл.1 – 3). Последний вывод можно объяснить тем, что расход тепловой энергии непосредственно на тепловую обработку при постоянной длительности процесса существенно не зависит от класса бетона по прочности, что и отражено в СН 513-79. Таким

образом, по энергозатратам, расходуемым непосредственно на производство железобетонных изделий, применение бетона повышенных марок оказывается более выгодным. Для оценки народнохозяйственной эффективности абсолютные энергозатраты на высокопрочные бетоны и бетоны рядовых марок правильно сравнивать, очевидно, при получении конструкций одинаковой несущей способности. В этом случае для ряда конструкций в результате уменьшения сечения и, таким образом, удельного расхода цемента, а также расхода арматуры высокопрочные бетоны должны оказаться эффективнее обычных как с позиции энергетических так и общих приведенных затрат на изготовление конструкций.

Расчеты  $K_{\text{пут}}$  (табл.3) показывают сколько существенные резервы экономии тепловой энергии открывает снижение величины отпускной прочности бетона. Так, из данных табл.2-3 следует, что последовательное повышение отпускной прочности с 50 до 70, а затем до 100% проектной при длительности тепловой обработки 14 час для бетона с проектной прочностью 30 МПа на цементе М500 с НГ=27% требует увеличения расхода условного топлива соответственно на 4 и 22%. При 10-часовом режиме пропаривания повышение расхода условного топлива составляет соответственно 8 и 35%.

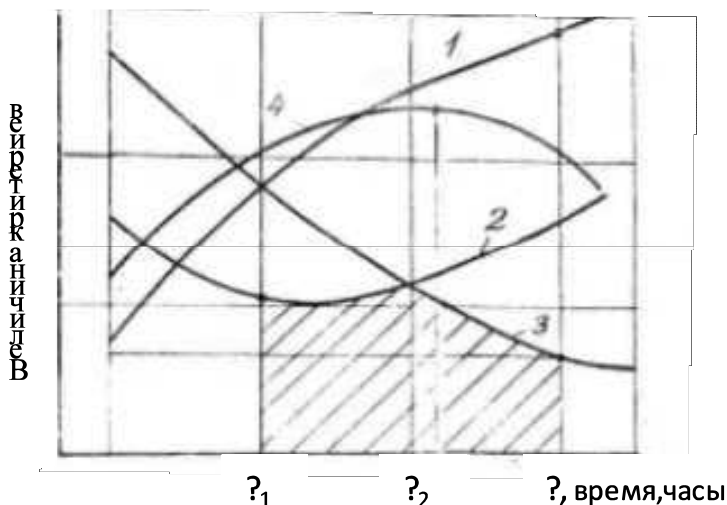
Значительная доля этих энергетических затрат может быть компенсирована учетом последующего за пропариванием роста прочности бетона и введением ускорителей твердения. Введение, в частности, ускорителей твердения в оптимальном количестве позволяет при 9-14 часов режимах обеспечить прирост прочности через 4 часа после пропаривания 10 – 15% от проектной, учет последующего роста прочности в течение 24 часов еще 5 – 10%.

Экономия топлива при снижении отпускной прочности или введении добавок возможна как за счет уменьшения расхода цемента, так и в результате сокращения длительности или уменьшения температуры тепловой обработки. Широкое внедрение в практику производства бетона, изделий и конструкций на его основе эффективных химических добавок и прежде всего суперпластификаторов открыло большие возможности снижения энергетических затрат. Выбор варианта применения добавок должен определяться, очевидно, конкретными условиями предприятия: дефицитностью цемента и тепловой энергии, организацией производства и возможностью сокращения длительности тепловой обработки или вообще переходить на беспрогревную технологию изготовления изделий.

Энергетическая эффективность добавок проявляется не только в результате их пластифицирующего или ускоряющего твердение действия. Применение ряда добавок позволяет уменьшить энергетические затраты, снизить расход цемента при получении, например, бетонов с равной морозостойкостью или водонепроницаемостью за счет воздухововлекающего или кольматирующего действия.



Расход тепловой энергии на производство железобетонных изделий в значительной мере обусловлен длительностью твердения. При нормальном твердении с изменением возраста он изменяется пропорционально изменению необходимого расхода цемента при тепловой обработке имеет экстремальный характер, уменьшаясь с увеличением длительности до тех пор пока энергозатраты за счет сэкономленного цемента будут выше дополнительных энергозатрат на тепловую обработку (рис. 1).



**Рис.1.** Изменение критериев оптимальности с изменением продолжительности тепловой обработки: 1 – коэффициент рационального использования цемента (отношение затрат на цемент для получения бетона с заданными свойствами при нормальном твердении и при тепловой обработке); 2 – приведенные затраты на тепловую обработку (включая стоимость материалов); 3 – расход цемента; 4 – коэффициент рационального использования топлива. Заштрихована зона компромиссных решений.

**В производственных условиях** при оценке влияния различных технологических факторов на энергетические затраты необходимо учитывать эксплуатационные потери тепла, которые пока составляют весьма значительную долю в тепловом балансе заводов сборного железобетона. Эти потери могут ощутимо влиять на оценку степени рационального использования топлива и выбор оптимальных режимов.

1. Малинина Л.А. Проблема использования в бетонах цементов с активными добавками.- Цемент, 1981, №10, с.3-5. 2. Малинина Л.А. Снижение энергозатрат путем рационального выбора цементов,- Бетон и железобетон, 1982, № 3, с.8-9. 3. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные минеральные вяжущие материалы, -М.: Инфра-Инженерия, 2010.- 472 с.