



Дворкін Л. Й.



Житковський В. В.

**Дворкін Л. Й.**, д.т. н., професор, зав кафедри «Технологія будівельних виробів і матеріалознавства», Національний університет водного господарства і природокористування, вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, e-mail: dvorkin-oleg@mail.ru, моб.тел: (068) 353-33-38

**Житковський В. В.**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне, вул. Соборна, 11 e-mail: zhitk9991@gmail.com, моб.тел: (096) 564-00-27

**L. Dvorkin**, Doctor of technical Science, professor, Head of Department «Technology of Building Products and Material Science», National University of Water Management and Nature Resources Use, st. Soborna, 11, Rivne, 33028,

e-mail: dvorkin-oleg@mail.ru, tel.: (068) 353-33-38

**V. Zhitkovsky**, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of Department of Building products technology and material science of National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, str. Soborna, 11 e-mail: zhitk9991@gmail.com, tel.: (096) 564-00-27

## ШЛЯХ ДО БЕЗПРОГРІВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ

### ПУТЬ К БЕЗПРОГРЕВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

#### PATH TO WITHOUT WARMING TECHNOLOGY OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE PRODUCTS

**Анотація.** В статті теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість отримання відпускнуї міцності бетонних та залізобетонних виробів за першу добу твердіння за рахунок зниження водоцементного відношення та підвищення ступеня гідратації цементу шляхом введення до складу бетонної суміші ефективних сучасних суперпластифікаторів. Отримані та експериментально підтверджені рівняння, що можуть бути використані для визначення складу бетону із забезпеченням міцності у ранньому віці.

**Ключові слова.** Бетон, теплова обробка, рання міцність, суперпластифікатор.

**Анотация.** В статье теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения отпускной прочности бетонных и железобетонных изделий в первые сутки твердения за счет снижения водоцементного отношения и повышения степени гидратации цемента путем введения в состав бетонной смеси эффективных современных суперпластификаторов. Получены и экспериментально подтверждены уравнения, которые могут быть использованы для определения состава бетона с обеспечением прочности в раннем возрасте.

**Ключевые слова.** Бетон, тепловая обработка, ранняя прочность, суперпластификатор.

**Annotation.** The paper theoretically proved and experimentally confirmed the possibility of selling the strength of concrete and reinforced products in the first days of hardening by lowering the water-cement ratio and increase the degree of hydration of cement by introducing a concrete mix of efficient modern superplasticizers. Obtained and experimentally validated equations that can be used to determine the composition providing strength concrete at early ages.

**Keywords.** Concrete, heat treatment, early strength, superplasticizer.

#### Вступ. Постановка проблеми

Для сучасного виробництва бетонних і залізобетонних виробів актуальним є максимально можливе зниження енерговитрат. У теплоенергетичному балансі заводів збірного залізобетону до 70 % теплоти витрачається на теплову обробку виробів, що складає близько 1373 тис. кДж на 1 м<sup>3</sup> залізобетону. Теоретично на розігрів 1 м<sup>3</sup> бетону разом з металом форм і неминучими втратами, а також додатковими витратами теплоти на підігрів заповнювачів повинно витратитися близько 840 тис. кДж/м<sup>3</sup>.

Основним видом теплових агрегатів у виробництві залізобетону є доки що ямні пропарювальні камери, коефіцієнт корисної дії яких складає всього близько 30%. В даний час насичена водяна пара є основним видом теплоносія при тепловій обробці бетону. Головний її недолік – низький ККД у теплових установках.

#### Аналіз літературних джерел та теоретичне обґрунтування

Для підвищення швидкості наростання міцності бетону і, тим самим, зниження витрат на теплову обробку бетону або повне її виключення з технологічного циклу, необхідно забезпечити максимально можливу щільність цементного каменю у ранні терміни.

Пористість цементного каменю може бути приблизно оцінена за кількістю води, що випаровується. Об'єм пор у цемент-

ному камені, віднесений до 1 г цементу ( $P_{цк}$ ), описується рівнянням [1]:

$$P_{цк} = V/Ц - 0,23\alpha, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – частина прогрітого цементу або ступінь його гідратації.

Формула (1) отримана з припущення, обґрунтованого емпірично, що при повній гідратації 1 г цементу хімічно зв'яже приблизно 0,23 г води. Із неї випливає, що основними шляхами, які дозволяють знизити пористість цементного каменю в ранні строки, є підвищення ступеня гідратації цементу та зниження водоцементного відношення.

За Т. Пауерсом [2] міцність зразків цементного каменю при стиску  $R_{цк}$ , що твердіють в нормальних умовах, відповідає рівнянню:

$$R_{цк} = AX^n, \quad (2)$$

де  $A$  – константа, що характеризує максимально можливу міцність цементного каменю ( $A \approx 240$  МПа),  $n$  – коефіцієнт, обумовлений особливостями цементу ( $n = 2,6...3$ );  $X$  – структурний критерій.

Структурний критерій  $X$  у формулі (2) характеризує концентрацію продуктів гідратації цементу в просторі доступ-

ному для цих речовин. Його пропонується [2] розраховувати за формулою:

$$X = \frac{K_r V_{п.ц} \alpha}{V_{п.ц} \alpha + V/Ц} \approx \frac{0,647 \alpha}{0,319 \alpha + V/Ц} \quad (3)$$

де  $K_r = 2,09...2,2$  коефіцієнт збільшення об'єму продуктів гідратації;  $V_{п.ц}$  – питомий об'єм цементу ( $V_{п.ц} = 1/\rho_{ц} = 0,319 \text{ см}^3/\text{г}$  – величина обернена до густини цементу ( $\rho_{ц}$ ));  $\alpha$  – ступінь гідратації.

Структурний критерій  $X$ , обґрунтований Пауерсом, на відміну від критерію Р.Фере [1], що був вперше запропонований для прогнозування міцності бетону в 1892 р, є параметром, пропорційним відноській густині цементного каменю, а не цементного тіста. За умови відомого ступеня гідратації цементу ( $\alpha$ ) він дозволяє при заданому значенні  $V/Ц$  прогнозувати міцність цементного каменю в певному віці. Залежності, близькі до формули Пауерса, що враховують зв'язок міцності цементного каменю з його відносною густиною запропоновані пізніше і іншими дослідниками [3].

Розрахункові значення міцності цементного каменю, обчислені за формулою Пауерса при різних значеннях  $V/Ц$  і  $\alpha$ , наведені в табл.1. З них випливає, що при різних значеннях  $V/Ц$  великі можливості для збільшення міцності цементного каменю відкриваються вже при порівняно невеликому збільшенні ступеня гідратації цементу  $\alpha$ . Наприклад, перехід від  $\alpha = 0,2$  до  $\alpha = 0,3$  при  $V/Ц = 0,3$  дозволяє довести міцність цементного каменю  $R_{ц.к}$  до 49 МПа, в той час як при  $V/Ц = 0,5$  розрахункові значення  $R_{ц.к}$  при  $\alpha = 0,3$  складають лише 10,4 МПа, тобто більш ніж в 4 рази нижчі.

Таблиця 1.

Вплив  $V/Ц$  і  $\alpha$  на міцність цементного каменю

$V/Ц$	$\alpha$	Міцність цементного каменю за формулою (1)	$V/Ц$	$\alpha$	Міцність цементного каменю за формулою (1)
0,3	0,2	13,3	0,4	0,2	6,7
	0,3	49,0		0,3	32,7
	0,5	89,8		0,5	51,8
	0,7	160,1		0,7	98,1
0,35	0,2	9,3	0,5	0,2	3,9
	0,3	23,4		0,3	10,4
	0,5	67,3		0,5	32,7
	0,7	124,0		0,7	64,7

Збільшення ступеня гідратації цементу в ранні терміни твердіння при певному хіміко-мінералогічному складі досягається комплексом відомих технологічних прийомів і, перш за все, збільшенням його питомої поверхні за рахунок збільшення під час помелу вмісту найбільш тонких частинок (менше 5...10 мкм), а також введенням добавок прискорювачів твердіння [4]. З опублікованих експериментальних даних [5] випливає, що збільшення тонкості помелу з 300 до 500  $\text{м}^2/\text{кг}$ , а також введення ряду добавок прискорювачів найбільш значно збільшує ступінь гідратації портландцементу в ранні терміни твердіння через 1...3 доби. В подальшому цей ефект суттєво знижується.

Цей висновок пояснюється [3, 4, 5] утворенням, приблизно через 24 годин з моменту змішування, на зернах цементу щільних екрануючих оболонок з новоутворень, що гальмують подальший процес гідратації цементів. При цьому в цементному камені виникають, внаслідок кристалізаційного тиску, напруження, що сповільнюють ріст його міцності в наступні, за початковим періодом, тер-

міни твердіння [3]. При підвищенні тонкості помелу цементу і оптимальному вмісті гіпсу для кожного рівня дисперсності поряд зі ступенем гідратації безперервно зростає і міцність цементу в 1...3 добовому віці, а до 28-добового віку вона збільшується лише до певних меж за питомою поверхнею (410...520  $\text{м}^2/\text{кг}$ ) [5].

Важливими наслідками позитивного впливу підвищеної тонкості помелу цементу і добавок прискорювачів тверднення на міцність поряд з досягненням більш високого ступеня гідратації і, як наслідок більш низької капілярної і загальної пористості є зменшення розміру пор і поліпшення структури цементного каменю, що твердіє [3, 4, 5].

В даний час на ринку хімічних добавок з'явилась велика кількість ефективних суперпластифікуючих добавок і прискорювачів твердіння, які дозволяють як суттєво знизити  $V/Ц$ , так і підвищити ступінь гідратації цементу в ранні терміни.

Вибір енергоефективного способу досягнення ранньої міцності бетону для конкретного виробника доцільно виконувати з урахуванням його технологічної ефективності в конкретних умовах, що визначаються класом бетону, призначенням виробів та конструкцій, рухомістю бетонної суміші, особливостями наповнювачів, можливістю застосування хімічних добавок. На остаточне рішення суттєво впливає собівартість бетону та залізобетонних конструкцій. Особливий інтерес для виробників залізобетонних виробів представляють технологічні рішення, що пов'язані з використанням хімічних добавок (суперпластифікаторів, прискорювачів твердіння та їх комплексів), тому що вони не потребують значних капіталовкладень, і можуть бути реалізовані на більшості підприємств.

Слід зауважити, що за останні десятиліття на ряді цементних заводів відбулися істотні зрушення в бік збільшення виробництва цементів з підвищеною тонкістю помелу ( $S_{\text{пит}}$  до 400  $\text{м}^2/\text{кг}$ ) на основі високоактивного алітового клінкеру (до 65...70%). Це робить реальною для виробництва можливість вибору цементу, що забезпечує високу ранню міцність і, відповідно, впровадження безпропарувальних технологій.

### Результати дослідження та їх аналіз

В статті наведені результати досліджень впливу суперпластифікаторів різних видів на ранню міцність бетону, отриманого на портландцементях I і II типів, проаналізована їх ефективність і запропонована методика розрахунку цементно-водного відношення для бетонів з добавками. В якості заповнювачів були використані кварцовий пісок з  $M_{кр} = 1,8$  і гранітного щебінь фракції 5...20 мм.

У табл. 2 і на рис. 1 приведені отримані значення міцності бетонів із сумішею однакової рухомості без добавок і з добавкою поширеного суперпластифікатора С-3 в кількості 0,7% від маси цементу. Застосування добавки при постійній витраті цементу дозволило збільшити його міцність приблизно на один клас, а міцність у віці 1 доба вросла на 27-51%.

Аналогічні дослідження виконані із застосуванням інших пластифікуючих добавок, розповсюджених на ринку України. У табл. 3 наведено порівняльну ефективність досліджених пластифікуючих добавок у разі застосування їх для зниження витрати води при збереженні рухомості суміші і підвищення ранньої міцності. Найбільшу водоредукуючу здатність мають добавки полікарбонатного типу (Mapei Dynamon SR3, Melflux 2651 F), які дозволяють забезпечити і найбільше підвищення ранньої міцності. Широке впровадження таких добавок поки стримується їх високою вартістю.

## Підвищення міцності бетону при введенні суперпластифікатора С-3

Тип цементу, виробник	В/Ц=0,57				В/Ц=0,47			
	ОК, см	Міцність, МПа, у віці			ОК, см	Міцність, МПа, у віці		
		1 доба	7 діб	28 діб		1 доба	7 діб	28 діб
ПЦ I, Здолбунів	10,5	8,8	15,8	28,2	12	12,4	22,7	35,7
ПЦ II/Б, Кривий Ріг	10	6,55	13,8	23,85	12	9,0	17,5	29,9
ПЦ II /А, Кривий Ріг	15	7,5	13,95	26,0	16	11,3	20,2	33,5

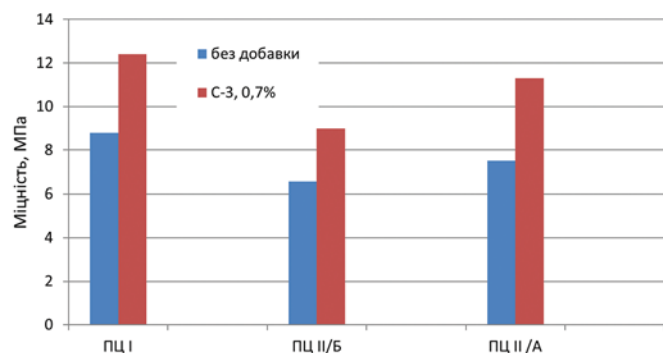


Рис. 1. Збільшення міцності бетону через 24 год. твердіння при зниженні водовмісту бетонної суміші з а рахунок введення суперпластифікатора.

При розрахунках складів бетону найбільш зручними залишаються формули виду:

$$R_6 = AR_{ц}(\text{Ц/В}-b), \quad (4)$$

де  $R_6$  – необхідна міцність бетону,  $R_{ц}$  – стандартна активність цементу,  $\text{Ц/В}$  – цементно-водне відношення,  $A$ ,  $b$  – коефіцієнти, що враховують особливості вихідних матеріалів, вік бетону та інші технологічні фактори.

Для орієнтовних розрахунків  $\text{Ц/В}$  при проектуванні складів бетонів з підвищеною ранньою міцністю, як показує обробка експериментальних даних при  $\text{В/Ц} = 0,35 \dots 0,45$ , може бути використана формула [6]:

$$R_6 = KAR_{ц}(\text{Ц/В}-0,5), \quad (5)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що враховує особливості впливу хімічної добавки на міцність бетону в певному віці.

Величина  $R_{ц}$  у формулі (5) відповідає міцності цементу, що визначена за стандартною методикою в заданому віці. Як показано нами раніше [7] цей параметр пов'язаний зі ступенем гідратації степеневою залежністю:

$$R_{ц} = \alpha^n R_{ц,0}, \quad (6)$$

де  $n$  і  $R_{ц,0}$  константи для даного виду цементу.

Для більш точних розрахунків необхідних значень  $\text{В/Ц}$  або  $\text{Ц/В}$  для бетону, що забезпечує необхідні показники міцності в певному віці, також при невідомому значенні  $R_{ц}$  у ранньому віці, доцільно значення коефіцієнтів у формулі (5) приймати за емпіричними даними, прив'язаними до конкретних матеріалів або використовувати експериментально-статистичні моделі. З цією метою може бути використане факторне планування експерименту [1]. Нижче наведені отримані нами в результаті математичних перетворень рівнянь регресії формули міцності бетону в різному віці з діапазоном  $\text{В/Ц} = 0,25 \dots 0,5$  на цементах марок 500...600:

$$R_6^{1\text{доба}} = 0,36 \cdot R_{ц}(\text{Ц/В}-1,5) \quad (7)$$

$$R_6^{28\text{діб}} = 0,57 \cdot R_{ц}(\text{Ц/В}-1,01) \quad (8)$$

Величина  $R_{ц}$  в цих рівняннях відповідає активності цементу у віці 28 діб. При проведенні дослідів використовувався портландцемент ПАТ «Волинь-цемент» (м. Здолбунів) ПЦ I-500 Н. Активність цементу підвищували двома способами: 1) домелом до  $S_{\text{плит}} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$ , 2) введенням прискорювача твердіння «Релаксол-Антифриз FS». У бетонну суміш вводили суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Melflux 2651 F в кількості 0,5% від маси цементу.

Таблиця 3.

## Порівняльна ефективність добавок-пластифікаторів

Добавка	Витрата, % від маси цементу (на суху речовину)	Водоредукуюча здатність, %	Усереднене збільшення ранньої міцності, %	Збільшення вартості матеріалів у бетону, %
ЛСТ	0,2	8...12	10...15	1,3
Sika Plastiment BV-60	0,3	10...12	10...20	5
С-3	0,35	12...15	10...20	7,6
	0,5	16...18	15...30	11
	0,7	18...20	30...50	15,3
Mapei Dynamon SP3	0,2	30...35	40...60	25
	0,35	40...45	60...90	37,5
Mapei Dynamon SR3	1	22...28	40...55	37,4
	1,5	30...35	40...60	56,1
Melflux 2651 F	0,5	30...35	40...60	38,6
	1	40...45	60...90	57,9

Примітка: Розрахунки виконувались для одного з підприємств м. Рівне.

Експерименти виконувались згідно плану типу 2<sup>3</sup> [1] при варіюванні трьох факторів:  $X_1$  – В/Ц (0,25...0,5), витрата цементу,  $X_2$  – Ц (300...600 кг/м<sup>3</sup>) і активність цементу,  $X_3$  –  $R_c$  (53...65 МПа). Міцність бетону при стиску визначали через 1 та 28 діб.

Аналіз отриманих поліноміальних моделей міцності бетону показав практичну незначимість в дослідженому діапазоні при постійних В/Ц і активності цементу  $R_c$  ( $X_3$ ) витрати цементу, що варіюється в певній області, Цей висновок узгоджується з відомими даними [8].

Розрахунок міцності за отриманими рівняннями (табл. 4) показує, що підвищення Ц/В, яке може бути досягнуте за рахунок суперпластифікатора дає можливість отримати на 1 добу твердіння міцність, що відповідає 60...70% від заданої, тобто відповідає зазвичай прийнятій відпускній міцності бетону. Слід враховувати також, що застосування сучасних суперпластифікаторів і суттєве зменшення водопотреби бетонної суміші позитивно впливає не лише на ранню міцність, воно збільшує кінцеву міцність і покращує комплекс інших властивостей (морозостійкість, водонепроникність, міцність на розтяг тощо)

Для підтвердження висловлених припущень та розрахунків, щодо можливості заміни тепловологісної обробки бетонних виробів, за рахунок зниження В/Ц шляхом використання ефективних суперпластифікаторів

та підвищення ранньої міцності була проведена серія експериментів. Виготовлялись бетони різних складів, що відповідають найбільш використовуваним класам за міцністю. Поряд з цим, були виготовлені бетони зі зниженим В/Ц, що досяглось за рахунок введення полікарбоксилатного суперпластифікатора Melflux 2651 F в кількості 0,5% від маси цементу.

Результати експериментів (табл. 4) показали, що зниження В/Ц за рахунок введення ефективного суперпластифікатора дозволяє підвищити міцність у віці 1 доба до досягнення 60...70% від запроєктованої, що дає можливість повністю відмовитись від використання теплової обробки. Міцність на 28 добу підвищується на 30...50 %.

Отримані експериментальні результати добре сходяться з значеннями, розрахованими за рівняннями (7, 8), що дозволяє використовувати їх для проектування складів бетону.

Використання добавок-суперпластифікаторів з метою підвищення ранньої міцності бетону передбачає уважне відношення до якості вихідних компонентів, так як підвищення водовмісту бетонної суміші наприклад за рахунок некондиційних заповнювачів може суттєво знизити очікуваний ефект. Для зменшення терміну набору відпускної міцності до 12...15 год. ефективним є також додаткове введення прискорювачів твердіння.

Таблиця 4.

Набір міцності бетону при використанні полікарбоксилатного суперпластифікатора

Клас бетону	Витрата цементу, кг/м <sup>3</sup>	без добавки			з добавкою Melflux 2651 F (0,5%)		
		В/Ц	Міцність бетону у віці, діб, МПа		В/Ц	Міцність бетону у віці, діб, МПа	
			1	28		1	28
B25	325	0,58	5,8	34,9	0,39	20,4/19,5	44,2/43,0
B30	365	0,52	11,0	40,9	0,34	23,6/26,3	59,7/55,1
B40	400	0,48	15,6	46,2	0,29	28,2/35,9	68,1/70,3

Примітки: 1. Над рискою показані експериментальні значення, під рискою – розрахункові (за формулами (7,8)).

2. В експерименті використовувався цемент з  $R_c = 50$  МПа.

### Висновки

1. Високі значення міцності бетону в ранні терміни і, відповідно, безпрогрівна технологія бетонних та залізобетонних виробів можлива при підвищенні ступеня гідратації цементу в бетонних сумішах з мінімально можливими значеннями водоцементного відношення.
2. Введення у бетонну суміш добавок-суперпластифікаторів дозволяє в умовах нормального твердіння досягнути за одну добу 60...70% проектної міцності. Це створює можливість відмовитись від теплової обробки, підвищити кінцеву міцність та покращити комплекс основних будівельно-технічних властивостей бетону.
3. Запропоновані розрахункові залежності, які можуть бути використані при розрахунках складів бетону з підвищеною ранньою міцністю при введенні добавок-суперпластифікаторів.

### Література:

1. Дворкин Л. И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. – М.: Стройбетон, 2006. – 689 с.
2. Powers T. C., Brownyard T. L. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. – J. Am. Concrete Inst. Proc., 43, 1947. – 101-132 p.p.
3. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
4. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989.–186 с
5. Кравченко И. В., Власова М. Т., Юдович Б. Э. Высокопрочные и особобыстротвердеющие портланд-цементы. – М.: Стройиздат, 1971. – 230 с.
6. Баженов Ю. М. Технология бетона. – М.: Изд-во АСВ, 2002 – 500 с.
7. Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетона. – Львов: Вища шк., 1981. – 160 с.
8. Волженский А. В. и др. Минеральные вяжущие вещества: (технология и свойства). Учебник для вузов / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с.