

здания с возможностью выявления таких деформаций на начальной стадии и точного определения параметров геотехнических процессов (например, параметров просадочной воронки и расположения источника замачивания для просадочных грунтов, величины уступа или параметров мульды при подработке, параметров откосов на оползнеопасных территориях, и т.д.), и с последующим моделированием этих ситуаций. Еще одна область применения такой системы – при выравнивании зданий и сооружений, когда необходима оперативная информация о состоянии здания, его деформациях и напряжениях при подомкрачивании или регулируемой осадке здания при перфорации основания или его регулируемом замачивании. Это возможно при помощи постоянного дистанционного измерения деформаций конструкций зданий датчиками, которые фиксируют углы наклонов, а также смещения опорных частей конструкций, и их последующей обработки специализированной программой, позволяющей автоматически корректировать геометрию расчетной модели. В этом случае оперативные расчеты в ходе выравнивания помогут обеспечить безаварийность процесса и предотвратить местное разрушение конструкций.

Такое моделирование жизненного цикла эксплуатируемых зданий, построенное на основе регулярно корректируемых расчетных моделей по результатам непрерывного мониторинга, представляется на данный момент наиболее перспективным направлением комплексной оценки технического состояния зданий, определения возможности проведения их реконструкции, обеспечения дальнейшей надежной и безаварийной эксплуатации.

1.Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – К.: ФАКТ, 2005. – 344 с.

2.Дыховичный А.А. Модели строительных конструкций и их идентификация: Дисс. ... д-ра техн. наук. – К., 1995. – 322 с.

3.Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В.Перельмутер, В.И.Сливкер. – К.: ВПП «Компас», 2001. – 448 с.

Получено 09.04.2007

УДК 621.926.5

А.М.ІВАНОВ, д-р техн. наук, О.Ю.ЧУДНИЙ
Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЗДРІБНЮВАННЯ

Розглядаються питання підвищення якості та регулювання дисперсних характеристик цементів при одночасному зниженні питомих енерговитрат на їх виробництво.

Основна проблема сучасної технології здрібнювання цементу –

оптимізація дисперсних характеристик цементу (ДХЦ); зернового складу (ЗС) і енергетичної ефективності процесу здрібнювання щодо активності та інших властивостей цементу. Рішення проблеми ґрунтується, з одного боку, на максимальному розкритті фізико-хімічного потенціалу клінкера, а з іншого – на проектуванні та реалізації технологічних систем здрібнювання (ТСЗ), режимних характеристик і параметрів процесу, що забезпечують оптимальні ДХЦ при мінімальних метало- і енерговитратах. Проблема включає наступні основні завдання:

- вибір критеріїв оцінки й дослідження особливостей ЗС по мірі здрібнювання цементу;

- встановлення взаємозв'язку показників ЗС з іншими ДХЦ ($\sum R_{008}, S$), гідратаційною активністю й іншими властивостями цементу, а також з питомими витратами на процес здрібнювання;

- ідентифікація способів, режимів і систем здрібнювання щодо якості ЗС, енергетичної ефективності процесу й металоємності.

Зерновий склад цементу. Вибір як критеріїв оцінки ДХЦ показників ЗС обумовлений підвищеною дисперсністю високоякісних компонентних цементів (ВКЦ) і неадекватністю у зв'язку з цим традиційних оцінок цементу по питомій поверхні $-S$ см²/г і залишку фракції $+80$ мкм ($\sum R_{008}, \%$).

Інструментально аналіз зернового складу виконується за допомогою нових типів granulometrів (лазерних, ультразвукових, аеродинамічних та ін.), що дозволяє керувати процесом, наприклад, по фракціях $+3$ -30 і -5 мкм, які крім того ще визначають активність та інші властивості портландцементу і ВКЦ. Аналіз практичних і розрахункових даних, які характеризують взаємозв'язок ДХЦ з показниками активності цементів і питомими енерговитратами для ТСЗ типу трубний млин (ТМ) – сепаратор динамічний (СД) (табл.1) показує, що активність цементу повніше характеризується вмістом фракцій $+5$ -30 і -5 мкм.

У вітчизняній і світовій практиці зерновий склад цементу описується рівнянням Розіна-Раммлера-Беннекта (RRB):

$$R_d = 100e^{-(d/d^1)^n},$$

де R_d – відповідно залишок на ситі з розміром отворів d , %; d^1 – характеристичний розмір частки, мкм, що відповідає 36,8% залишку на ситі розміром d (відповідний проходу 63,2%); n – коефіцієнт рівномірності. Параметр d^1 характеризує ступінь дисперсності матеріалу, що подрібнюється, яка тим вище, чим менше значення d^1 , n – дисперсію розподілу фракцій, що тим більше, чим менше значення n [1].

Таблиця 1– Взаємозв’язок дисперсних характеристик і властивостей цементів

Показники	Значення показників ТСЗ					
	ТМ				ТМ - СД	
	портландцемент				шлакопортландцемент	
Коефіцієнт рівності (п)	0,82	0,90	0,99	1,02	0,98*	0,99**
Характеристичний розмір (d^1), мкм	30	25	15	11	18,8	16,5
Склад фракцій, %:						
+80 мкм	10	6	1	0	4	1
+5-30 мкм	40	55,4	67,4	69,9	64,2	66,7
-5 мкм	23	13,8	18,6	25,4	15,2	16
Питома поверхня (S), см ² /г	2700	3000	4000	5300	3600	-
Нормальна густина (Н.Г.), %	-	26	28	31	28	-
Міцність на стиск, МПа						
2 доби ($R_{с72}$)	-	32	31	42	30	19
28 діб ($R_{с28}$)	43	48	59	68	50	57
Питомі енерговитрати на здрибнювання ($E_{подр}$), кВт·год/т	40	35	58	80	-	80

* шлак – 35%

** шлак – 45%

Взаємозв’язок показників ЗС з ДХЦ, активністю та питомими енерговитратами на здрибнювання. Оцінка ДХЦ за рівнянням RRB дозволяє розрахувати вміст фракцій +5-30 і -5 мкм. Встановлено, що фракція +5-30 мкм визначає міцність (активність) у різні строки твердіння, а -5 мкм – у ранні. Між цими фракціями існує певне співвідношення.

Пропонуємо наступний механізм формування міцності з позицій співвідношення зазначених фракцій. Синтез міцності цементного каменю відбувається в результаті гідратації зерен цементу, включених у полідисперсну систему, кожне з яких взаємодіє з сусідніми частками. Максимальна міцність забезпечується при найбільш щільному впакуванні зерен.

Тому необхідно сформувати такий зерновий склад цементу, який при "засипанні" у виріб створює щільну структуру і зберігає пористість системи (виробу), достатню для проникнення й взаємодії з водою. Співвідношення середніх (+5 -30 мкм) і тонких (-5 мкм) фракцій повинне забезпечувати максимальне координаційне число. Знижений вміст тонких фракцій може призвести до підвищеної водопотреби через недостатній пластифікуючий ефект, а їхній надлишок також викликає підвищену водопотребу, але вже в результаті підвищення водотримуючої здатності цих фракцій. При підвищенні водоцементного відношення підвищується пористість цементного каменю при твердін-

ні й, як наслідок, знижується його міцність.

Співвідношення фракцій +5 -30/ -5 відчутно до зміни параметрів зернового складу n і d^1 . Важливий практичний висновок полягає в тому, що цементи з підвищеним змістом фракції +5 -30 мкм і зниженим -5 мкм можуть бути отримані при більш низьких (до 25%) питомих енерговитратах, а при близьких значеннях питомих енерговитрат цементи з вищою рівномірністю ЗС володіють підвищеною (до 15%) активністю.

В табл.2 наведені активність цементу, розрахункові значення ЗС, що забезпечують співвідношення +5 -30/-5 на рівні 2.

Таблиця 2 – Вплив зернового складу на марку цементу

Марка цементу	Зерновий склад	
	+5-30 мкм	-5 мкм
500	51	25
600	58	28
650-700	57	30

Розглянуто також взаємозв'язок між параметрами зернового розподілу й питомими енерговитратами на його подрібнення. В табл.3 наведені значення дисперсних характеристик і питомих енерговитрат залежно від n і d^1 .

Основний висновок аналізу табл.3 полягає в тому, що розглянуті залежності мають різні якісні й кількісні характеристики. Це треба враховувати при виборі критеріїв оптимізації процесу здрібнювання в ході його проектування. Наприклад, якщо активність цементу корелюється вмістом фракцій +5 -30 мкм, то розрахунок процесу варто вести по цій цільовій фракції. Тоді такі дисперсні характеристики, як S , фракції +80, +60, +40 мкм, відіграють допоміжну роль, при цьому можливий істотний вигреш питомих енерговитрат.

Встановлено, що значення n істотно впливає на показники дисперсних характеристик, таких як S , вміст фракцій +5 -30, -5мкм, а також питоми енерговитрати. При $d^1 = \text{const}$ у міру збільшення значення n з 0,8 до 1,1 підвищуються значення S . Наприклад, для $d^1 = 15$ мкм значення S підвищується з 3800 (для $n = 0,8$) до 4260 $\text{см}^2/\text{г}$ (для $n = 1,1$).

Подальший аналіз показує, що при рівних значеннях S вміст фракції +5 -30 мкм у міру збільшення n підвищується.

Інша картина спостерігається для залежності $-5 = f(n)$. Якщо залежність +5 -30 = $f(n)$ характеризується екстремальною кривою, то дана залежність у діапазоні $n = 0,95 \dots 1,1$ виражається експонентою.

Очевидно, що значення оптимумів для кожної з них різні. Одно-

часно максимальним значенням (+5 -30 мкм) відповідає певний вміст фракції -5 мкм, величина якої зменшується з 34 до 26% по мірі збільшення n . Ця закономірність має важливе практичне значення, оскільки дозволяє оцінити область раціональних значень +5 -30 і -5 мкм для одержання цементу з ефективним використанням "потенціалу" зернового складу.

Таблиця 3 – Залежність дисперсних характеристик цементу і питомих енерговитрат від параметрів n і d^1

Показники	Значення показників при d^1 , мкм					
	10	15	20	25	30	35
$n = 0,8$						
Питома поверхня, $см^2/г$	5050	3800	3110	2650	2340	2100
Вміст фракцій, %						
+80 мкм	0,5	2,2	4,8	7,9	11,2	14,4
+5-30 мкм	47,3	48,5	46,8	44,4	42,0	39,7
-5	43,7	33,9	28,1	24,1	21,2	18,9
Відношення +5-30/-5	1,08	1,43	1,67	1,84	1,98	2,10
Питомі енерговитрати, кВт·год/т	69,9	49,8	39,8	33,8	29,7	26,7
$n = 0,9$						
Питома поверхня, $см^2/г$	5290	3980	3260	2780	2450	2200
Вміст фракцій, %						
+80 мкм	0,2	1,1	3,1	5,8	8,9	12,2
+5-30 мкм	51,6	53,4	51,3	48,3	45,1	42,2
-5	41,5	31,1	25,0	20,9	18,1	15,9
Відношення +5-30/-5	1,24	1,72	2,05	2,31	2,49	2,65
Питомі енерговитрати, кВт·год/т	74,2	52,4	41,9	35,5	31,2	28,0
$n = 1,0$						
Питома поверхня, $см^2/г$	5490	4130	3380	2890	2540	2480
Вміст фракцій, %						
+80 мкм	0,03	0,5	1,8	4,1	7,0	10,1
+5-30 мкм	55,7	58,1	55,6	51,7	47,9	44,2
-5	39,2	28,3	22,0	18,2	15,3	13,4
Відношення +5-30/-5	1,42	2,05	2,53	2,84	3,13	3,30
Питомі енерговитрати, кВт·год/т	77,8	54,8	43,6	36,9	32,3	29,0

При рівних значеннях n зі зниженням значень d^1 росте питома поверхня, росте вміст фракції -5 мкм. Залежність +5 -30 – екстремальна, тобто існує для кожного значення n цілком певне значення d^1 або, навпаки, даному d^1 відповідає певне значення n , при яких +5 -30 максимально. На основі аналізу експериментальних досліджень встановлено, що оптимальні співвідношення +5-30/-5 у межах $n=0,8...1,10$ і $d^1 = 30...10$ мкм становлять $1,9 \pm 0,2$. Можна прогнозувати, що при такому співвідношенні найбільш ефективно реалізуються потенційні властивості зернового складу.

Значення n мало впливають на показники питомих енерговитрат, які залежно від n змінюються в межах $+5\%$. Зовсім інша картина спостерігається при оцінці питомих енерговитрат залежно від вмісту фракцій $+5 -30$ мкм і величини співвідношення $+5-30/-5$.

При оцінці ДХЦ по фракції $+5 -30$ мкм вирішальне значення має не питома поверхня і не вміст великої фракції, а оцінка за параметрами ЗС, що дає істотно заощаджувати питомі енерговитрати на здрібнювання. Всі види і марки цементу характеризуються такими значеннями параметрів ЗС: $n = 0,8...1,1$; $d^1 = 10...30$ мкм.

Аналіз наведених варіантів дозволяє зробити висновок, що в межах значень $n = 0,8...1$, $d^1 = 10...20$ мкм можна одержати цементи з широким спектром вмісту цільових функцій і їхнього співвідношення.

За даними ряду досліджень, в яких показана залежність між вмістом фракції $+5 -30$ мкм і активністю цементу, а також за даними аналітичних досліджень на основі залежностей $S = f(n; d^1)$ і $\Xi = f(n; d^1)$ були отримані оптимальні щодо енерговитрат значення дисперсних характеристик (табл.4).

Очевидно, що значення оптимумів для кожної з них різні. Одночасно максимальним значенням ($+5 -30$ мкм) відповідає певний вміст фракції -5 мкм, величина якої зменшується з 34 до 26% по мірі збільшення n . Ця закономірність має важливе практичне значення, оскільки дозволяє оцінити область раціональних значень $+5 -30$ і -5 мкм для одержання цементу з ефективним використанням "потенціалу" зернового складу.

Реалізацію ідентифікації способів, режимів і систем здрібнювання щодо якості ЗС та енергетичної ефективності процесу пропонуємо здійснити за рахунок розробленого нами на основі принципу селективності такого комплексу оригінальних розробок:

- попереднє подрібнення матеріалу до розміру, менше граничного [2], в розроблених у ХДТУБА барабанно-валкових млинах [3], що забезпечують найбільш ефективний спосіб внутрішньошарового самоподрібнення в товстому шарі матеріалу;

- попереднє здрібнення важкоподрібнюваного матеріалу до потрібного ступеня при помелі багатокomпонентних цементів [4] при певній добавці компоненту більш міцного, ніж клінкер формується ЗС високої однорідності ($n = 0,94...1,02$ і $d^1 = 23...27$ мкм), що підвищує міцність до 20%;

- пневмоподача крупки після сепаратору на ті ділянки кульової камери, де згідно з діаграмою помелу знаходиться найбільша кількість матеріалу того ж розміру, що й крупка [5];

- подача поверхнево-активних речовин (ПАР) на ті ділянки кульової камери, де згідно з діаграмою помелу знаходиться найбільша кількість важкоподрібненого матеріалу [6], а також подача в зону розподілу сепаратора тих ПАР, що підвищують рухливість часток матеріалу [7].

Таблиця 4 – Взаємозв'язок дисперсних характеристик, активності та питомих енерговитрат

Активність цементу, R_{ct}	Вміст фракцій +5-30 мкм, %	Питома поверхня, S , cm^2/g	Коефіцієнт рівномірності, n	Характерний розмір, d^1 , мкм	Вміст фракцій – 5 мкм	Відношення +5-30/-5	Питома енерговитрати, E , kWh/t
40	42	2830	0,8	30	21,2	1,98	27,1
45	46,4	3170	0,85	25	22,5	2,06	32,0
50	51,3	3710	0,9	20	25	2,05	39,7
55	54,8	3850	0,95	17,5	26,2	2,09	50,0
60	58,0	4080	1,0	15,0	28,3	2,05	54,7
65	58,0	4850	1,02	12,5	33,2	2,0	66,9
70	61,7	5170	1,05	10,0	34,1	1,8	81,4
75	51,7	5670	1,1	7,5	46,2	1,1	115

Таким чином, збільшення коефіцієнту рівномірності n при раціональних значеннях характеристичного діаметра d^1 є найбільш ефективним способом підвищення якості цементу та створення спеціальних цементів із заданими властивостями при одночасному зниженні питомих енерговитрат, що дозволяють здійснити без додаткових капітальних витрат розроблені нами заходи.

1. Богданов В.С., Несмеянов Н.П., Пироцкий В.З. и др. Механическое оборудование предприятий промышленности стройматериалов. – Белгород: БелГТАСМ, 1998. – 180 с.

2. Способ регулирования процесса измельчения материалов в трубной мельнице: А.с.1151305 SU, В02С 25/00 / А.Н.Иванов, А.Г.Кисель, Б.В.Алексеев (СССР). – №3594763/29-33; Заявл.25.05.83. Опубл.23.04.85, Бюл. №15. – 3 с.

3. Пат. 1655 Україна, В02С17/10, В02С15/16. Барабанный млин / Є.Д.Веріч, А.М.Іванов, В.Н.Лямін та ін. (Україна). – №4375439/SU; Заявл. 15.10.93; Опубл. 25.10.94, Бюл. №3. – 2 с.

4. Декл. пат. 34780, Україна, В02С 19/00. Спосіб отримання багатокомпонентного цементу / А.М.Іванов (Україна). – №99073829; Заявл. 06.07.1999; Опубл. 15.03.2001, Бюл. №2. – 5 с.

5. Способ помола цемента: А.с.1079288 SU, В02С 19/00 / А.А.Молодцов, В.А.Чурюмов, К.Ф.Матвиенко, А.Б.Бреслер, В.З.Пироцкий, А.Н.Иванов (СССР). – №3556489/29-33; Заявл. 22.02.83; Опубл.15.03.84, Бюл. №10. – 4 с.

6. Способ помола портландцементного клинкера и добавок: А.с.607589 СССР, В02С23/06 / В.З.Пироцкий, А.Н.Иванов, Н.С.Мацуев, А.А.Боровик (СССР). – №2445550/29-33; Заявл. 24.01.77; Опубл. 25.05.78, Бюл. №19. – 3 с.

7. Пат. 76878 Україна, В02С 17/10, 19/00. Спосіб подрібнення матеріалів у замкнутому циклі / А.М.Іванов, О.Ю.Чудний (Україна). – №20041210164; Заявл. 10.12.2004; Опубл. 15.08.2006, Бюл. №9. – 3 с.

Отримано 07.01.2007