

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, П.В. СЕРГЄЄВ, д-ри техн. наук,
А.П. ВОРОБИЙОВ

(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЯЦІЇ БУРОГО ВУГІЛЛЯ

Постановка проблеми та стан її вивчення. Буре вугілля займає важливе місце в паливно-енергетичному балансі України – його частка складає 6,6%. В нашій країні зосереджено 3,5% світових запасів бурого вугілля. Його можна використовувати як сировину у процесах брикетування, зрідження, газифікації, піролізу [1]. Водночас воно має ряд специфічних властивостей, які перешкоджають його масштабному використанню: висока вологість і гігроскопічність, висока реактивна здатність до кисню, дещо занижена температура згоряння. Ці характеристики обумовлюють неможливість його тривалого зберігання, перевезення на великі відстані, велику імовірність самозаймання.

Актуальним також є питання переробки і облагородження бурого вугілля при його гідротранспортуванні. Існує дві принципово різні технології гідравлічного транспортування вугілля. Перша технологія – транспортування у гідросумішах масовою концентрацією $C \approx 50\%$ з подальшим зневодненням на приймальному терміналі. Друга технологія гідравлічного транспортування вугілля – у вигляді висококонцентрованих водо-вугільних суспензій (ВВВС) [2].

Таким чином існує проблема розробки такої технології первинної переробки бурого вугілля, яка б враховувала специфічні властивості вихідного бурого вугілля, умови процесу гідравлічного транспортування вугілля і вимоги до характеристик вугільної сировини подальших операцій по його переробці – піролізу, спалювання, зрідження, брикетування, зневоднення. Рішенням цієї проблеми може стати технологія обробки вугілля масляними реагентами – масляна агрегація.

У роботі [3] нами виконано попередні дослідження масляної агломерації (грануляції) бурого вугілля, що дало змогу встановити область раціональних режимних параметрів, вказати найбільш значимі з них – витрати зв'язуючого, рН середовища і його температура, швидкість обертання вала імпелера мішалки-гранулятора.

Мета цієї роботи – дослідження процесу масляної грануляції бурого вугілля із застосуванням методу планування експерименту та одержання і аналіз математичної регресійної моделі процесу масляної грануляції.

Результати досліджень і їх аналіз

Для розробки регресійної моделі використовується центрально-композиційний рототабельний план другого порядку. Досліджувався вплив на процес масляної грануляції чотирьох головних факторів: витрати зв'язуючого $Q_{зв}$, температура середовища t_c , швидкість обертання вала імпелера мішалки-

Загальні питання технології збагачення

гранулятора n , показник рН середовища. Фактори та границі їх варіювання вибрані на основі даних [3] наведені в таблиці 1.

Як вихідне прийняте буре вугілля крупністю 0-1 та 0-3 мм, зольністю $A^d=10,65\%$, а як реагент зв'язуюче прийнято мазут марки М 100.

Експериментальна область факторного простору: $Q_{зв}=5\dots25$ мас.% від вугілля, $t_c=15\dots55$ °С, $n=600\dots1900$ хв⁻¹, рН=5...9. Цільова функція – діаметр гранул D . Для розробки плану експерименту та обробки одержаних експериментальних даних використовувалася стандартна комп'ютерна програма Statgraphics 5.1.

Таблиця 1

Фактори, що впливають на процес масляної грануляції, та границі їх варіювання

Фактор	Код фактора	Одиниця вимірювань	Рівні факторів				
			-2	-1	0	+1	+2
Витрати зв'язуючого, $Q_{зв}$	X_1	мас.%	5	10	15	20	25
Температура середовища, t_c	X_2	°С	15	25	35	45	55
Швидкість обертання вала, n	X_3	хв ⁻¹	600	1000	1300	1600	1900
Показник рН середовища	X_4	–	5	6	7	8	9

При розробці регресійної моделі процесу використано центральноконпозиційний рототабельний план другого порядку, який забезпечує однакову похибку по всьому факторному простору [4, 5].

Одержаний поліном з урахуванням значущості коефіцієнтів моделі має вигляд:

$$D = 0,9 + 0,45 \cdot X_1 - 0,075 \cdot X_2 + 0,116667 \cdot X_3 - 0,25 \cdot X_4 + 0,24375 \cdot X_1^2 + 0,0 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,125 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,175 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,10625 \cdot X_2^2 - 0,0875 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0875 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,01875 \cdot X_3^2 + 0,0125 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,11875 \cdot X_4^2$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому вигляді. Модель адекватна процесу, що досліджується. Про це свідчить високе значення коефіцієнта детермінації ($R^2 = 97,9\%$) і низьке значення стандартної похибки експерименту $SE = 0,143284$

На рис. 1 подано стандартизований парето-графік, згідно якого коефіцієнти при членах рівняння регресії X_1 , X_4 , X_1^2 , $X_1 \cdot X_4$, X_3 , $X_1 \cdot X_3$, X_4^2 , X_2^2 , X_2 , $X_2 \cdot X_3$, $X_2 \cdot X_4$ статистично значимі. Найбільше впливають на діаметр гранул витрати зв'язуючого X_1 , другий за значимістю фактор – рН середовища X_4 . Інші фактори впливають на цільову функцію значно менше. Збільшення факторів X_1 та X_2 , приводить до збільшення діаметра гранул, а збільшення факторів X_2, X_4 – до його зменшення.

На парето-графіку показано характер і ступінь впливу факторів та ефектів їх взаємодій на діаметр D .

Standardized Pareto Chart for D

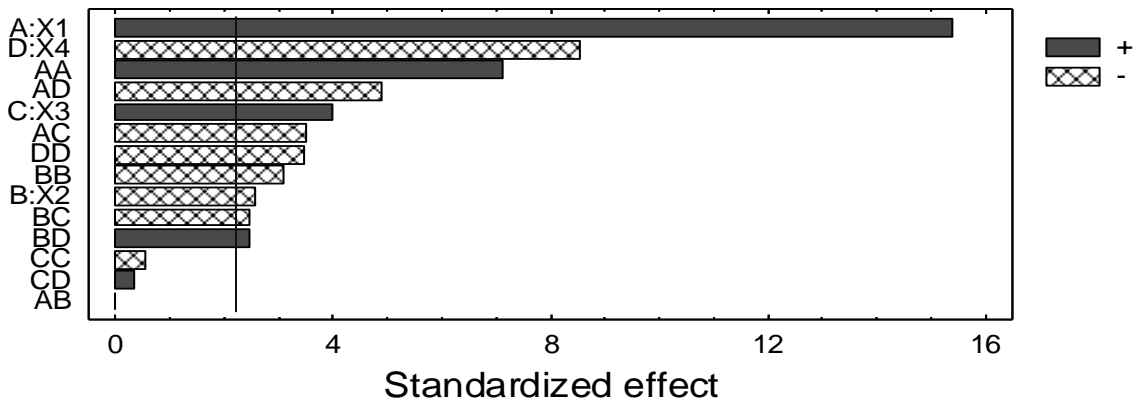


Рис. 1. Значимість коефіцієнтів моделі (парето-графік)

На рис. 2 зображений графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції. Як бачимо, в більшості випадків різниця між цими даними невелика. Більшість експериментальних точок знаходиться поблизу прямої лінії.

Plot of D

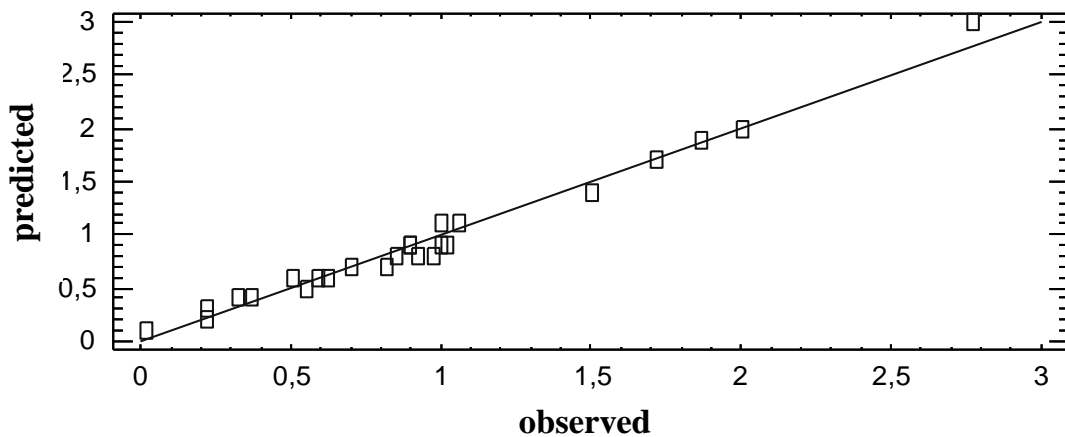


Рис. 2. Графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції.

На рис. 3. подані часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції $D(X_1, X_2)$ і $D(X_3, X_4)$. На рис. 4 наведені контурні криві цих гіперповерхонь. Простежується чітке збільшення діаметра D вуглемаляних агрегатів D (гранул) з ростом витрат зв'язуючого в області $Q_{зв} = 5...25$ мас.%. При збільшенні $Q_{зв}$ з 10 до 20 мас.% діаметр D збільшується з 0,7 до 1,7 мм.

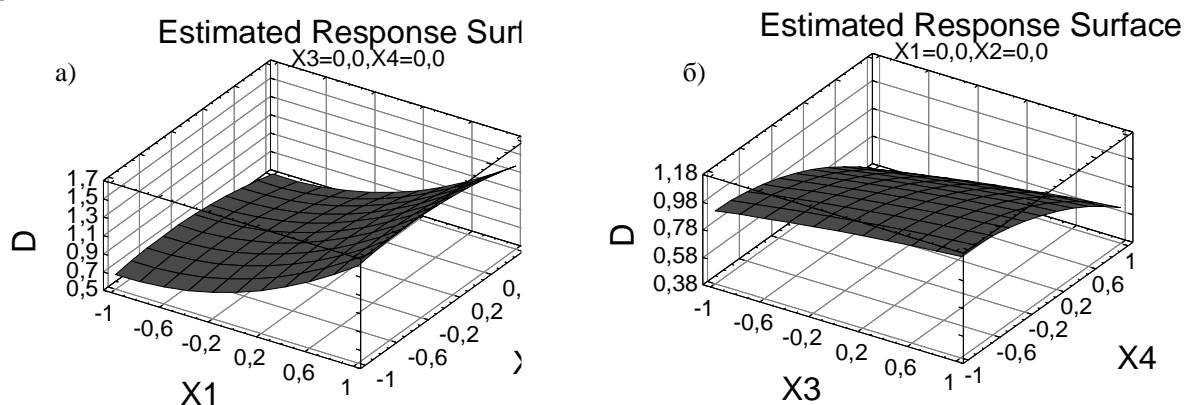


Рис. 3. Часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції:
а – $D(X_1, X_2)$; б – $D(X_3, X_4)$

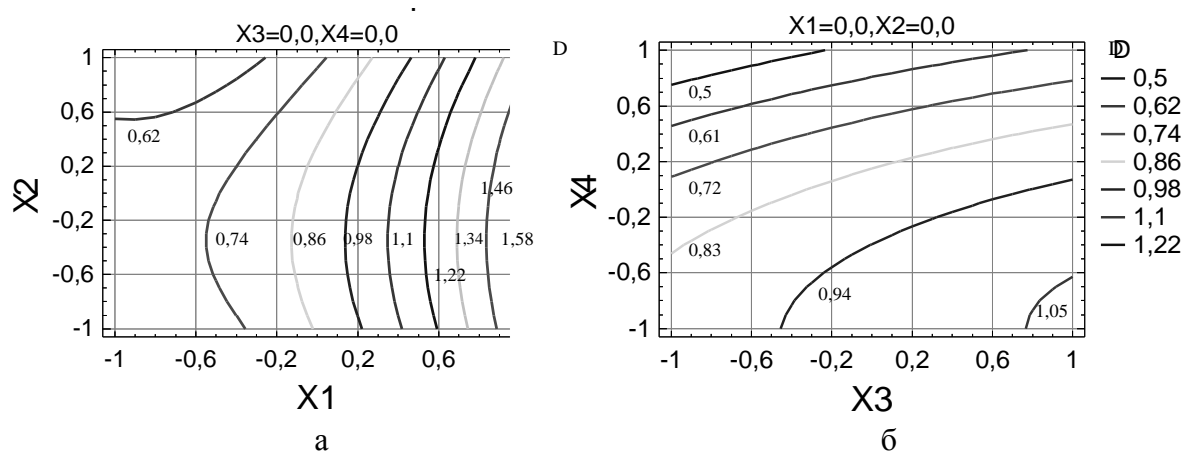


Рис. 4. Контурні криві гіперповерхонь:
а – $D(X_1, X_2)$; б – $D(X_3, X_4)$

Результати оптимізації показують, що максимальна крупність гранул складає $D=3,6$ мм. Режимні параметри, які забезпечують досягнення такого результату у перерахування на натуральні значення факторів: $Q_{зв}=25$ мас.%, $t_c=22,5$ °C, $n = 1300$ хв⁻¹, рН = 5.

Висновки

1. За результатами дослідів встановлено, що в процесі грануляції бурого вугілля вплив досліджуваних факторів на діаметр гранул за значимістю має таку послідовність: витрати зв'язуючого, показник рН середовища, швидкість обертання вала, температура середовища.

2. Одержана математична модель процесу грануляції бурого вугілля може бути використана для поглибленого дослідження впливу на процес обраних факторів, а також визначення режимних параметрів що забезпечують максимальну крупність гранул.

У подальших дослідженнях доцільно оцінити технологічні характеристики вугільно-масляних агломератів на основі бурого вугілля як об'єктів брикетування, піролізу, зрідження, газифікації та гідравлічного транспортування.

Список літератури

1. Саранчук В.І., Ільяшов М.О., Ошовський В.В., Білецький В.С. Основи хімії і фізики горючих копалин. (Підручник з грифом Мінвузу). – Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – 640 с.
2. Круть О.А. Водовугільне паливо. – К.: Наук. Думка, 2002. – 172 с.
3. Білецький В.С., Воробйов А.П. Дослідження масляної агломерації бурого вугілля // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 50(91). – С. 142-147.
4. Бродский Б.З., Бродский Л.И., Голикова Т.И. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей. – М.: Металлургия, 1982. – 752 с.
5. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. – М.: Металлургия, 1981. – 152 с.

© Білецький В.С., Сергеев П.В., Воробйов А.П., 2012

*Надійшла до редколегії 25.06.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.І. Назимко*