

УДК 622.7

П.В. СЕРГЄЄВ, д-р техн. наук

(Україна, Донецьк, Державний ВНЗ "Донецький національний технічний університет"),

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук

(Україна, Полтава, Державний ВНЗ "Полтавський національний технічний університет")

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СИМПЛЕКС-ГРАТЧАСТОГО (ЦЕНТРОЇДНОГО) ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ ВУГІЛЬНОЇ ШИХТИ ПРИ БРИКЕТУВАННІ

Постановка проблеми. У практиці переробки корисних копалин часто доводиться вирішувати завдання оптимізації складу багатокомпонентної суміші – наприклад, визначення оптимального гранулометричного складу вихідної сировини збагачувальних апаратів, складу композиційних реагентів і т.п. Методи активного планування експерименту, зокрема часто застосовувані – повний факторний експеримент, ротатабельне центральнокпозиційне планування, плани Бокса-Бенкена тощо, – в даному випадку використати не можна, так як на незалежні змінні накладено обмеження[1-4]:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1; x_i \geq 0, \quad (1)$$

де x_i – вміст i -того компонента в суміші, що з n компонентів, частки одиниці, тобто вміст усіх компонентів у будь-якої суміші завжди дорівнює одиниці або 100%.

Мета статті – знаходження оптимального ситового складу вихідної шихти бурого вугілля при його брикетуванні методом симплекс-гатчастого (центроїдного) планування експерименту .

Виклад основного матеріалу. Метод симплекс-гатчастого (центроїдного) планування експерименту використовується для дослідження систем "склад-властивість" [5].

Методика симплекс-гатчастого планування експерименту. Так як сума часток всіх компонентів, що складають суміш, дорівнює одиниці, то факторний простір може бути представлено правильним симплексом, для трьох компонентів правильним трикутником, для чотирьох – правильним тетраедром і т.д. Властивості складу досліджуються в наперед заданих точках симплекса, які утворюють так звану *симплексну решітку*.

У разі трикомпонентної суміші кожній точці трикутної діаграми відповідає один, цілком певний склад, а кожному складу відповідає одна точка на діаграмі. У кожній вершині трикутної діаграми вміст одного компонента становить 100%. На протилежній цій вершині стороні вміст цього компонента дорівнює нулю. Сторони трикутника відповідають бінарним сумішам (рис. 1.).

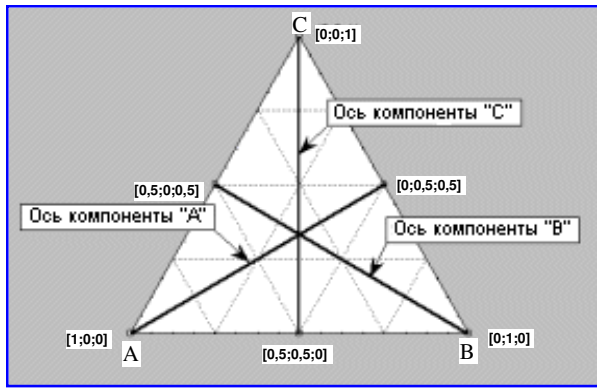


Рис. 1. Трикутна діаграма трикомпонентної суміші

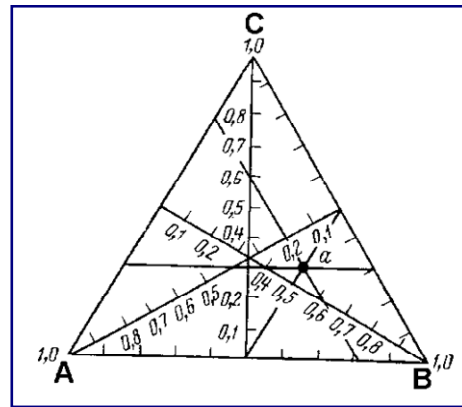


Рис. 2. Концентраційний трикутник Гіббса

Розглянемо побудову *концентраційного трикутника Гіббса*, використовуваного при розробці та аналізі плану експерименту. З кожної вершини правильного трикутного симплекса проведемо висоту, розділимо кожну з них, наприклад, на десять частин і, провівши через отримані ділення прямі, паралельні відповідним сторонам трикутника, отримаємо трикутну сітку (рис. 2.). Відлік ведемо від точок перетину висот і сторін трикутника. Кожна точка, що лежить в межах трикутного симплекса характеризується трьома координатами (вмістом компонентів А, В і С). Наприклад, точці *a* на рис. 2 відповідає такий вміст компонентів: А = 0,2; В = 0,5; С = 0,3.

Як правило, поверхні відгуку в багатокомпонентних системах мають вельми складний характер. Для адекватного опису таких поверхонь використовують поліноми високих ступенів. У разі трикомпонентних систем найбільш часто застосовуються плани другого і третього порядку, з розробкою квадратних і кубічних моделей відповідно. Розташування дослідів на симплексі для цих моделей представлено на рис. 3.

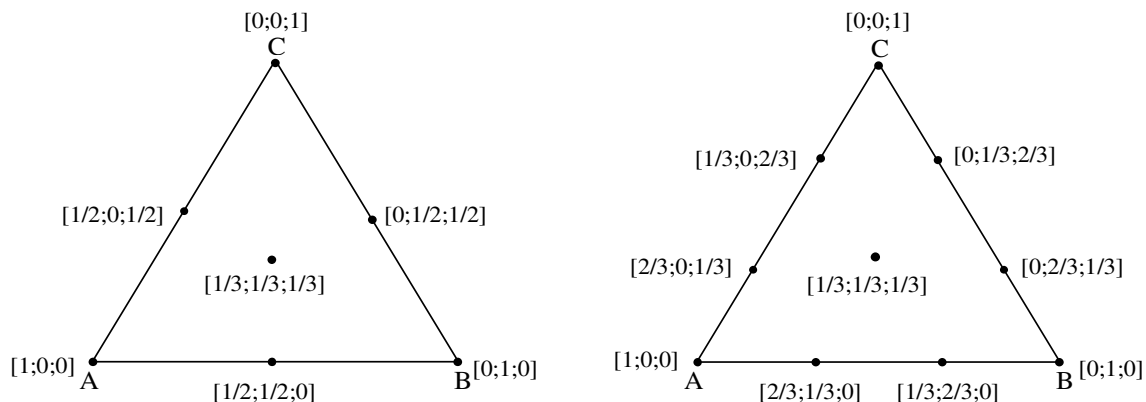


Рис. 3. Розташування дослідів на симплексі при розробці квадратних і кубічних моделей

Визначення оптимального складу шихти при брикетуванні. Розглянемо особливості симплекс-гратчастого планування для випадку визначення оптимального складу шихти при брикетуванні молодого бурого вугілля без зв'язуючих.

Ефективність брикетування бурого вугілля на штемпельних пресах багато в чому визначається ситовим складом вихідного вугілля. Теоретичний принцип підбору суміші частинок різної крупності полягає у створенні композиції, що володіє найбільш щільною упаковкою зерен. Такі композиції забезпечують максимальну міцність буровугільних брикетів.

Визначимо оптимальний ситовий складу бурого вугілля Олександрійського родовища крупністю 0-4 мм. Вихідна шихта формувалася з трьох вузьких класів: 0-1, 1-2 і 2-4 мм. При цьому вологість шихти знаходилася в межах 15-16%.

Подібні дослідження найбільш доцільно проводити методами симплекс-гратчастого або симплекс-центроїдного (Simplex-Centroid) планування для систем "склад-властивість". У даних дослідженнях був використаний симплекс центроїдний план Шеффе, що забезпечує рівномірний розкид експериментальних точок в факторному просторі. В якості цільової функції використовували показник механічної міцності буровугільних брикетів на стиск P (МПа). Брикетування проводили на гідравлічному пресі ІІ-1 при тиску пресування 100 МПа.

Розробка плану експерименту та аналіз одержаної регресійної моделі здійснювалися за допомогою статистичного модулю "Планування експерименту" програми Statgraphics 5.1 Plus.

Позначимо клас крупності вихідного бурого вугілля 0-1 мм як X_1 і задамо його нижню та верхню межі варіювання 0 і 1. Клас крупності бурого вугілля 1-2 мм позначимо як X_2 і задамо його межі варіювання (пайова участь в шихті) від 0 до 1. А клас крупності бурого вугілля 2-4 мм. позначимо як X_3 і аналогічно задамо його межі варіювання від 0 до 1. За функцію відгуку візьмемо механічну міцність брикетів P .

Спеціальна кубічна модель в нашому випадку являє собою квадратичну модель плюс зважений добуток трьох компонентів суміші.

Після реалізації матриці експерименту шляхом проведення лабораторних досліджень та отримання значень цільової функції в кожному з дослідів отримана таблиця.

Проаналізуємо експериментальні дані. У зведенні проведеного аналізу (рис. 4.) наведено стандартні статистичні характеристики для кожного типу поліноміальної моделі. З отриманих цифр випливає, що статистично значущі ефекти спостерігаються у спеціальній кубічній моделі (р-значення менше 0,05). Так як у спеціальній кубічній моделі значення SE (квадратні корені з середніх квадратів помилок) менше, а значення коефіцієнтів детермінації R-квадратів більше, ніж у інших моделей, подальший аналіз орієнтований на спеціальну кубічну модель.

Загальні питання технологій збагачення

Матриця планування і результати експериментів

№ досліджу	Компоненти (класи крупності)			Міцність брикетів P, МПа
	X ₁ (0-1 мм)	X ₂ (1-2 мм)	X ₃ (2-4 мм)	
1	1	0	0	19,1
2	0	1	0	18,8
3	0	0	1	14,0
4	0,5	0,5	0	20,5
5	0,5	0	0,5	16,7
6	0	0,5	0,5	15,6
7	0,3333	0,3333	0,3333	19,3
8	0,6666	0,1666	0,1666	19,8
9	0,1666	0,6666	0,1666	19,1
10	0,1666	0,1666	0,6666	16,7

Як впливає з отриманих даних, всі члени спеціальної кубічної моделі мають значимі ефекти ($p < 0,05$), крім одного коефіцієнта AC (X_1X_3). З урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії має наступний вигляд:

$$P = 19,1118 \cdot X_1 + 18,7481 \cdot X_2 + 14,0754 \cdot X_3 + 6,11977 \cdot X_1 \cdot X_2 - 3,15295 \cdot X_2 \cdot X_3 + 45,3178 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Estimated Full Model Effects for P					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Mean	3225,62	1	3225,62		
Linear	32,5911	2	16,2956	16,84	0,1622
Quadratic	4,6601	3	1,55337	2,94	0,0056
Special Cubic	1,99547	1	1,99547	51,02	0,0021
Error	0,117324	3	0,0391082		
Total	3264,98	10			

Full Model Results			
Model	SE	R-Squared	Adj. R-Squared
Linear	0,983644	82,79	77,88
Quadratic	0,726773	94,63	87,92
Special Cubic	0,197758	99,70	99,11

Рис. 4. Зведення результатів аналізу експериментальних даних

Високий рівень значущості ($p < 0,05$), велике (більше 99%) значення коефіцієнта детермінації R-квадрат і мале значення стандартної помилки оцінки SE ($SE = 0,1977$) свідчать про адекватність отриманої моделі досліджуваному процесу.

Аналіз показує, що максимальна міцність брикетів ($P = 20,5$ МПа) досягається при наступному співвідношенні класів крупності: X_1 (0-1мм) – 50%; X_2 (1-2 мм) – 44%; X_3 (2-4 мм) – 6%.

На графіку (рис. 5) чітко простежується екстремальний характер залежності міцності буровугільних брикетів від складу трикомпонентної шихти. При цьому зростання вмісту в шихті класів 0-1 мм (компонент X_1) і 1-2 мм (фактор X_2) однозначно супроводжується збільшенням міцності брикетів. При цьому найбільш ефективними є не моно-, а полідисперсні композиції, що складаються з двох і більше класів крупності. У теж час, істотне зростання вмісту класу 2-4 мм небажане, оскільки призводить до різкого зниження міцності брикетів. Зростання вмісту в шихті крупнішого класу (2-4 мм) супроводжується меншою щільністю упаковки вугільних зерен в структурі брикету, збільшенням їх пористості і, як наслідок, зниженням міцності брикетів. Крім того, більш великі вугільні частинки схильні в процесі пресування до розтріскування внаслідок відносно низької міцності. В результаті частина енергії пресування витрачається не на корисні пластичні деформації, а на крихке руйнування великих часток.

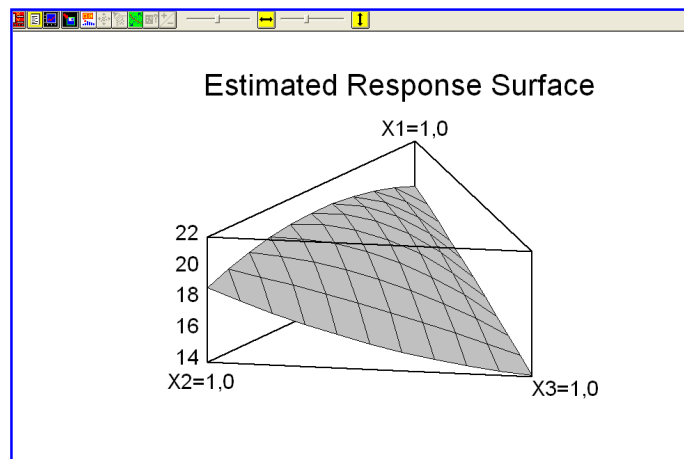


Рис. 5. Графік поверхні функції відгуку

На рис. 6 представлений первісний контурний графік поверхні відгуку у вигляді контурних ліній рівних значень проєкцій цільової функції P на трикомпонентний симплекс. Використовуючи опцію Painted Regions (пофарбовані області) отримуємо нижній рисунок рис. 6 б. Забарвлені зони, відповідають певному інтервалу зміни цільової функції.

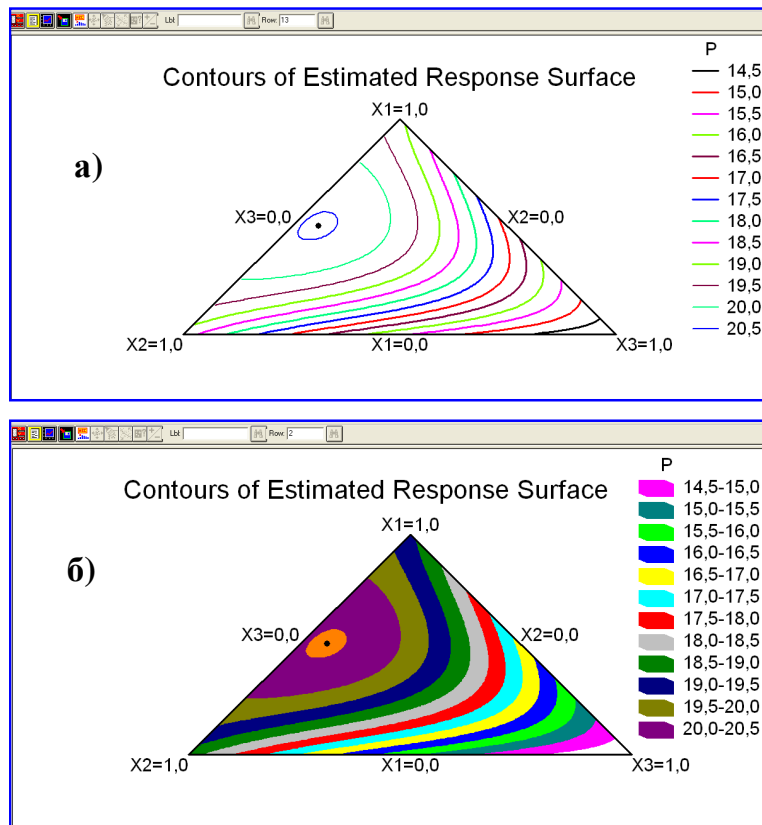


Рис. 6. Контурні графіки поверхні відгуку

Чорною точкою на обох контурних графіках позначено оптимальне співвідношення класів крупності, що забезпечує максимальну міцність буровугільних брикетів.

Висновок

Таким чином, проведені дослідження показують, що максимальна міцність буровугільних брикетів досягається при пресуванні полідисперсного вугілля. Однорідний (монодисперсний) склад вихідної шихти не дозволяє забезпечити високу щільність упаковки зерен в структурі брикету. Зерна укладаються зі значним числом пустот в каркасі. Тиск пресування нерівномірно розподіляється в об'ємі матеріалу, брикети легко деформуються.

У разі брикетування вугілля крупністю 0-4 мм, оптимальний ситовий склад вихідної шихти відповідає наступному співвідношенню класів: 0-1 мм – 50%; 1-2 мм – 44%; 2-4 мм – 6%.

Список літератури

1. Білецький В.С., Смирнов В.О. Моделирование процесів збагачення корисних копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. – 304 с.
2. Козин В.З. Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 112 с.

Загальні питання технологій збагачення

3. Рубинштейн Ю.Б., Волков Л.А. Математические методы в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 296 с.

4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 254 с.

5. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 296 с.

Сергеев П.В., Белецкий В.С., 2016

*Надійшла до редколегії 12.02.2016 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*