

УДК 622.7

П.В. СЕРГЄЄВ, д-р техн. наук

(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет),

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук

(Україна, Полтава, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНЕВОДНЕННЯ ВУГІЛЬНИХ ФЛОТОКОНЦЕНТРАТІВ ВАКУУМНИМ ФІЛЬТРУВАННЯМ

Постановка проблеми. Комп'ютерна система планування експерименту STATGRAPHICS Plus for Windows, істотно змінила практику моделювання технологічних процесів. Якщо раніше це вважалося сферою обмеженого кола кваліфікованих професіоналів в математичній статистиці, то сьогодні планування стало доступне широкому колу фахівців в інших галузях знань. Разом з тим, практика активного факторного планування процесів збагачення корисних копалин ще не настільки широка, як в інших галузях [1-8]. У нашій попередній роботі описано метод симплекс-гратчастого (центроїдного) планування експерименту і наведено приклад його використання для дослідження систем "склад-властивість" у брикетуванні. Пропонована стаття стосується методики застосування повного факторного планування технологічних процесів на основі центрально-композиційних ротатабельних планів.

Мета статті – на прикладі дослідження інтенсивної технології зневоднення вугільних флотоконцентратів вакуумним фільтруванням поширити досвід застосування методики повного факторного планування технологічних процесів збагачення корисних копалин на основі центрально-композиційних ротатабельних планів.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо алгоритм планування експерименту на прикладі дослідження інтенсивної технології зневоднення вугільних флотоконцентратів вакуумним фільтруванням. Метою даних досліджень є розробка та аналіз регресійної моделі інтенсивної технології зневоднення вакуумним фільтруванням тонкодисперсного вугілля з використанням поверхнево-активних речовин (ПАР).

1. Розробка плану

Досліджувався вплив на процес зневоднення чотирьох основних факторів, обраних на підставі апріорних даних: густини вихідної водовугільної суміші флотоконцентрату (X_1), зольності флотоконцентрату (X_2), величини вакуумметричного тиску (X_3) і витрати ПАР (X_4). Вибрані фактори задовольняють вимогам керованості, взаємнезалежності, однозначності, яким повинні задовольняти варіативні фактори при плануванні експерименту. Функція відгуку – во-

Збагачення корисних копалин, 2017. – Вип. 65(106)

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

логість вугілля W , зневодненого вакуумним фільтруванням. Область факторного планування представлена в табл.1.

Таблиця 1

Фактор	Код фактора	Одиниця виміру	Рівні факторів				
			-2	-1	0	+1	+2
Густина гідросуміші	X1	кг/м ³	100	150	200	250	300
Зольність флококонцентрата	X2	%	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0
Вакуумметричний тиск	X3	кПа	40	50	60	70	80
Витрати ПАР	X4	г/т	0	50	100	150	200

Двічі клацнувши на робочому столі комп'ютера на ярлику відкриємо вікно програми **STATGRAPHICS**. Виберемо меню **Special | Experimental Design | Create Design**. Система відобразить вікно діалогу для завдання параметрів плану експерименту. Встановимо перемикач **Design Class** (тип плану) в положення **Response Surface** (поверхня відгуку). Введемо 1 в полі числа змінних відгуку. Занесемо 4 в поле кількості вхідних факторів. Заповнене вікно діалогу зображено на рис. 1. Натиснемо кнопку **OK**. На екрані з'явиться ще одне вікно діалогу для опису досліджуваних вхідних факторів.

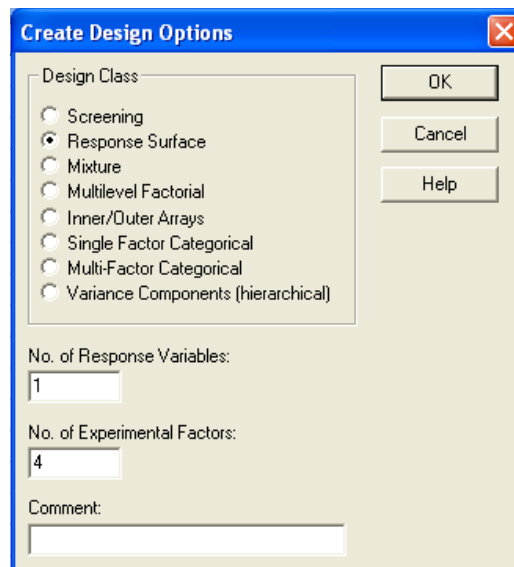


Рис. 1. Вікно діалогу для вибору параметрів плану

Для фактора **A** введемо ім'я **X1** і кодовані значення верхнього рівня (+1) і нижнього рівня (-1).

Виберемо положення перемикача **B** (фактор **B**). Для фактора **B** введемо ім'я **X2** і кодовані значення верхнього рівня (+1) і нижнього рівня (-1).

Аналогічним чином задамо імена і значення верхнього та нижнього рівня для двох, що залишилися факторів (**X3** і **X4**) – рис. 2.

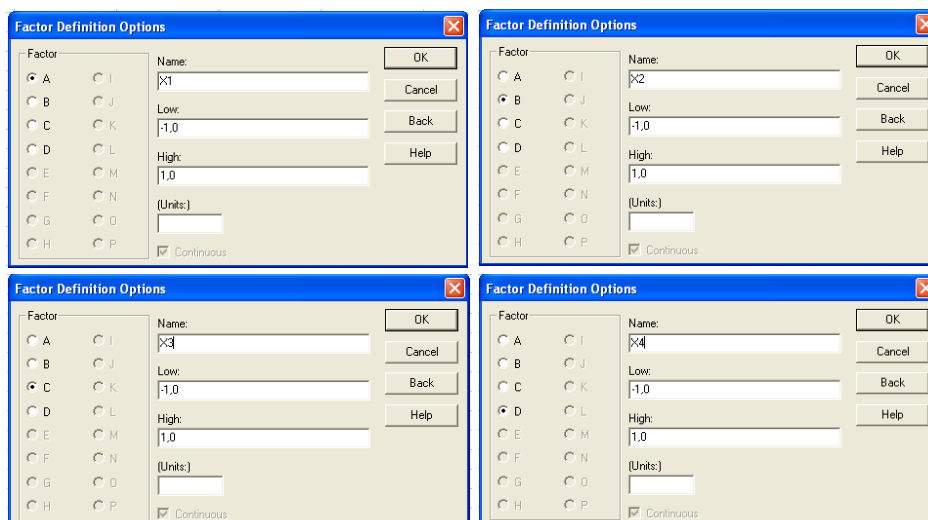


Рис. 2. Вікна діалогів для опису вхідних факторів

Натискаємо кнопку **OK**. На екрані з'явиться вікно діалогу для опису функції відгуку. Введемо позначення відгуку **W** (вологість), а також його розмірність (%) (рис. 3).

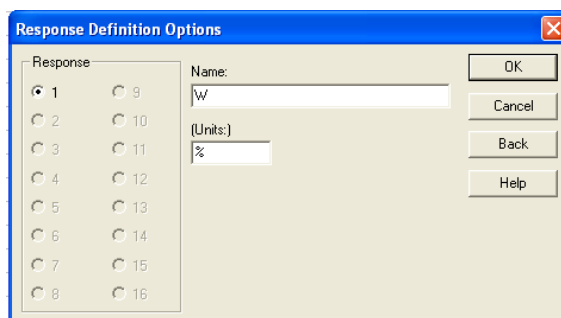


Рис. 3. Вікно діалогу для опису функції відгуку

Натиснемо кнопку **OK**. На екрані з'явиться діалогове вікно з параметрами поверхні відгуку (рис. 4). Використовуючи кнопку зі стрілкою вниз, розгорнемо список передбачуваних варіантів, виберемо **central composite design: 2⁴+star** (центрально-композиційний план 2⁴+зірка) і натиснемо кнопку **OK**.

З'явиться вікно діалогу опцій обраного композиційного плану (рис. 5). У верхньому рядку вікна з'являється найменування плану, нижче виведені загальна кількість необхідних експериментів (**Runs**) і число ступеня-ній свободи для помилки (**Error df**). Перемикач **Design Characteristics** (характеристики плану) встановимо в положення **Rotatable** (ротатабельний). Перемикач **Placement** (положення в план-матриці експерименту центральних точок) встановимо в положення **Last** (наприкінці) і знімемо прапорець **Randomise** (рандомізація). Кількість експериментів в центрі плану залишимо без змін (2 досліди). У нижній частині вікна наведено значення "зоряного плеча", яке для наших умов становить 2.

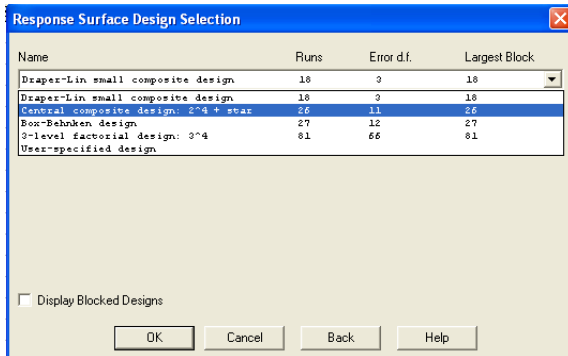


Рис. 4. Вікно діалогу з параметрами поверхні відгуку

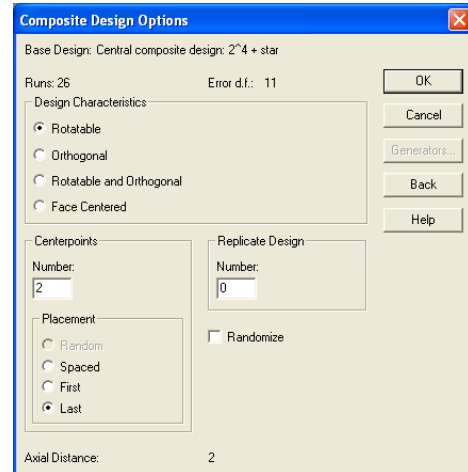


Рис. 5. Опції вибраного композиційного плану

Натиснемо кнопку **ОК**. Система видасть зведення експериментального плану у вікні атрибутів поверхні відгуку (рис. 6).

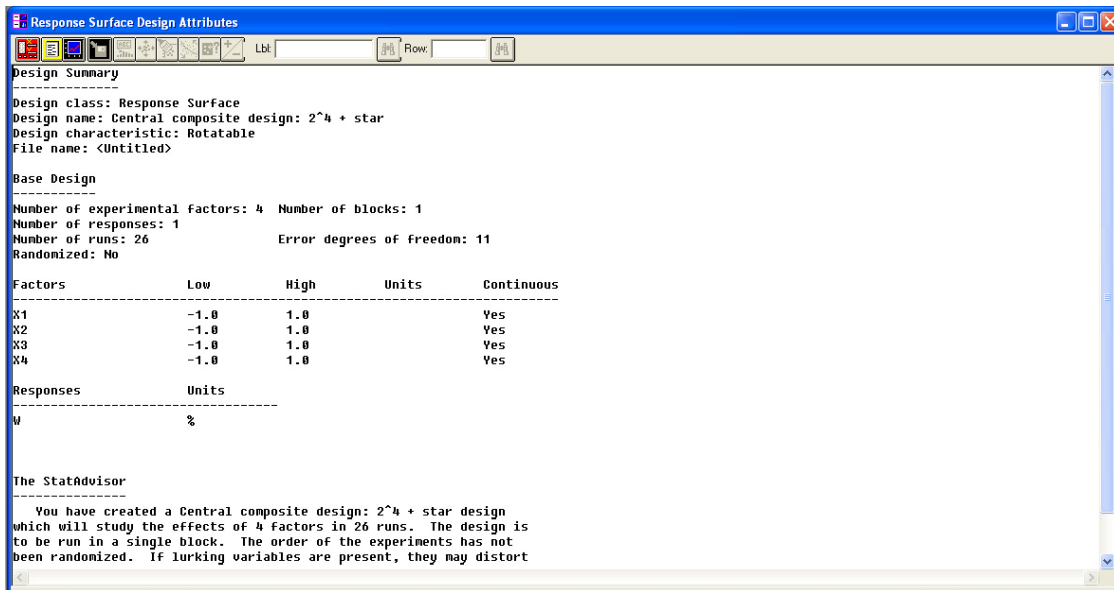


Рис. 6. Зведення у вікні атрибутів поверхні відгуку

Зведення включає ім'я плану і його тип, а також коментарі до експерименту. Тут же наведена інформація про фактори, відгуку, кількості експериментів, числі блоків, кількість центральних точок і ступенях свободи для помилки.

2. Задання імені, збереження плану експерименту і роздруківка робочої таблиці

Виберемо **File | Save Design File As**, з'явиться відповідне вікно діалогу

(рис. 7). Задамо ім'я плану зневоднення-1.sfx в папці Зневоднення-1 і натиснемо кнопку **ОК**.

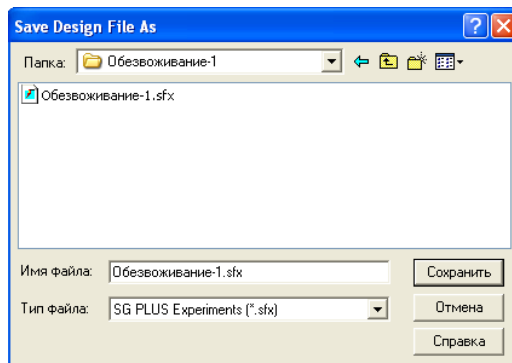


Рис. 7. Задання назви експериментального плану

Інженер-збагачувач тепер готовий продовжити свій експеримент і почати збирати дані. Насамперед необхідно роздрукувати робочу таблицю, в якій зазначений порядок проведення експериментів. У вікні атрибутів поверхні відгук натиснемо кнопку табличних опцій (рис. 8). У вікні діалогу встановимо прапорець **Worksheet** (робоча таблиця), знімемо прапорець **Design Summary** (зведення плану) і натиснемо кнопку **ОК** (рис. 9). Робоча таблиця відобразиться у другому вікні на пої аналізу. Двічі натиснемо на заголовок вікна робочої таблиці і тим самим максимізуємо її розміри (рис. 10).

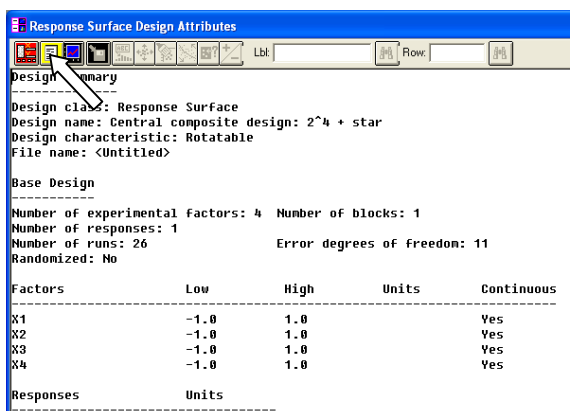


Рис. 8. Вікно атрибутів поверхні відгук

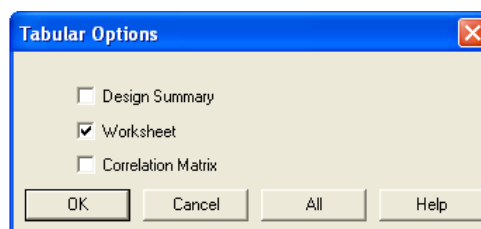


Рис. 9. Вікно діалогу для відображення робочої таблиці

Виберемо з меню **File | Print** – система надає вікно діалогу для роздрукування плану експерименту, що проводиться. Встановимо перемикач в положення **All Text Panes** (рис. 11) і натиснемо кнопку **ОК**. Система роздрукує зведення проведеного аналізу і робочу таблицю для збору даних.

Run	X1	X2	X3	X4	W (%)
1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	24,5
2	1,0	-1,0	-1,0	-1,0	26
3	-1,0	1,0	-1,0	-1,0	25,9
4	1,0	1,0	-1,0	-1,0	28
5	-1,0	-1,0	1,0	-1,0	22,5
6	1,0	-1,0	1,0	-1,0	24,3
7	-1,0	1,0	1,0	-1,0	22,3
8	1,0	1,0	1,0	-1,0	24,9
9	-1,0	-1,0	-1,0	1,0	22,9
10	1,0	-1,0	-1,0	1,0	23,3
11	-1,0	1,0	-1,0	1,0	25
12	1,0	1,0	-1,0	1,0	25
13	-1,0	-1,0	1,0	1,0	26
14	1,0	-1,0	1,0	1,0	26

Рис. 10. Робоча таблиця плану експерименту

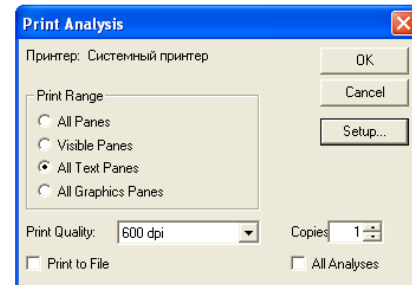


Рис. 11. Вікно діалогу друку

3. Проведення експерименту

Надалі здійснювалася серія лабораторних експериментів зі значеннями досліджуваних параметрів відповідно до роздрукованої матриці планування. За вихідний матеріал було прийняте вугілля марки ДГ шахти Південно-Донбаська №1. Крупність вугілля становила 0-0,5 мм (флотаційна крупність). Вугілля змішувався з водою і в готову гідросуміш дозували реагент-модифікатор згідно матриці планування. В якості модифікатора використовували аніон активний реагент – лігносульфонат натрію (побічний продукт переробки деревини в целюлозу). Процес фільтрування здійснювався на лабораторній фільтрувальній установці. За результатами експериментів визначалася вологість осаду W , яка, як зазначалося вище, виступала в якості цільової функції (функції відгуку) в дослідженнях. Матриця планування і результати її реалізації представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Матриця планування та експериментальні дані.

X_1	X_2	X_3	X_4	$W, \%$
1	2	3	4	5
-1	-1	-1	-1	24,5
1	-1	-1	-1	26
-1	1	-1	-1	25,9
1	1	-1	-1	28
-1	-1	1	-1	22,5
1	-1	1	-1	24,3
-1	1	1	-1	22,3
1	1	1	-1	24,9
-1	-1	-1	1	22,9
1	-1	-1	1	23,3
-1	1	-1	1	25
1	1	-1	1	26

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5
-1	-1	1	1	23
1	-1	1	1	24
-1	1	1	1	23,2
1	1	1	1	24,7
-2	0	0	0	23
2	0	0	0	26,3
0	-2	0	0	22,9
0	2	0	0	25
0	0	-2	0	25,9
0	0	2	0	23,2
0	0	0	-2	25,7
0	0	0	2	23,7
0	0	0	0	24,5
0	0	0	0	24,5

Для введення значень цільової функції **W** у вихідну таблицю відкриємо файл "**Зневоднення-1.sfx**" (рис. 12). У таблиці плану експерименту введемо в колонку **W** порядково відповідні значення цільової функції. Збережемо таблицю вибравши опції **File | Save | Save Design File**.

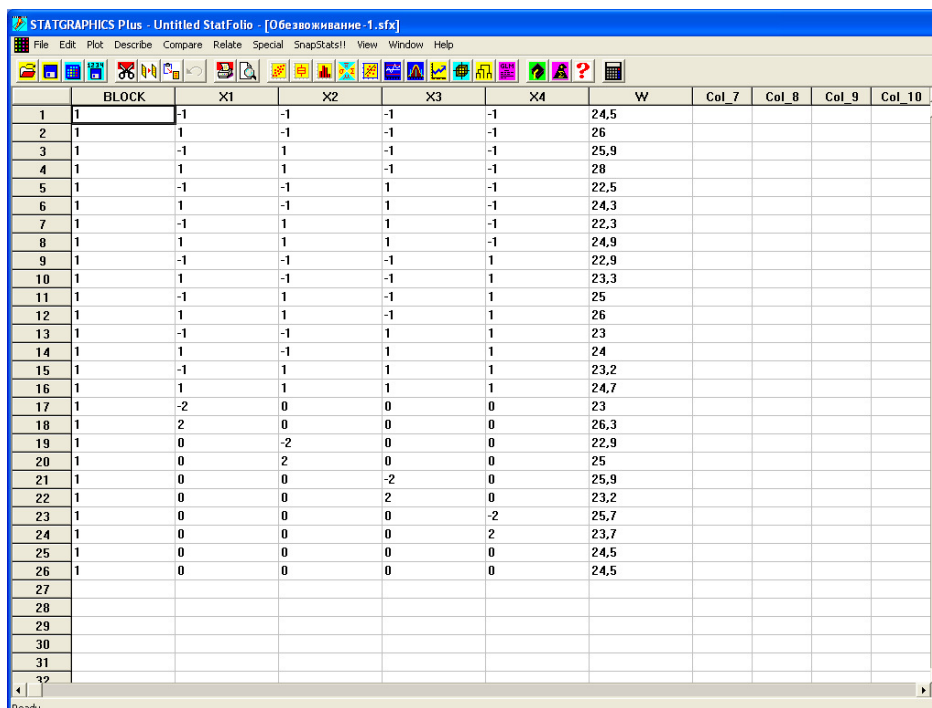


Рис. 12. План-матриця експерименту з введеними в неї значеннями цільової функції **W**

4. Аналіз експериментальних даних

Вибираємо в меню **Special | Experimental Design | Analyze Design** – з'явиться відповідне вікно діалогу. Двічі клацнемо на **W** для введення імені цільової функції. **Збагачення корисних копалин, 2017. – Вип. 65(106)**

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

льової функції в поле даних і натиснемо кнопку **ОК**. Система відобразить первинну зведення проведеного аналізу (рис. 13). Для детального аналізу отриманої регресійної моделі натиснемо кнопку табличних опцій (друга зліва у верхньому ряду жовтого кольору). На екрані з'явиться вікно діалогу. Виберемо опції **ANOVA Table** (таблиця дисперсійного аналізу), **Regression Coefficients** (коефіцієнти рівняння регресії) і **Predictions** (передбачення функції). Натиснемо кнопку **ОК**. В області аналізу з'явиться три додаткових вікна.

Двічі клацаємо лівою кнопкою миші у вікні дисперсійного аналізу для максимізації його розміру (рис. 14).

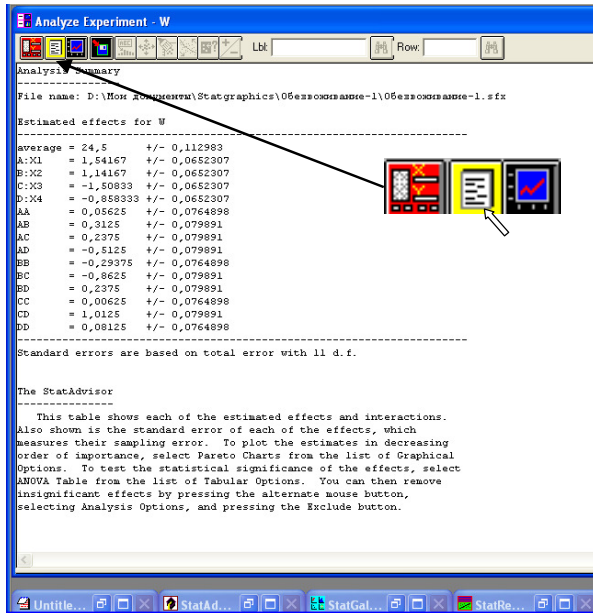


Рис. 13. Первинне зведення аналізу

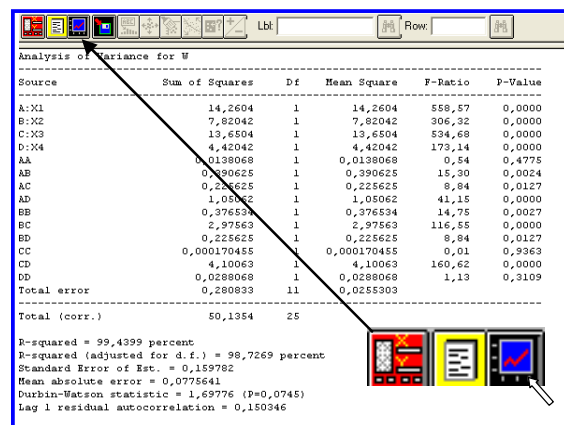


Рис. 14. Таблиця дисперсійного аналізу

Таблиця дисперсійного аналізу дозволяє оцінити статистичну значущість коефіцієнтів отриманої регресійної моделі. Коефіцієнти моделі, для яких р-рівень (**p-value**) менше 0,05, вважаються статистично значущими при довірчій ймовірності 95%. Як видно з наведених на рис. 14 даних, статистично значущими є коефіцієнти при лінійних членах рівняння регресії, членах, які відповідають парній взаємодії і коефіцієнт при X_2^2 . При цьому коефіцієнти при X_1^2 , X_3^2 і X_4^2 є статистично незначущими і при розрахунках за отриманою моделі можуть не враховуватися.

Найбільш зручно і наочно значимість коефіцієнтів моделі можна перевірити за допомогою Парето-карти. Для цього клацаємо кнопку графічних опцій (рис. 14) для виклику відповідного вікна діалогу. Встановимо прапорець **Pareto Chart** (Парето-карта) і натиснемо кнопку **ОК** (рис. 15). Горизонтальні стовпці, що перетинають вертикальну лінію, що відповідає 95% довірчої ймовірності, свідчать про статистичну значущість відповідних коефіцієнтів моделі. Парето-карта наочно підтверджує статистичну незначущість коефіцієнтів при X_1^2 , X_3^2 і X_4^2 , встановлену вище за допомогою таблиці дисперсійного аналізу (рис. 14).

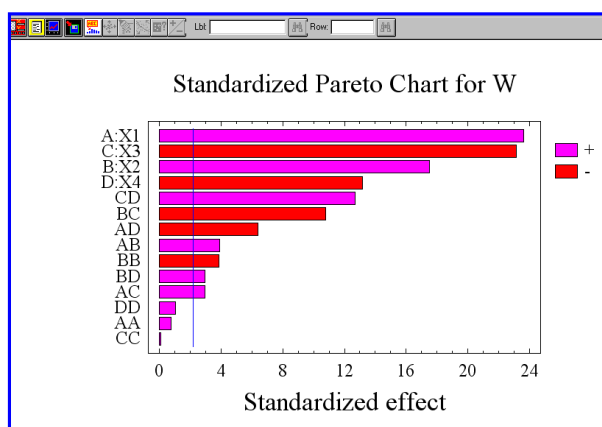


Рис. 15. Парето-карта коефіцієнтів моделі

Парето-карта також дає уявлення про порівняльну значущість вхідних факторів для досліджуваного процесу. Збільшення довжини горизонтальних стовпців свідчить про збільшення впливу на процес відповідного фактора. Як видно з рис. 15, на процес вакуумного фільтрування вугільного флотоконцентрату найбільш істотно впливає чинник X_1 , тобто густина суспензії флотоконцентрату. Далі за значимістю фактори убувають в наступній послідовності: X_3 (вакуумметричний тиск) → X_2 (зольність твердої фази) → X_4 (витрати ПАР).

Колонки, колір яких відзначений знаком плюс, відповідають факторам і їх парним взаємодіям, які сприяють зростанню цільової функції (вологості осаду в нашому випадку). І, навпаки, колонки, колір яких відзначений знаком мінус, відповідають факторам і їх парним взаємодіям, які сприяють зменшенню значень цільової функції.

Двічі клацнемо лівою кнопкою миші у вікні **Regression Coefficient** для максимізації його розміру (рис. 16). У цьому вікні представлені значення коефіцієнтів рівняння регресії. У нижній частині цього ж вікна представлено саме рівняння регресії у вигляді полінома другого ступеня. Відповідно до даних, наведених на рис. 16, рівняння регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W = & 24,5 + 0,770833X_1 + 0,570833 \cdot X_2 - 0,754167 \cdot X_3 - 0,429167 \cdot X_4 + \\
 & + 0,15625 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,11875 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,25625 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,146875 \cdot X_2^2 - \\
 & - 0,43125 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,11875 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,50625 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned} \quad (1)$$

Адекватність отриманої моделі досліджуваному процесу підтверджується високим значенням (близько 100%) коефіцієнта детермінації $R^2 = 99,44\%$, а також малим значенням стандартної помилки оцінки $SE = 0,1598$ (рис. 14).

Натиснемо на кнопки графічних опцій і у вікні **Graphical Options** (властивості графіка) виберемо опцію **Diagnostic Plots** (діагностичний графік). У новому графічному вікні, що з'явилося, двічі клацнемо лівою кнопкою миші для максимізації його розміру. У цьому ж вікні клацнемо правою кнопкою

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

миші і в контекстному виберемо опцію **Pane Options**. У новому графічному вікні, що з'явилося **Diagnostic Plot Options** (властивості діагностичного графіка) відзначимо опцію **Observed vs Predicted** (відповідність між експериментальними і розрахунковими даними) і натиснемо кнопку **ОК**. У вікні в графічній формі дано порівняння експериментальних (observed) та розрахункових (predicted) даних (рис. 17).

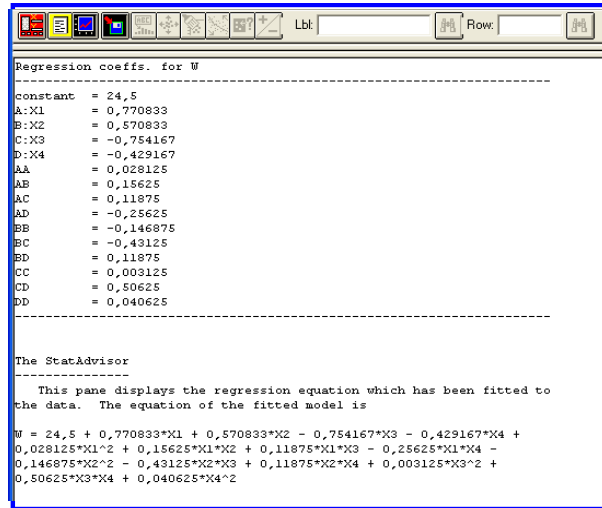


Рис. 16. Значення коефіцієнтів рівняння регресії

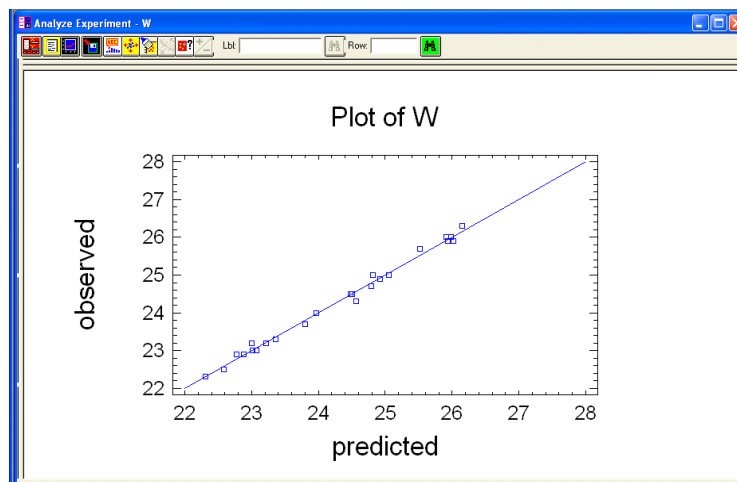
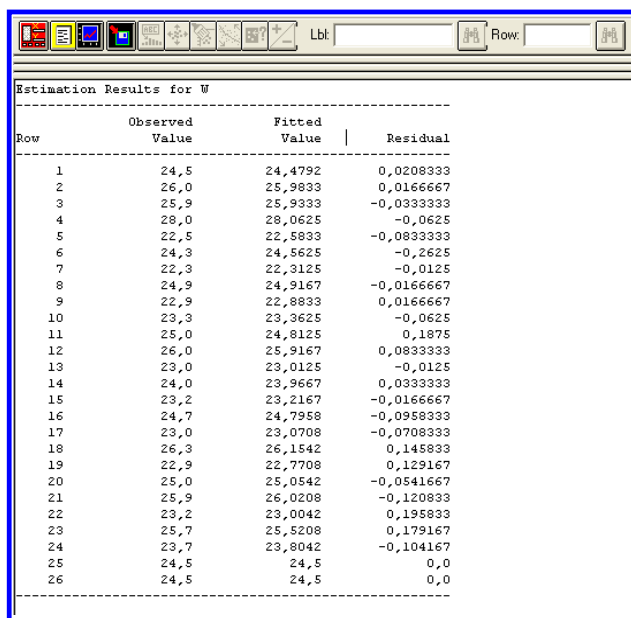


Рис. 17. Графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції

Як видно, в більшості випадків різниця між цими даними невелика. Більшість експериментальних точок знаходиться поблизу прямої лінії.

Повернемося в головне вікно двічі клацнувши лівою кнопкою миші. У колонці табличних опцій двічі клацнемо лівою кнопкою миші у вікні **Estimation Results for W** (оцінка результатів для функції відгуку **W**) для максимізації його

розміру (рис. 18). У цьому вікні наведені експериментальні (**observed**) і розрахункові (**fitted**) значення цільової функції W в точках план-матриці експерименту. У четвертій колонці таблиці наведені "залишки" (**residual**), як різниця між експериментальними і розрахунковими (передбаченими) значеннями цільової функції. Малі абсолютні значення цих залишків є додатковим свідченням адекватності отриманої регресійної моделі досліджуваному процесу зневоднення флотоконцентрату вакуумним фільтруванням.



Row	Observed Value	Fitted Value	Residual
1	24,5	24,4792	0,0208333
2	26,0	25,9833	0,0166667
3	25,9	25,9333	-0,0333333
4	28,0	28,0625	-0,0625
5	22,5	22,5893	-0,0833333
6	24,3	24,5625	-0,2625
7	22,3	22,3125	-0,0125
8	24,9	24,9167	-0,0166667
9	22,9	22,8833	0,0166667
10	23,3	23,3625	-0,0625
11	25,0	24,8125	0,1875
12	26,0	25,9167	0,0833333
13	23,0	23,0125	-0,0125
14	24,0	23,9667	0,0333333
15	23,2	23,2167	-0,0166667
16	24,7	24,7958	-0,0958333
17	23,0	23,0708	-0,0708333
18	26,3	26,1542	0,145833
19	22,9	22,7708	0,129167
20	25,0	25,0542	-0,0541667
21	25,9	26,0208	-0,120833
22	23,2	23,0042	0,195833
23	25,7	25,5208	0,179167
24	23,7	23,8042	-0,104167
25	24,5	24,5	0,0
26	24,5	24,5	0,0

Рис. 18. Таблиця порівняння експериментальних і розрахункових даних

Повернемося в головне вікно двічі клацнувши лівою кнопкою миші. Натискаємо на кнопки графічних опцій і у вікні **Graphical Options** (властивості графіка) виберемо дві опції **Response Plots** (графіки функції відгуку) і натиснемо кнопку **OK**. У правій колонці аналізу з'явиться два нові вікна. Двічі клацнемо лівою кнопкою миші у вікні **Estimated Response Surface** (оцінка поверхні відгуку) для його максимізації (рис. 19). У цьому вікні представлений тривимірний графік залежності цільової функції W від факторів X_1 і X_2 . При цьому, як видно, фактори X_3 і X_4 зафіксовані на нульовому рівні. Натиснемо в межах вікна правою кнопкою миші. У контекстному меню виберемо опцію **Pane Options**. З'явиться вікно **Response Plot Options** (властивості графіка функції відгуку) (рис. 20). В області цього вікна **Type** (тип графіка) встановимо опцію **Surface** (поверхня). В області вікна **Surface** встановимо число поділок горизонтальної та вертикальної шкали графіка на рівні 10 а також виберемо опцію **Solid**. Для якісного відображення графіка поверхні відгуку опцію **Resolution** (доздільна здатність) встановимо не нижче 100. Для збереження введених установок натиснемо кнопку **OK**.

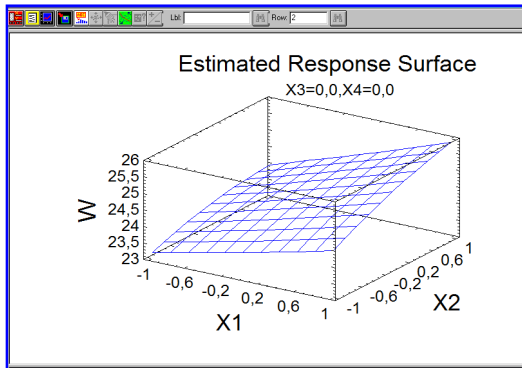


Рис. 19. Тримірний графік залежності $W = f(X1, X2)$

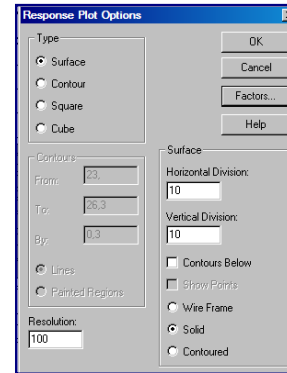


Рис. 20. Контекстне меню **Response Plot Options**

Повторно клацнемо в межах вікна правою кнопкою миші. У контекстному меню виберемо опцію **Graphics Options**. Закладки вікна **Graphics Options** (рис. 21) дозволяють відформатувати тривимірний графік – змінити характер забарвлення поверхні, змінити межі зміни значень вхідних параметрів, виконати розмітку осей і т.д. Для зміни положення графіку в тривимірному просторі натисніть зелену кнопку в рядку меню графічного вікна (рис. 22). При цьому стають доступними жовті кнопки і повзуни зміни положення графіка в горизонтальній і вертикальній площині. Натискання кнопок призводить до безперервного обертання графіка навколо відповідної осі. Повторне натискання кнопки призводить до зупинки обертання. Повзуни призначені для дискретної зміни положення графіка.

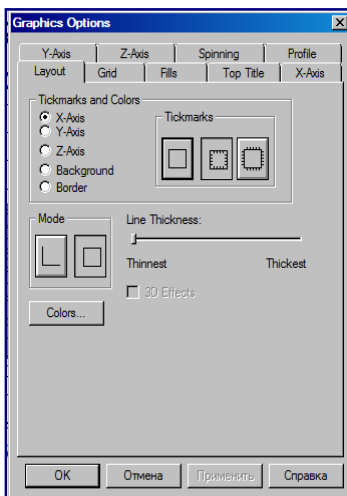


Рис. 21. Вікно регулювання властивостей графіка

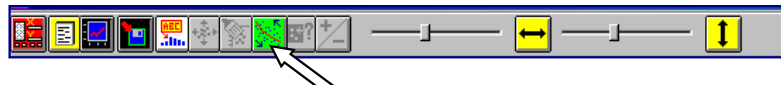


Рис. 22. Регулювання положення графіка у тривимірному просторі

На рис. 23 показаний можливий варіант форматування тривимірного графіка поверхні відгуку. Для вибору іншої пари вхідних параметрів знов клацніть

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

в графічному вікні правою кнопкою миші, виберіть у контекстному меню опцію **Pane Options** і у вікні **Response Plot Options** (рис. 20) виберіть опцію **Factors** (фактори). З'явиться діалогове вікно **Response Plot Factors** (фактори функції відгуку) (рис. 24). Тут можна вибрати будь-яку пару вхідних параметрів, задати інтервали їх варіювання, а також фіксовані значення інших факторів.

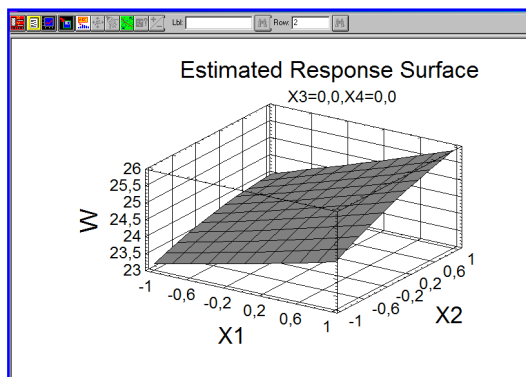


Рис. 23. Варіант форматування графіка поверхні відгуку

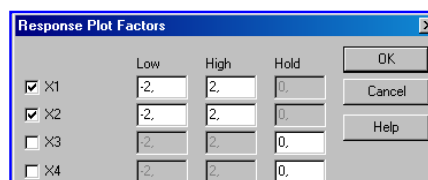
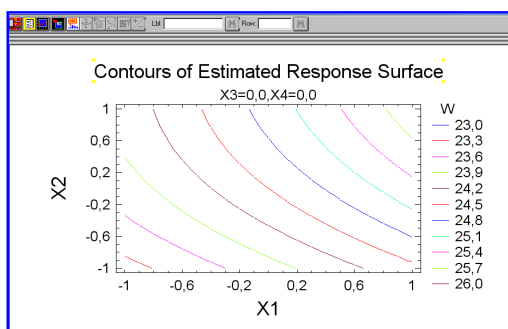
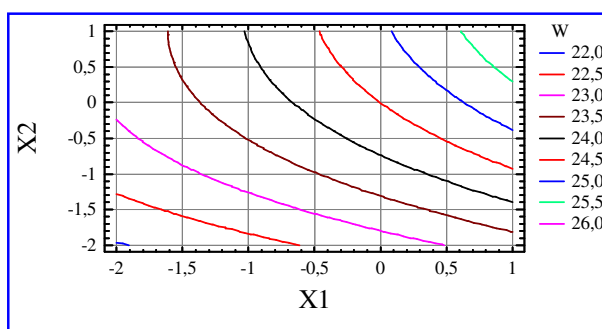


Рис. 24. Діалогове вікно **Response Plot Factors**

У головному меню аналізу **Analyze Experiment** двічі клацаємо у вікні **Contours of Estimated Response Surface** (оцінка контурного графіка функції відгуку) для максимізації його розміру (рис. 25, а). Показаний контурний графік являє собою контури проєкцій рівних значень функції відгуку на площину. Форматування контурного графіка здійснюється так само як і графіка поверхні відгуку. На рис. 25, б наведено приклад відформатованого контурного графіка.



а



б

Рис. 25. Контурний графік поверхні відгуку:
а – початковий; б – після форматування

Будь-який з графіків програми **STATGRAPHICS** може бути скопійований в буфер обміну **Windows** і вставлений, наприклад, в документ **Microsoft Word**. Крім того, графіки можуть бути збережені в більшості відомих форматів – **wmf** (**windows metafiles**); **jpg** (**JPEG 24 bit color**); **tif** (**TIF color**) і ін. Копіювання в **Збагачення корисних копалин, 2017. – Вип. 65(106)**

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

буфер обміну або збереження у вигляді графічного файлу здійснюється за допомогою контекстного меню, що викликається при клацанні правою кнопкою миші у вікні графіка.

На рис. 26 показано узагальнене вікно графічного аналізу отриманого рівняння регресії, скомпоноване в текстовому редакторі **Microsoft Word**.

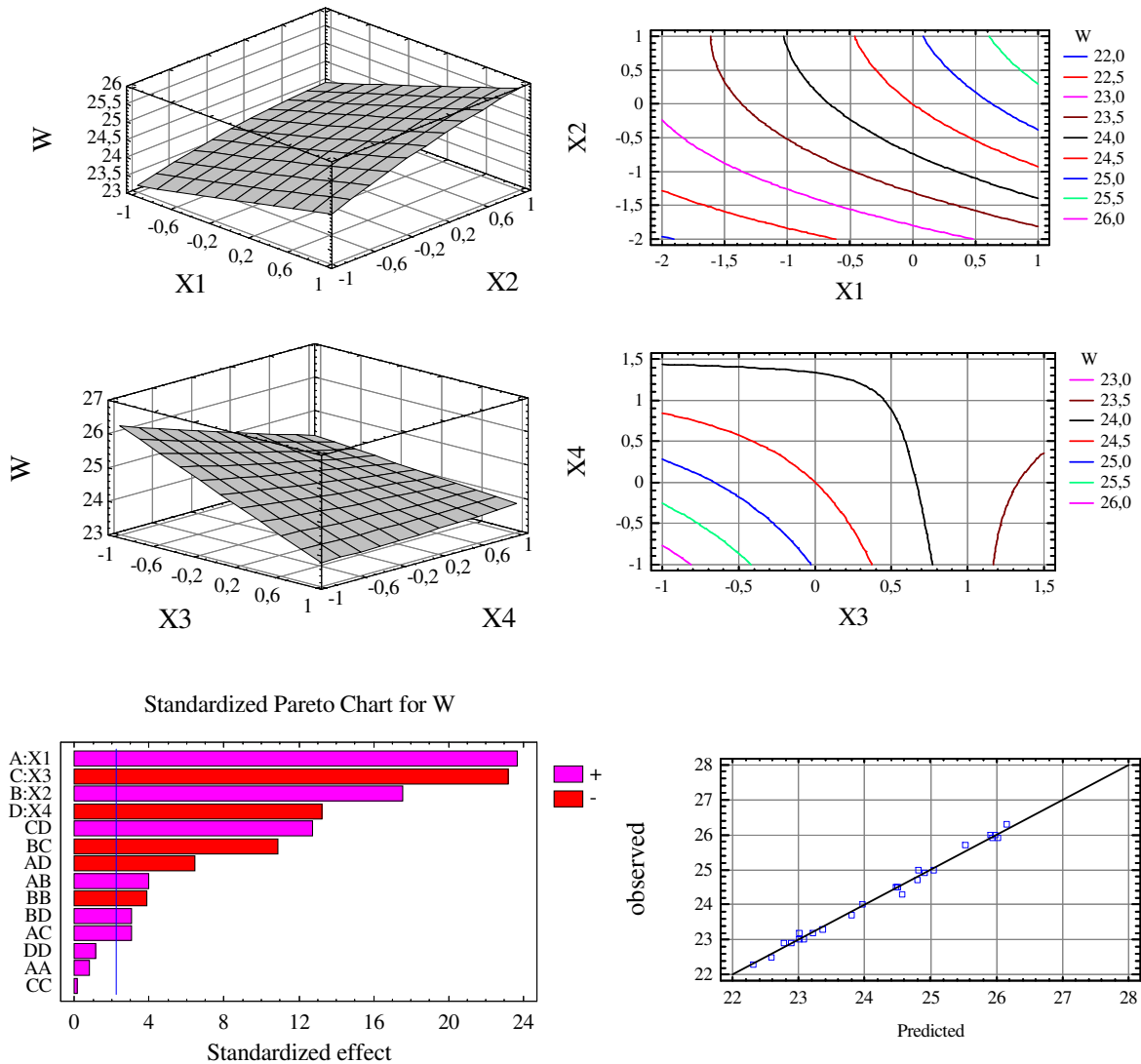


Рис. 26. Узагальнене вікно графічного аналізу отриманого рівняння регресії

Проаналізуємо отримані результати. Як видно з тривимірних перетинів гіперповерхні W (X_1) і контурних кривих цих поверхонь, вологість зневодненого вугілля зростає в міру збільшення густини гідросуміші (X_1) і зростання зольності твердої фази (X_2). У той же час зростання вакуумметричного тиску (X_3) призводить до зниження вологості вугілля. Це відповідає класичним уявленням про вплив зазначених факторів на ефективність зневоднення фільтруванням. Що стосується впливу реагенту-модифікатора (X_4), то зі збільшенням його ви-

трати вологості осаду помітно зменшується. При цьому найбільш позитивний вплив реагенту спостерігається при невеликих значеннях вакуумметричного тиску. Зі збільшенням останнього вплив реагентів на вологість вугільного осаду нівелюється.

Отже, механічні фактори в процесі зневоднення є домінуючими. Реагентні методи інтенсифікації зневоднення фільтруванням можуть бути рекомендовані при недостатніх рівнях вакуумметричного тиску. При збільшенні витрати реагенту від 0 до 200 г/т можливе зменшення вологості вугільного осаду на 1,8-2,0%.

Для збереження результатів досліджень у вигляді файлу проекту виберемо пункти меню **File | Save As | Save Statfolio As**. У вікні (рис. 27) задамося ім'ям файлу проекту (наприклад, **зневоднення-1.sqp**) і збережемо його в тій же папці, що й файл вихідних даних **зневоднення-1.sfx**.

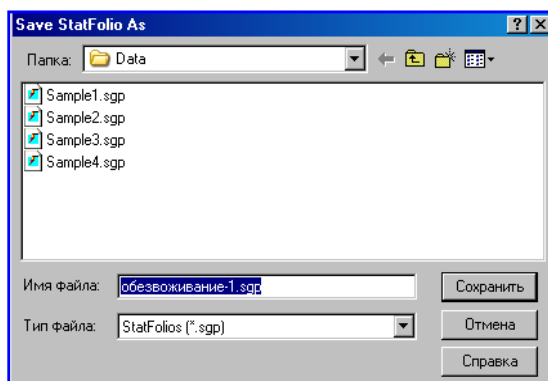


Рис. 27. Збереження результатів досліджень

Висновок

Показано, що застосування повного факторного планування технологічних процесів на основі центрально-композиційних ротатабельних планів є потужним інструментом дослідження в галузі збагачення корисних копалин.

Викладено алгоритм планування експерименту на прикладі дослідження інтенсивної технології зневоднення вугільних флотоконцентратів вакуумним фільтруванням. Встановлено, що механічні фактори в процесі зневоднення флотоконцентратів є домінуючими. Реагентні методи інтенсифікації зневоднення фільтруванням можуть бути рекомендовані при недостатніх рівнях вакуумметричного тиску. При збільшенні витрати реагенту лігносульфонату натрію від 0 до 200 г/т можливе зменшення вологості вугільного осаду на 1,8-2,0%.

Список літератури

1. Сергеев П.В., Білецький В.С. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин (практикум) – Маріуполь: Східний видавничий дім, 2016. – 119 с.
2. Білецький В.С., Смирнов В.О. Моделювання процесів збагачення корисних копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. – 304 с.

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

3. Козин В.З. Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 112 с.
4. Рубинштейн Ю.Б., Волков Л.А. Математические методы в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 296 с.
5. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 254 с.
6. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 296 с.
7. Montgomery, Douglas (2013). Design and analysis of experiments (8th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 9781118146927.
8. Walpole, Ronald E.; Myers, Raymond H.; Myers, Sharon L.; Ye, Keying (2007). Probability & statistics for engineers & scientists(8 ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. ISBN 978-0131877115.

© Сергеев П.В., Белецкий В.С., 2017

*Надійшла до редколегії 20.01.2017 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*