

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Методичні вказівки
до практичних занять з дисципліни
«Моделювання технологічних процесів в нафтогазовій галузі»
для студентів спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХП»,
протокол № 3 від 06.10.2021 р.

Харків
НТУ «ХП»
2021

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Моделювання технологічних процесів в нафтогазовій галузі» для студентів спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології» / В. С. Білецький. – Харків : НТУ «ХП», 2021. – 162 с.

Укладачі: В. С. Білецький

Рецензент В. М. Орловський

Кафедра видобування нафти, газу та конденсату

ПРАКТИЧНА РОБОТА 1

ФАКТОРНЕ ПЛАНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ ЦЕНТРАЛЬНО-КОМПОЗИЦІЙНИХ РОТАТАБЕЛЬНИХ ПЛАНІВ

1. МЕТОДИКА РОЗРОБКИ І АНАЛІЗУ РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ПРОГРАМ

Комп'ютерна система планування експерименту, така як STATGRAPHICS Plus for Windows, істотно змінила практику моделювання. Якщо раніше це вважалося сферою обмеженого кола кваліфікованих професіоналів в математичній статистиці, які володіють у досить повному обсязі її тонкощами, то сьогодні планування стало доступне широкому колу фахівців в інших галузях знань, зокрема, у збагаченні корисних копалин. Працюючи з модулем планування експерименту Design of Experiment (DOE), дослідник отримує повну впевненість в тому, що проведений ним статистичний аналіз даних здійснюється найбільш коректним чином. Модуль DOE автоматично проводить дослідника через весь цикл планування експерименту. DOE допомагає сформулювати критерій оптимальності плану експерименту, пропонує ряд оптимальних планів і наводить всі необхідні табличні та графічні викладки на кожному етапі проведення експерименту.

У всіх видах експериментів результати та висновки залежать від кількості різнорідних і по-різному зібраних даних. Тому перша послуга, яку надає модуль DOE – це допомога в організації збору інформації про досліджуваний процес, для чого передбачена можливість генерації великої кількості як стандартних, так і нестандартних робочих таблиць, їх редагування і роз друк (рис. 1.1).

У плануванні експерименту значна увага приділяється способам відображення експериментальної інформації. У STATGRAPHICS включений весь спектр графічних процедур, які дозволяють підбирати, а також ясно і точно «простежувати» особливості аналізованого матеріалу, починаючи від карт Парето і до тривимірних поверхонь відгуку різного виду. При цьому всі графічні відображення є інтерактивними. Можна (як в автоматичному, так і ручному режимах) підібрати найбільш ілюстративні малюнки та графіки експериментальних планів, у супроводі відповідних чисельних результатів.

Модуль планування експерименту програми STATGRAPHICS Plus for Windows надає повний набір різних типів планів аж до тих, в яких враховуються взаємодії аналізованих факторів по восьмий порядок включно. Крім того, за бажанням експериментатора можуть бути розглянуті взаємодії більш високого порядку. Все це разом узятє, включаючи експертну консультаційну систему StatAdvisor, що допомагає інтерпретувати ре-

зультати і виявляти вади в проведеному аналізі, дозволяє говорити про модуль DOE, як про високорозвинений інструмент, що суттєво підвищує ефективність планування експерименту.

Модуль DOE програмного пакету STATGRAPHICS широко використовується при дослідженні технологічних процесів. Більшість з цих процесів носять масовий статистичний характер і їхній опис неможливий без

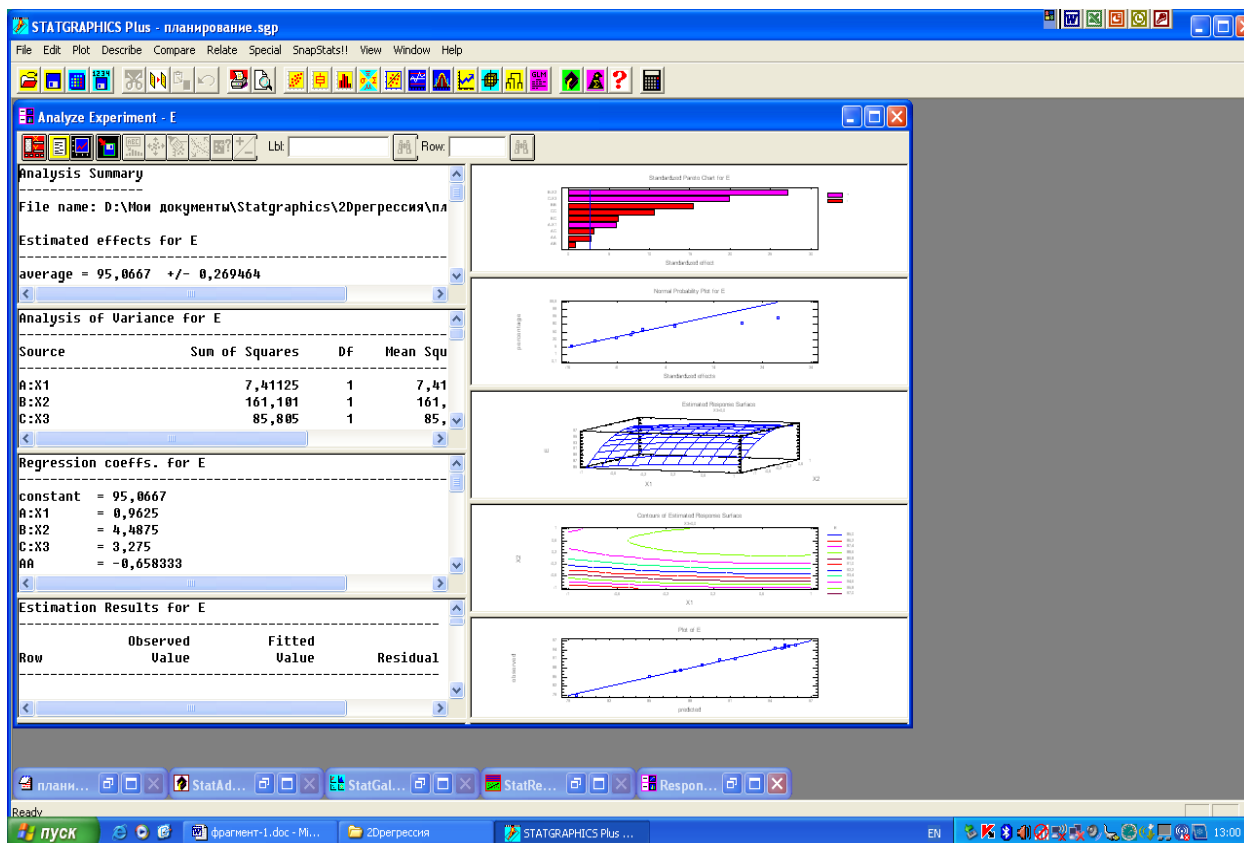


Рис.1.1 – Робочий інтерфейс програми Statgraphics при роботі в модулі DOE

застосування методів математичної статистики. У більшості випадків завдання дослідника зводиться до розробки статистичної регресійної моделі процесу у вигляді поліноміальної залежності вихідного параметра(параметрів), званого цільовою функцією або параметром оптимізації від ряду вхідних.

2. ПОВНЕ ФАКТОРНЕ ПЛАНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ ЦЕНТРАЛЬНО-КОМПОЗИЦІЙНИХ РОТАТАБЕЛЬНИХ ПЛАНІВ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

2.1. Загальні положення

Повним факторним експериментом (ПФЕ) називається такий експеримент, при реалізації якого визначається значення параметра оптимізації при всіх можливих поєднаннях рівнів варіювання факторів. Якщо ми маємо справу з k факторами, кожен з яких може встановлюватися на q рівнях, то для того, щоб здійснити повний факторний експеримент необхідно поставити $n = q^k$ дослідів.

Найбільшого поширення набули експерименти, в яких фактори варіюються на двох рівнях, тобто експерименти типу 2^k .

Планування, проведення та обробка результатів ПФЕ складається з наступних етапів: вибір залежних і незалежних змінних (факторів); кодування незалежних (вхідних) чинників; складання план-матриці експерименту; рандомізація дослідів (їх реалізація у випадковому порядку); реалізація плану експерименту; розрахунок і оцінка значимості коефіцієнтів моделі; перевірка адекватності отриманої моделі.

Вибір незалежних змінних. При дослідженні технологічних процесів дуже важливо виявити всі впливаючі фактори, а також оцінити ступінь їх впливу на процес. Якщо який-небудь із значущих чинників не включений в розгляд, але змінюється в деякому інтервалі значень, то похибки результатів експерименту різко зростають.

Наприклад, багатофакторність флотаційного процесу в значній мірі ускладнює його дослідження та математичний опис (моделювання), так як врахувати вплив усіх чинників практично неможливо, а статистичний аналіз, що не враховує хоча б один значимий фактор, обумовлює неадекватність регресійних рівнянь.

При вивченні будь-якого технологічного процесу доводиться розглядати велику кількість факторів, які імовірно можуть впливати на параметр оптимізації. З одного боку, включення в план дослідження всіх істотно впливаючих факторів дуже важливо, так як експерименти, спрямовані на відшукання оптимальних умов, можуть втратити всякий сенс, якщо один або декілька таких факторів не враховані. З іншого боку, включення в програму дослідження всіх факторів, що впливають на об'єкт, ускладнює завдання – збільшує її розмірність. Ступінь впливу різних чинників на процес неоднакова; звичайно тільки декілька факторів істотно впливають на вихідну величину, а решта впливають менш суттєво.

Завдання полягає у виявленні та ідентифікації суттєвих факторів на «нульовому» тлі всіх інших, при цьому необхідно враховувати як якісні, так і кількісні характеристики впливаючих факторів. Наприклад, на про-

цес флотації вугілля, як відомо, істотно впливають питомі витрати піноутворювача і збирача, проте при витратах аполярного збирача більше 2000 г / т і піноутворювача 100-300 г / т збільшення витрати збирача істотно не впливає на вихідні характеристики процесу. Таким чином, внаслідок невеликого вибору діапазону варіювання фактора він може бути ідентифікований як фон.

Вхідні фактори можуть мати і якісні відмінності, наприклад різні реагенти, конструкції тощо.

Вибір залежного фактора (параметра оптимізації, цільової функції, функції відгуку). Функція відгуку залежить від мети та специфіки досліджень. Вона може бути технологічною (вилучення металу або горючої маси в концентрат, коефіцієнт селективності тощо), економічною (прибуток, втрати, рентабельність тощо), статистичною і т. д. Відгук повинен бути чутливим до зміни факторів, легко обчислюваним, виражатися одним числом, мати фізичний зміст.

Кодування факторів необхідно для переведення натуральних значень факторів в безрозмірні величини. Це забезпечує можливість порівняльної оцінки впливу на процес різних параметрів незалежно від їх розмірності, а також дозволяє побудувати стандартну ортогональну план-матрицю експерименту.

Зв'язок між кодованим і натуральним виразом фактора задається формулою:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (1.1)$$

де x_i – кодований вираз i -го фактора; X_i – натуральне значення фактора; X_{i0} – значення i -го фактора на нульовому рівні; ΔX_i – інтервал варіювання i -го фактора.

В якості нульового рівня факторів зазвичай вибирають центр інтервалу, в якому передбачається вести експеримент. У промислових умовах нульовий рівень відповідає значенням факторів при існуючому технологічному режимі.

При виборі інтервалу варіювання справа дещо складніша. Часто, особливо при оптимізації процесу, спочатку доцільно описати його лінійними рівняннями, і тому інтервал варіювання повинен бути досить малим для отримання лінійного рівняння, але разом з тим досить великим, щоб не отримати помилкового висновку про незначному впливі будь-якого з факторів.

Активне планування експерименту припускає проведення дослідів відповідно до плану експерименту. *План експерименту* визначає розташування досліджених точок у факторному просторі (просторі незалежних змінних). План експерименту задається у вигляді *матриці плану*, напри-

клад у вигляді таблиці, кожен рядок якої відповідає умовам досвіду, а стовпець – значенням незалежної змінної в кожному досліді.

План-матриця експерименту пропонується безпосередньо самою програмою STATGRAPHICS залежно від виду розроблюваної регресійної моделі. У найпростішому випадку розглядається лінійна модель виду:

$$Y = b_0 + \sum_1^n b_i \cdot x_i + \sum_{i \neq j}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (1.2)$$

де n – число вхідних факторів; Y – оцінка (розрахункове значення) відгуку (цільової функції); b – оцінки коефіцієнтів моделі.

У разі її неадекватності розглянутого процесу використовуються *поліноміальні плани другого* порядку виду:

$$Y = b_0 + \sum_1^n b_i \cdot x_i + \sum_{i \neq j}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_1^n b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (1.3)$$

Найбільш часто застосовуються центральні-композиційні плани другого порядку. Їх отримують додаванням спеціальних «зоряних» точок до «ядра», що складається з плану 2^n для лінійної моделі, а також певної кількості експериментів в центрі плану (при фіксації значень всіх вхідних параметрів на нульовому рівні). Зоряні точки встановлюються на деякій відстані d від центру, званому «зоряним плечем».

Серед центральних-композиційних планів другого порядку найбільшого поширення набули ротатабельні плани. Ці плани дають можливість передбачати значення функції відгуку з дисперсією (точністю), однаковою на рівних відстанях від центру плану (по всьому факторному простору).

Після складання план-матриці експериментів здійснюється реалізація відповідних їй дослідів. За результатами цих дослідів визначаються експериментальні значення цільової функції, які заносяться в план-матрицю експерименту порядково.

Наступні етапи планування експерименту здійснюються безпосередньо в модулі DOE програми STATGRAPHICS. Їх конкретний зміст розглянемо на прикладі.

2.1.1. Алгоритм досліджень і аналізу регресійних моделей

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).

2.1.2. Розробка плану

Для розробки регресійної моделі застосований ротатабельний центральнокпозиційний план експерименту. Функція відгуку – W . Досліджувався вплив на технологічний процес чотирьох основних факторів, обраних на підставі апріорних даних: (X_1) , (X_2) , (X_3) , (X_4) . Вибрані фактори задовольняють вимогам керованості, взаємозалежності, однозначності, яким повинні задовольняти варіативні фактори при плануванні експерименту. Область факторного планування представлена в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Область факторного планування

Фактор	Код фактора	Одиниця виміру	Рівні факторів				
			-2	-1	0	+1	+2
1	X_1		100	150	200	250	300
2	X_2		6,0	8,0	10,0	12,0	14,0
3	X_3		40	50	60	70	80
4	X_4		0	50	100	150	200

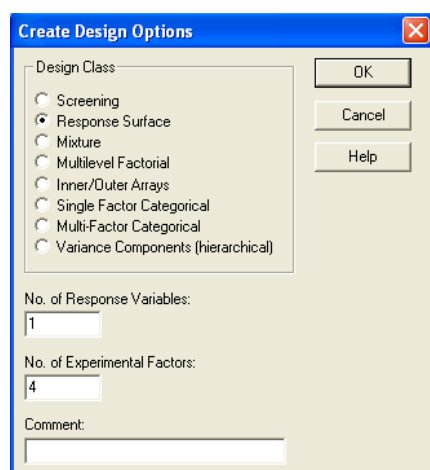


Рис.1.2 – Вікно діалогу для вибору параметрів плану.

Двічі клацнувши на робочому столі комп'ютера на ярлику відкриємо вікно програми **STATGRAPHICS** (рис.1.1). 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.1.2. Натиснемо кнопку **OK**. На екрані

з'явиться ще одне вікно діалогу для опису досліджуваних вхідних факторів.

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**) – див.рис.1.3.

Натискаємо кнопку **ОК**. На екрані з'явиться вікно діалогу для опису функції відгуку. Введемо позначення відгуку **W**, а також його розмір-ність – див. Рис.1.4.

Натиснемо кнопку **ОК**. На екрані з'явиться діалогове вікно з параметрами поверхні відгуку (див. Рис.1.5). Використовуючи кнопку зі стрілкою вниз, розгорнемо список передбачуваних варіантів, виберемо **central composite design: 2 ^ 4 + star** (центрально-композиційний план $2^4 + \text{зірка}$) і натиснемо кнопку **ОК**.

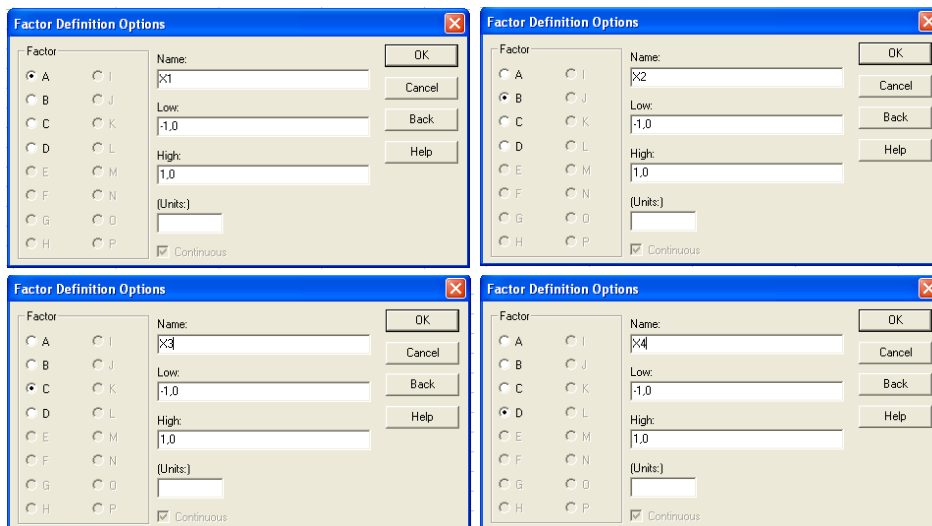


Рис.1.3. – Вікна діалогів для опису вхідних факторів.

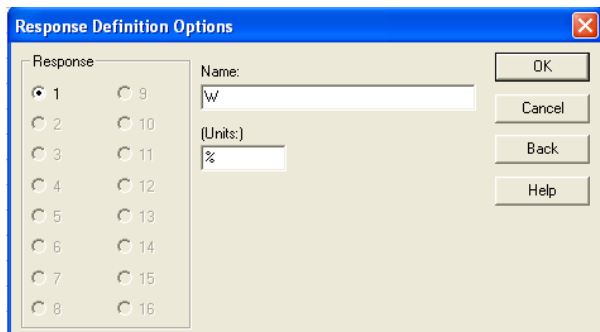


Рис.1.4 – Вікно діалогу для опису функції відгуку.

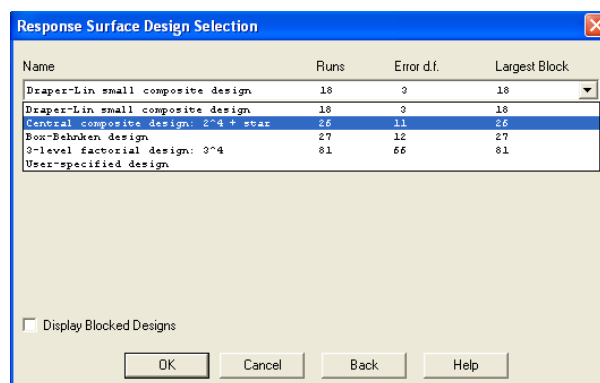


Рис.1.5 – Вікно діалогу з параметрами поверхні відгуку.

З'явиться вікно діалогу опцій обраного композиційного плану (див. Рис.1.6). У верхньому рядку вікна з'являється найменування плану, нижче виведені загальна кількість необхідних експериментів (**Runs**) і число ступеней 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.

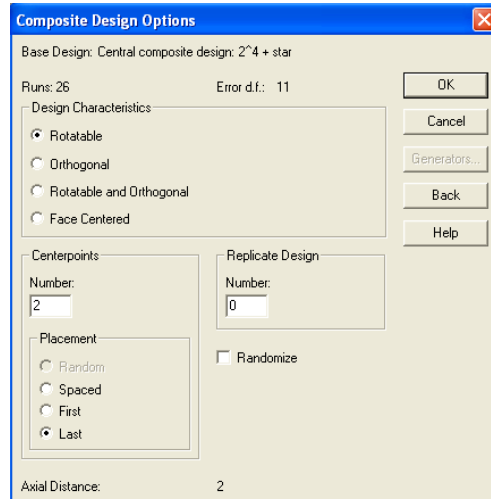


Рис.1.6 – Опції вибраного композиційного плану.

Натиснемо кнопку **ОК**. Система видасть зведення експериментального плану у вікні атрибутів поверхні відгуку (рис.1.7).

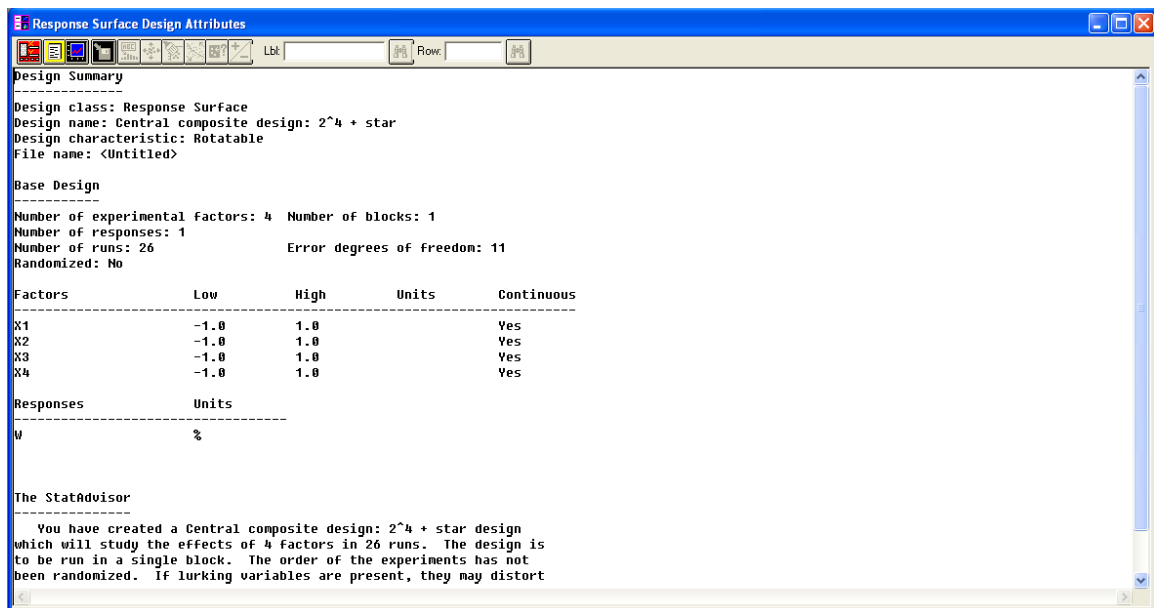


Рис. 1.7- Зведення у вікні атрибутів поверхні відгуку.

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.

2.2. Завдання імені, збереження плану експерименту і роздруків-ка робочої таблиці

Виберемо **File | Save Design File As**, з'явиться відповідне вікно діалогу (рис.1.8). Задамо ім'я плану **План-1.sfx** в папці **План-1** і натиснемо кнопку **ОК**.

Дослідник тепер готовий продовжити свій експеримент і почати збирати дані. Насамперед необхідно роздрукувати робочу таблицю, в якій зазначений порядок проведення експериментів.

У вікні атрибутів поверхні відгуку натиснемо кнопку табличних опцій (рис. 1.9). У вікні діалогу встановимо прапорець **Worksheet** (робоча таблиця), знімемо прапорець **Design Summary** (зведення плану) і натиснемо кнопку **ОК** (рис.1.10). Робоча таблиця відобразиться у другому вікні на поі аналізу. Двічі натиснемо на заголовок вікна робочої таблиці і тим самим максимізуємо її розміри (див. рис.1.11).

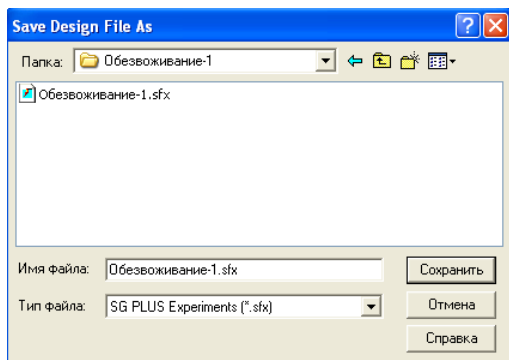


Рис.1.8 – Задання назви експериментального плану.

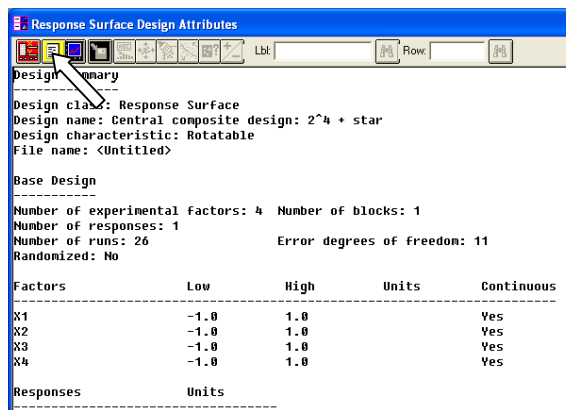


Рис.1.9 – Вікно атрибутів поверхні відгуку.

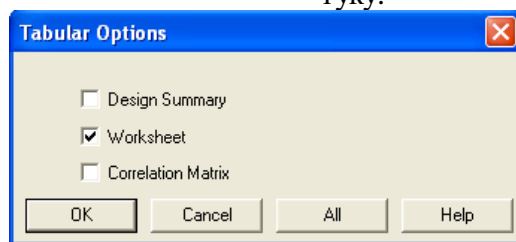


Рис.1.10 – Вікно діалогу для відображення робочої таблиці.

run	X1	X2	X3	X4	W (%)
1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	_____
2	1,0	-1,0	-1,0	-1,0	_____
3	-1,0	1,0	-1,0	-1,0	_____
4	1,0	1,0	-1,0	-1,0	_____
5	-1,0	-1,0	1,0	-1,0	_____
6	1,0	-1,0	1,0	-1,0	_____
7	-1,0	1,0	1,0	-1,0	_____
8	1,0	1,0	1,0	-1,0	_____
9	-1,0	-1,0	-1,0	1,0	_____
10	1,0	-1,0	-1,0	1,0	_____
11	-1,0	1,0	-1,0	1,0	_____
12	1,0	1,0	-1,0	1,0	_____
13	-1,0	-1,0	1,0	1,0	_____
14	1,0	-1,0	1,0	1,0	_____

Рис.1.11 – Робоча таблиця плану експерименту.

Виберемо з меню **File | Print** - система надає вікно діалогу для роздрукування плану експерименту, що проводиться. Встановимо перемикач в положення **All Text Panes** (рис.1.12) і натиснемо кнопку **OK**. Система роздрукує зведення проведеного аналізу і робочу таблицю для збору даних.

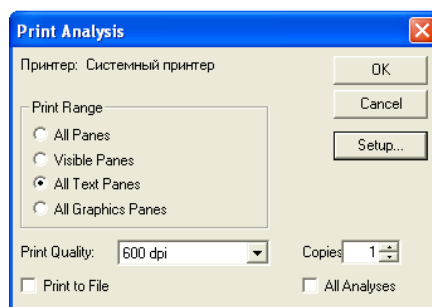


Рис.1.12 – Вікно діалогу друку.

2.3. Проведення експерименту

Надалі здійснювалася серія лабораторних експериментів зі значеннями досліджуваних параметрів відповідно до роздрукованої матриці планування. (побічний продукт переробки деревини в целюлозу). Матриця планування і результати її реалізації представлені в таблиці 1.1.

	BLOCK	X1	X2	X3	X4	W	Col_7	Col_8	Col_9	Col_10
1	1	-1	-1	-1	-1	24,5				
2	1	1	-1	-1	-1	26				
3	1	-1	1	-1	-1	25,9				
4	1	1	1	-1	-1	28				
5	1	-1	-1	1	-1	22,5				
6	1	1	-1	1	-1	24,3				
7	1	-1	1	1	-1	22,3				
8	1	1	1	1	-1	24,9				
9	1	-1	-1	-1	1	22,9				
10	1	1	-1	-1	1	23,3				
11	1	-1	1	-1	1	25				
12	1	1	1	-1	1	26				
13	1	-1	-1	1	1	23				
14	1	1	-1	1	1	24				
15	1	-1	1	1	1	23,2				
16	1	1	1	1	1	24,7				
17	1	-2	0	0	0	23				
18	1	2	0	0	0	26,3				
19	1	0	-2	0	0	22,9				
20	1	0	2	0	0	25				
21	1	0	0	-2	0	25,9				
22	1	0	0	2	0	23,2				
23	1	0	0	0	-2	25,7				
24	1	0	0	0	2	23,7				
25	1	0	0	0	0	24,5				
26	1	0	0	0	0	24,5				
27										
28										
29										
30										
31										
32										

Рис. 1.13 – План-матриця експерименту з введеними в неї значеннями цільової функції W.

Таблиця 1.1 - Матриця планування та експериментальні дані.

X_1	X_2	X_3	X_4	W
-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
-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 "**План-1.sfx**" (рис.1.13). У таблиці плану експерименту введемо в колонку **W** порядково відповідні значення цільової функції. Збережемо таблицю вибравши опції **File | Save | Save Design File**.

2.4. Аналіз експериментальних даних

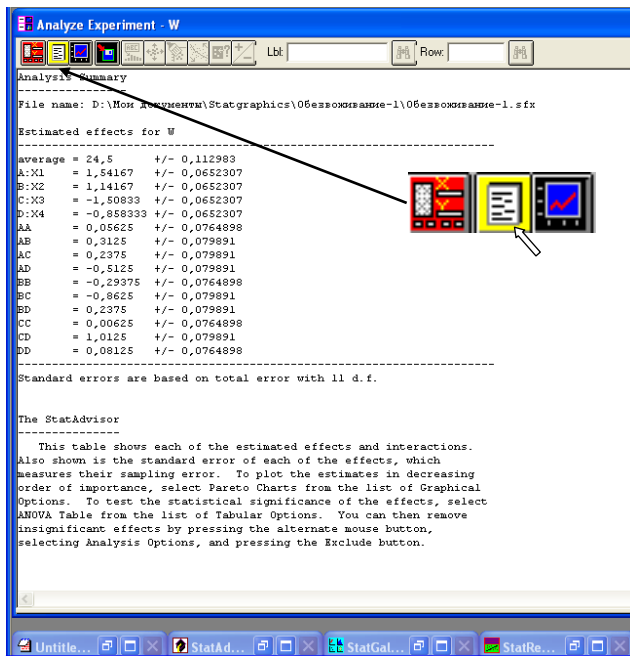


Рис.1.14- Первинне зведення аналізу.

Вибираємо в меню **Special | Experimental Design | Analyze Design** - з'явиться відповідне вікно діалогу. Двічі клацаємо на **W** для введення імені цільової функції в поле даних і натиснемо кнопку **OK**. Система відобразить первинну зведення проведеного аналізу (рис.1.14). 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 **OK**. У області аналізу з'явиться три додаткових вікна.

Двічі клацаємо лівою кнопкою миші у вікні дисперсійного аналізу для максимізації його розміру (рис.1.15).

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. 1.15 даних, статистично значущими є коефіцієнти при лінійних членах рівняння регресії, членах, які відповідають парній взаємодії і коефіцієнт при X_2^2 .

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:X1	14,2604	1	14,2604	558,57	0,0000
B:X2	7,82042	1	7,82042	306,32	0,0000
C:X3	13,6504	1	13,6504	534,68	0,0000
D:X4	4,42042	1	4,42042	173,14	0,0000
AA	0,0138068	1	0,0138068	0,54	0,4775
AB	0,390625	1	0,390625	15,30	0,0024
AC	0,225625	1	0,225625	8,84	0,0127
AD	1,05062	1	1,05062	41,15	0,0000
BD	0,376534	1	0,376534	14,75	0,0027
BC	2,97563	1	2,97563	116,55	0,0000
BD	0,225625	1	0,225625	8,84	0,0127
CD	0,000170455	1	0,000170455	0,01	0,9363
CD	4,10063	1	4,10063	160,62	0,0000
DD	0,0288068	1	0,0288068	1,13	0,3109
Total error	0,280833	11	0,0255303		
Total (corr.)	50,1354	25			

R-squared = 99,4399 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 98,7269 percent
Standard Error of Est. = 0,159782
Mean absolute error = 0,0775641
Durbin-Watson statistic = 1,69776 (P=0,0745)
lag 1 residual autocorrelation = 0,150346

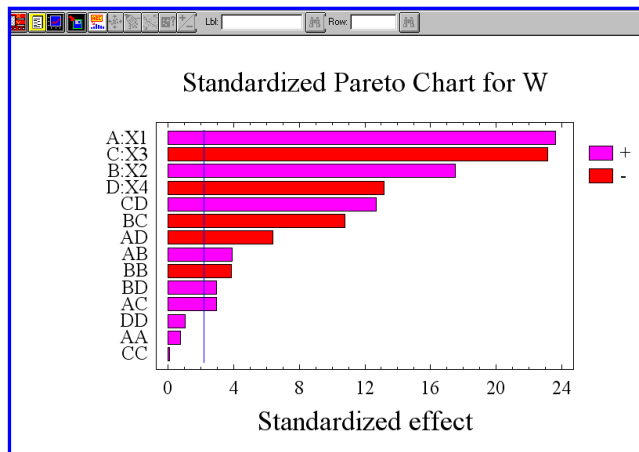


Рис.1.15 - Таблиця дисперсійного аналізу Рис.1.16-Парето-карта коефіцієнтів моделі

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 клацнемо кнопку графічних опцій (див. рис.1.15) для виклику відповідного вікна діалогу. Встановимо прапорець **Pareto Chart** (Парето-карта) і натиснемо кнопку **ОК** (рис.1.16). 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.1.15).

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. 1.16, на досліджуваний технологічний процес найбільш істотно впливає чинник X_1 . Далі за значимістю фактори убувають в наступній послідовності: $X_3 \rightarrow X_2 \rightarrow X_4$.

Колонки, колір яких відзначений знаком плюс, відповідають факторам і їх парним взаємодіям, які сприяють зростанню цільової функції. 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.1.17). У цьому вікні представлені зна-

чення коефіцієнтів рівняння регресії. У нижній частині цього ж вікна представлено саме рівняння регресії у вигляді полінома другого ступеня. Відповідно до даних, наведених на рис.1.17, рівняння регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів має вигляд:

$$W = 24,5 + 0,770833X_1 + 0,570833 \cdot X_2 - 0,754167 \cdot X_3 - 0,429167 \cdot X_4 + 0,15625 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,11875 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,25625 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,146875 \cdot X_2^2 - 0,43125 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,11875 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,50625 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (1.4)$$

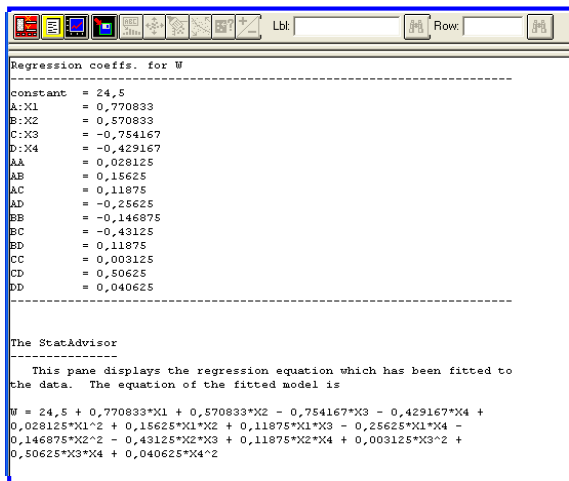


Рис.1.17 – Значення коефіцієнтів рівняння регресії.

Адекватність отриманої моделі досліджуваному процесу підтверджується високим значенням (близько 100%) коефіцієнта детермінації $R^2 = 99,44\%$, а також малим значенням стандартної помилки оцінки $SE = 0,1598$ (див. рис.1.15).

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 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 **OK**. У вікні в

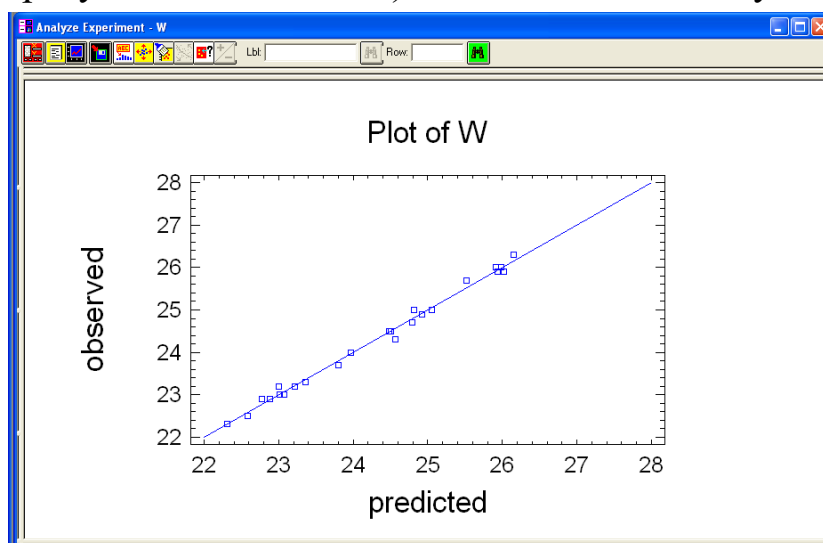


Рис.1.18 – Графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції.

графічній формі дано порівняння експериментальних (observed) та розрахункових (predicted) даних (рис.1.18).

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	22,5833	-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	25,0	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	22,7958	0,132167
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.1.19 – Таблиця порівняння експериментальних і розрахункових даних.

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 (див. Рис.1.19). 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.

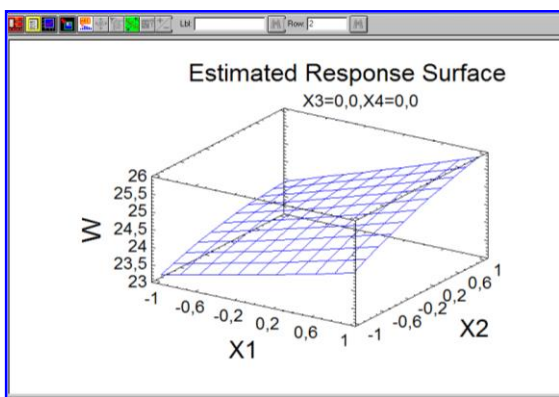


Рис.1.20 – Тримірний графік залежності $W = f(X_1, X_2)$.

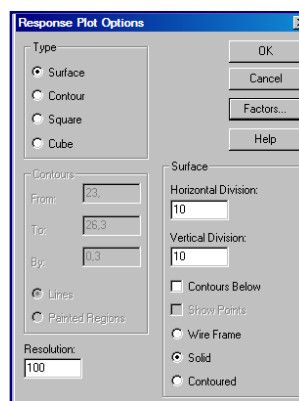


Рис.1.21- Контекстне меню **Response Plot Options**.

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 **ОК**. 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.1.20). У цьому вікні представлений тривимірний графік залежності цільової функції **W** від факторів **X1** і **X2**. При цьому, як видно, фактори **X3** і **X4** зафіксовані

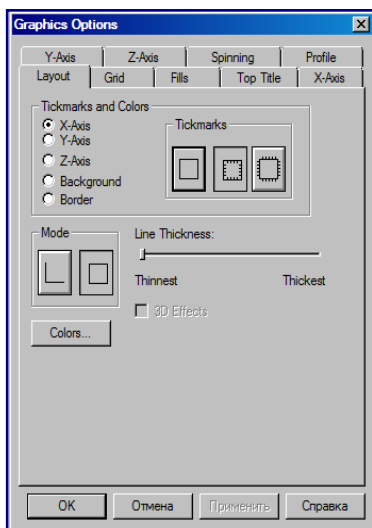


Рис.1.22 Вікно регулювання властивостей графіка.

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.1.21). 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** (роздільна здатність) встановимо не нижче 100. Для збереження введених установок натиснемо кнопку **OK**.

Повторно клацнемо в межах вікна правою кнопкою миші. У контекстному меню виберемо опцію **Graphics Options**. Закладки вікна **Graphics Options** (див. Рис.1.22)



Рис. 1.23 – Регулювання положення графіка у тривимірному просторі.

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 (див. рис.1.23). 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.

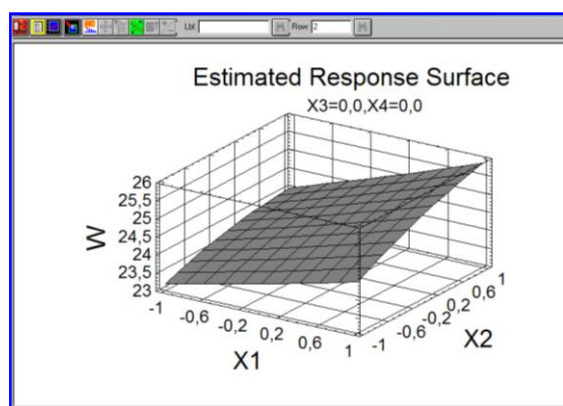


Рис.1.24 – Варіант форматування графіка поверхні відгуку.

Повзуни призначені для дискретної зміни положення графіка.

На рис.1.24 показаний можливий варіант форматування тривимірного графіка поверхні відгуку. Для вибору іншої пари вхідних параметрів

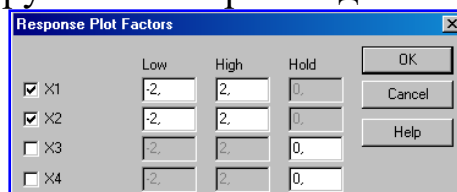
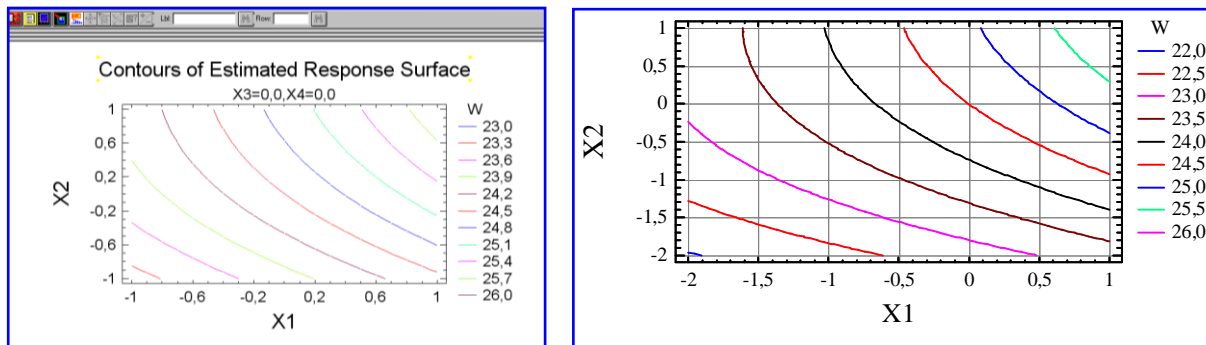


Рис.1.25 – Діалогове вікно **Response Plot Factors**.

знов клацніть в графічному вікні правою кнопкою миші, виберіть у кон-

текстному меню опцію **Pane Options** і у вікні **Response Plot Options** (див. рис.1.21) виберіть опцію **Factors** (фактори). З'явиться діалогове вікно



а

б

Рис. 1.26 – Контурний графік поверхності отклика:
а – первональний; б – оформлений.

Response Plot Factors (фактори функції відгуку) (див. рис.1.25). Тут можна вибрати будь-яку пару вхідних параметрів, задати інтервали їх варіювання, а також фіксовані значення інших факторів.

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.1.26, 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.1.26, б наведено приклад відформатованого контурного графіка.

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

Проаналізуємо отримані результати. Як видно з тривимірних перетинів гіперповерхні $W(X_i)$ і контурних кривих цих поверхонь, функція відгуку W зростає в міру збільшення фактора (X_1) і зростання фактора (X_2). У той же час зростання фактора (X_3) призводить до зниження функції відгуку W .

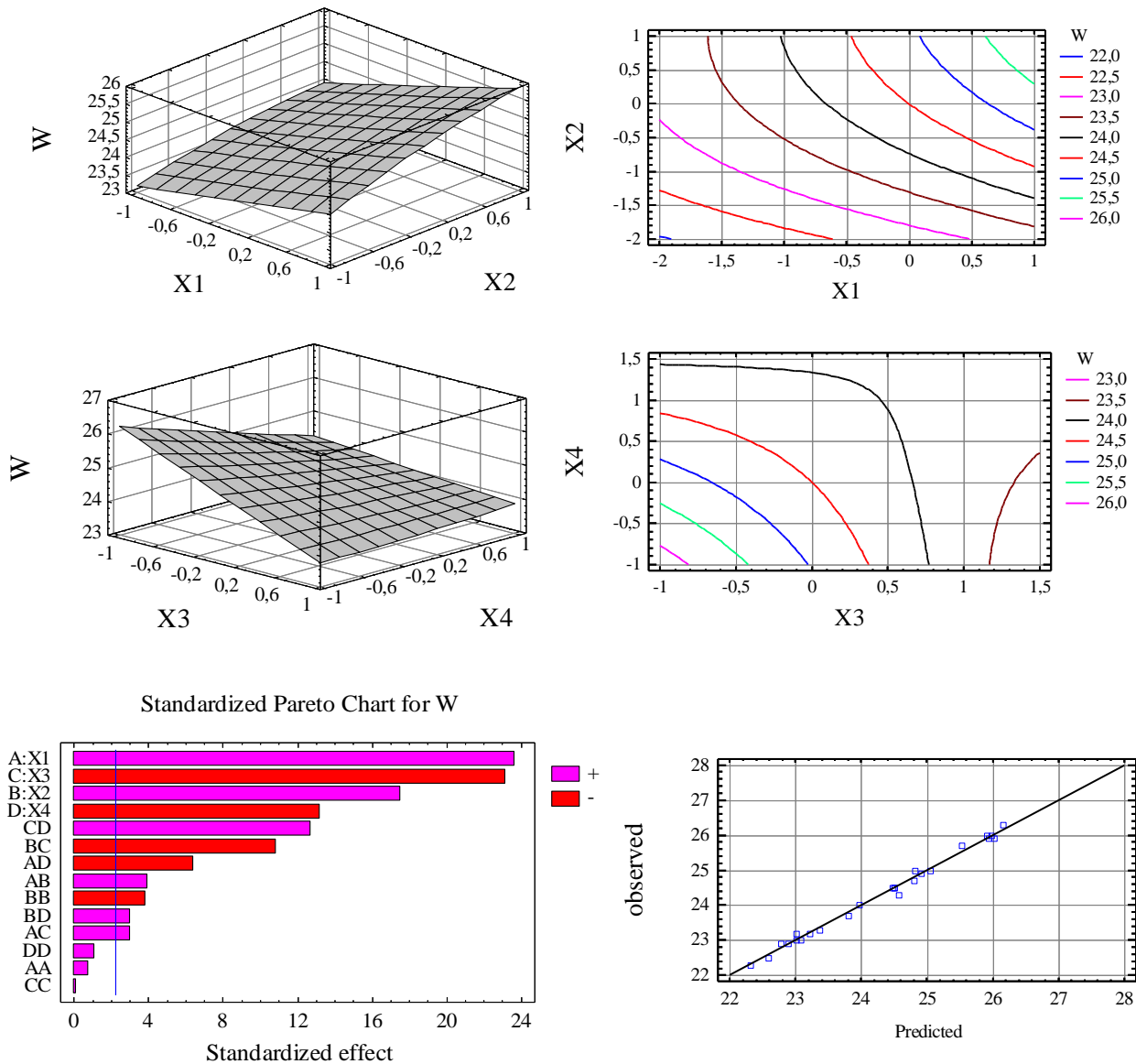


Рис. 1.27. Узагальнене вікно графічного аналізу отриманого рівняння регресії

Надалі необхідно на фізичному рівні проаналізувати якісні тенденції впливу факторів, що по суті є логічно-перевірочною процедурою. Якщо вплив факторів відповідає класичним уявленням про вплив зазначених факторів на функцію відгуку W , то дані приймаються.

Отже, механічні фактори в процесі зневоднення є домінуючими. Реагентні методи інтенсифікації зневоднення фільтруванням можуть бути рекомендовані при недостатніх рівнях вакуумметричного тиску.

Розрахунок по рівнянню 1.4 пока-

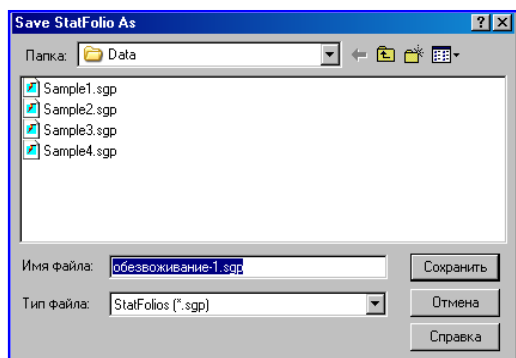


Рис.1.28 - Збереження результатів досліджень.

зує, що 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.1.28) задамося ім'ям файлу проекту (наприклад, **План-1.sqp**) і збережемо його в тій же папці, що й файл вихідних даних **План-1.sfx**.

2.5. Приклад моделювання.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕРМЕТИЗАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ СВЕРДЛОВИННИХ ПАКЕРІВ

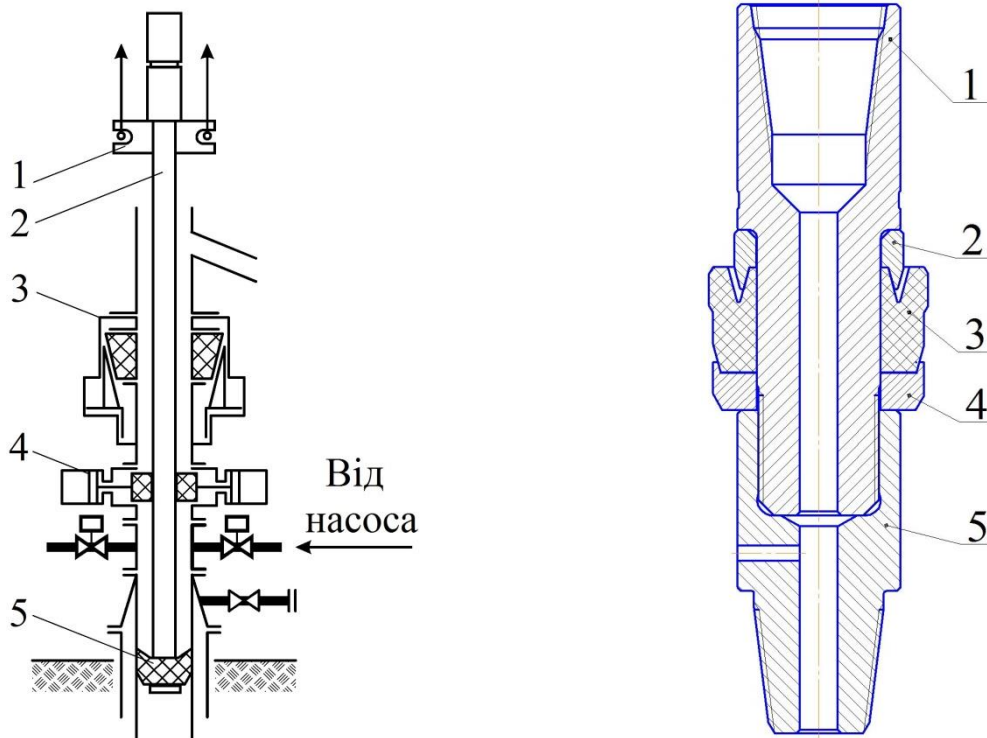
Наведемо результати досліджень герметизаційної здатності самоущільнювальних манжет свердловинних випробувальних пакерів. Розроблено статистичну математичну модель визначення контактних тисків з врахуванням силових факторів, геометричних характеристик ущільнення та фізико-механічних властивостей матеріалу манжети. Експериментально встановлено закономірності розподілу контактних тисків по довжині спряженої поверхні: манжета – обсадна труба

2.5.1. Вступ

Для розділення окремих ділянок стовбура нафтових і газових свердловин під час здійснення ремонтних робіт або експлуатації, перевірки герметизаційної здатності противикидного та устьового обладнання використовують спеціальні пристрої – пакери, в конструкції яких основним є ущільнюючий гумовий елемент.

Перевагу віддають пакерам на базі самоущільнювальних манжет, які спрацьовують автоматично при появі надлишкового тиску випробувальної рідини в надпакерному просторі, відрізняються простотою експлуатації та високою герметизаційною здатністю.

Сучасний світовий ринок обладнання для спорудження чи експлуатації нафтових і газових свердловин характеризується різноманітністю конструкції пакерів на базі самоущільнювальних манжет. Серед українських найбільш вдалою є конструкція пакера типу УВЧ виробництва спеціальної аварійно-рятувальної служби ДП «ЛІКВО» (Україна, м. Харків (рис. 1, а, б). Пакер на базі гумової самоущільнювальної манжети призначений для випробування противикидного та устьового обладнання під час проведення робіт з підземного ремонту свердловин.



аб

Рис. 1. Пакер устьовий типу УВЧ: *а* – схема випробування плашкового превентора з використанням пакера (1 – елеватор, 2 – труба, 3 – універсальний превентор, 4 – плашковий превентор, 5 – пакер); *б* – конструктивне оформлення пакера (1 – корпус, 2 – втулка опорна, 3 – самоущільнювальна манжета, 4 – упор, 5 – перевідник)

Зважаючи на те, що герметизаційна здатність свердловинних пакерів є комплексним показником їх технічної характеристики, саме на її дослідження спрямована увага науковців.

2.5.2. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є одержання і аналіз залежностей герметизаційної здатності самоущільнювальних манжет свердловинних випробувальних пакерів від силових факторів процесу випробування, геометричних характеристик ущільнення та фізико-механічних властивостей матеріалу манжети.

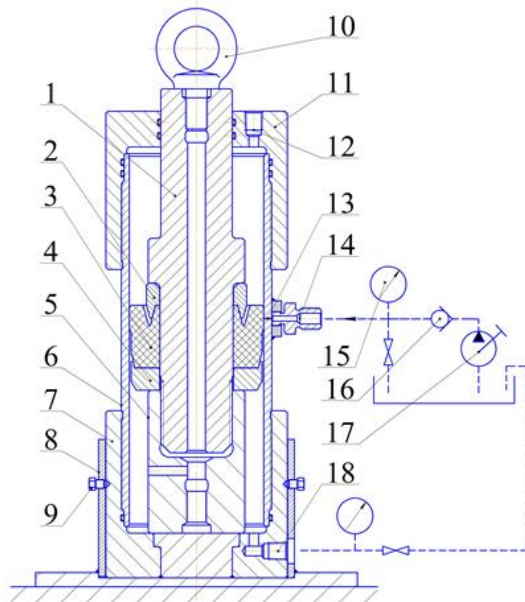
Для досягнення мети вирішувалися наступні задачі:

- одержати статистичну математичну модель впливу діаметрального натягу Δ , мм; тиску випробування P , МПа; радіального зазору δ між опорною втулкою та обсадною трубою, мм, та модуля зсуву матеріалу $\sigma_{зс}$, МПа, на величину контактного тиску, МПа;
- встановити закономірності розподілу контактних тисків по довжині спряженої поверхні.

Вирішення цих задач необхідне для подальшого вдосконалення конструкції самоущільнювальної манжети устьового випробувального пакера.

2.5.3. Матеріали та методи дослідження контактних тисків на спряжених поверхнях самоущільнювальної манжети

Для проведення експерименту з визначення контактних тисків на базі підприємства ПАТ «Укрнафта» (Україна, м. Полтава) було розроблено та виготовлено лабораторний стенд, що дозволив провести дослідження натурних зразків манжет. Принципова схема та загальний вигляд установки показані на рис. 2, а, б відповідно.



а

б

Рис. 2. Лабораторний стенд для дослідження контактних тисків: а – принципова схема лабораторного стенду: 1 – ствол пакера; 2 – упорна втулка; 3 – самоущільнювальна манжета; 4 – упор; 5 – упорна гайка; 6 – патрубок; 7 – нижня кришка; 8 – упорний стакан; 9 – стопорні гвинти; 10 – рим-болт; 11 – верхня кришка; 12 – вхідний отвір для підводу випробувальної рідини; 13 – радіальний випробувальний отвір; 14 – запобіжний штуцер; 15 – контрольний манометр; 16 – зворотний клапан; 17 – ручний гідравлічний насос; 18 – зливний отвір; б – загальний вигляд лабораторного стенду

Лабораторний стенд, перед дослідженням, передбачає встановлення попередньо зібраного випробувального пакера натурних розмірів, на корпусі 1 якого розміщені упорна втулка 2, самоущільнювальна манжета 3 та упор 4, що складають разом вузол ущільнення пакера та затягаються упорною гайкою 5. Зібраний пакер з попереднім натягом вставляють у патрубок 6 (виконаний у вигляді відрізка обсадної труби), яка попередньо згвинчена з нижньою кришкою 7, остання, в свою чергу, зафіксована від можливого обертання при збиранні установки відносно упорного стакану 8 стопорними гвинтами 9.

Виконавши зазначені операції, вся компоновка герметично загвинчується верхньою кришкою 11.

2.5.4. Методика визначення контактних тисків

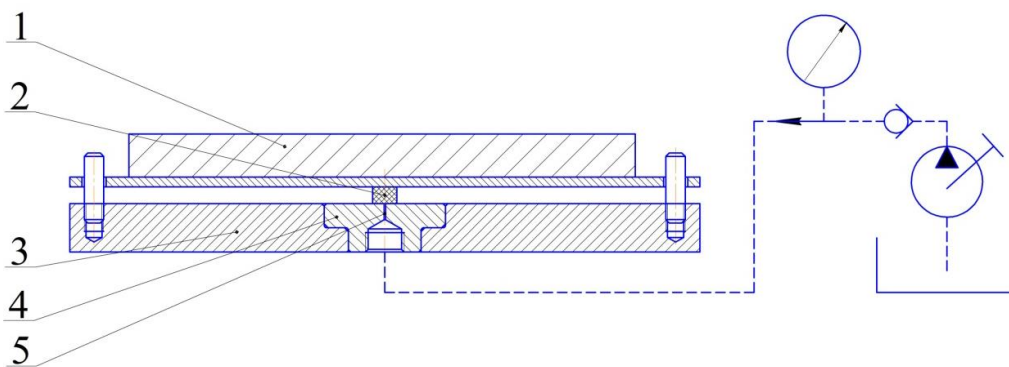
Метод дослідження контактних тисків за допомогою описаного лабораторного стенду відомий як метод Мюллера-Оwandера (надалі за функціональними ознаками «метод контрольних отворів»).

За даним методом контактний тиск на спряженій поверхні визначається тиском зовнішньої вимірювальної гідравлічної системи, яка з'єднана з радіальним отвором малого діаметру 13, вихід із якого закритий зовнішньою поверхнею самоущільнювальної манжети (рис. 2). Остання під час випробування знаходиться у внутрішньому просторі лабораторного стенду під дією тиску випробування P . Коли тиск у зовнішній гідравлічній системі, до якої входять контрольний манометр 15, зворотний клапан 16, ручний гідравлічний насос 17, стане рівним контактному тиску в місці контакту манжети з виходом радіального отвору, між зовнішньою поверхнею манжети та внутрішньою поверхнею обсадної труби з'явиться щілина, по якій рідина із вимірювальної зовнішньої гідравлічної системи пройде в порожнину зливу до зливного отвору 18. Тиск в момент відкриття щілини приймають рівним контактному тиску з деякою поправкою. Дана поправка була визначена на спеціальній тарувальній установці.

Перед дослідженнями на лабораторному стенді (рис. 2) виконано тарування контрольного манометра для фіксації контактної тиску (поз. 15 рис. 2) на установці (рис. 3 *а, б*). При цьому використовувався гумовий елемент, який звулканізований з тієї ж гумової суміші, що й самоущільнювальна манжета устьового випробувального пакера.

Тарувальна установка, загальний вигляд якої показаний на рис. 3 *б*, представлена вантажем 1, гумовим зразком 2, опорною плитою 3, змінною вставкою 4 із контрольним отвором 5. Шорсткість контактної поверхні змінної вставки відповідає шорсткості внутрішньої поверхні обсадної труби при випробуванні на лабораторному стенді.

Сутність визначення контактних тисків на тарувальній установці аналогічна сутності визначення на лабораторному стенді для випробування устьового пакера. При проведенні експерименту передбачалося, що якщо навантажити гумовий зразок 2 (рис. 3, *а*) з контактною площею 1 см^2 силою в 10 Н , то контактний тиск на спряженій поверхні: гумовий елемент – змінна вставка, має скласти $0,1 \text{ МПа}$. Після проведення випробувань на тарувальній установці було отримано залежність контактної тиску від тиску випробування (рис. 4), яка використовувалася при визначенні контактних тисків на лабораторному стенді.



a



б

Рис. 3. Тарувальна установка: *а* – принципова схема установки: 1 – вантаж; 2 – гумовий зразок; 3 – опорна плита; 4 – змінна вставка; 5 – контрольний отвір; *б* – загальний вигляд тарувальної установки

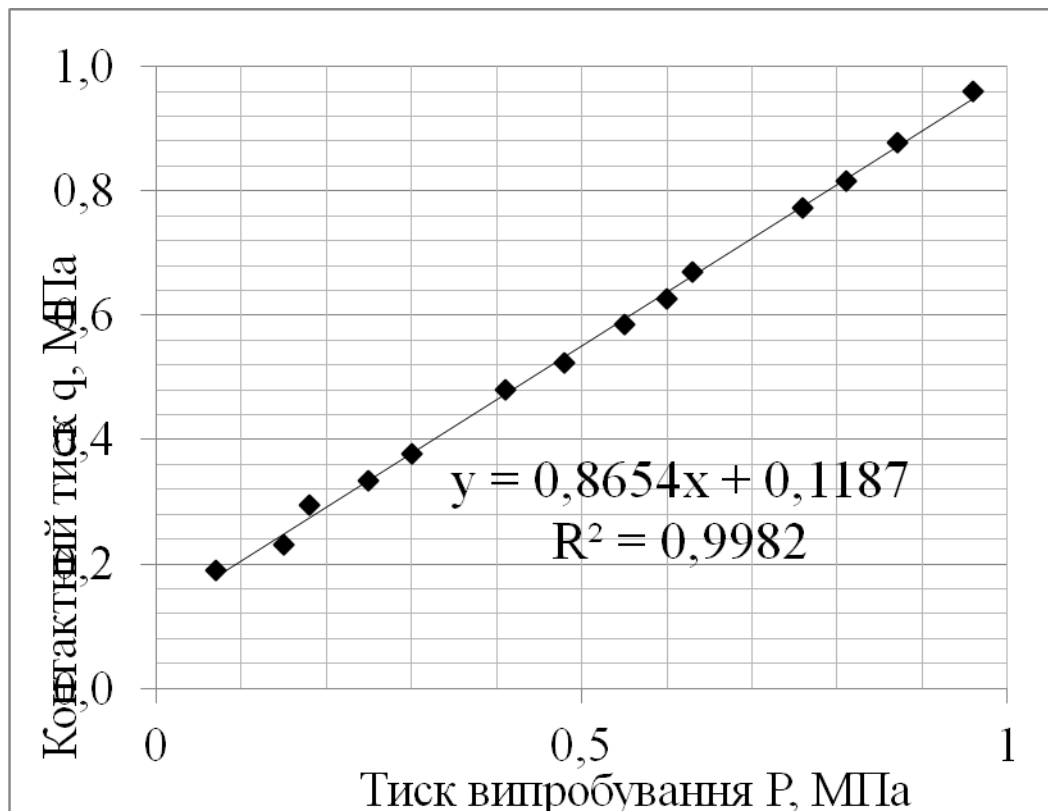


Рис. 4. Тарувальна залежність контактного тиску від тиску випробування

Для одержання статистичної математичної моделі впливу силових факторів, геометричних характеристик ущільнення та фізико–механічних властивос-

тей матеріалу манжети на її герметизаційну здатність, яка оцінювалася за величиною контактного тиску, застосоване повне факторне планування експерименту на основі центрального композиційного ротатабельного плану другого порядку Бокса-Хантера. Вибір ротатабельного плану обумовлений тим, що ці плани дають можливість передбачати значення функції відгуку з дисперсією, однаковою по всьому факторному простору.

В процесі дослідження використовувалися манжети із зовнішніми діаметрами 148,1...153,1 мм та висотою 75 мм, що вулканізовані з гумової суміші ІРП-1293.

2.5.5. Результати досліджень контактних тисків

Статистична математична модель контактного тиску самоущільнювальної манжети

При плануванні експерименту на основі апріорної інформації за незалежні фактори приймали: діаметральний натяг Δ , мм; тиск випробування P , МПа; радіальний зазор δ між опорною втулкою та обсадною трубою, мм, та модуль зсуву матеріалу $\sigma_{зс}$, МПа. В якості цільової функції E , МПа було прийнято величину контактного тиску. Ядро плану другого порядку Бокса-Хантера було представлено напівреплікою 2^{4-1} ($1=X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$). Реалізовано 28 дослідів: 16 дослідів на основних рівнях доповнені ще 8 дослідями на зіркових точках (величина зіркового плеча дорівнює 2) та чотирма дослідями в центрі плану. Основні рівні варіювання факторів та межі області дослідження вибрані за результатами попередніх експериментів і на основі апріорної інформації (табл. 1)

Таблиця 1

Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження

Фактор	Позначення	Код	Одиниця виміру	Інтервал виміру	Основні рівні				
					-2	-1	0	+1	+2
Діаметральний натяг	Δ	X_1	мм	1	1	2	3	4	5
Тиск випробування	P	X_2	МПа	5	10	15	20	25	30
Радіальний зазор	δ	X_3	мм	1	1	2	3	4	5
Модуль зсуву матеріалу ущільнення	$\sigma_{зс}$	X_4	МПа	10%	2,93	2,75	2,47	1,94	1,72

Область зміни незалежних факторів відповідає діапазону зміни геометричних розмірів та зміни умов випробування робочого середовища.

Функція відгуку апроксимована поліномом другого порядку виду

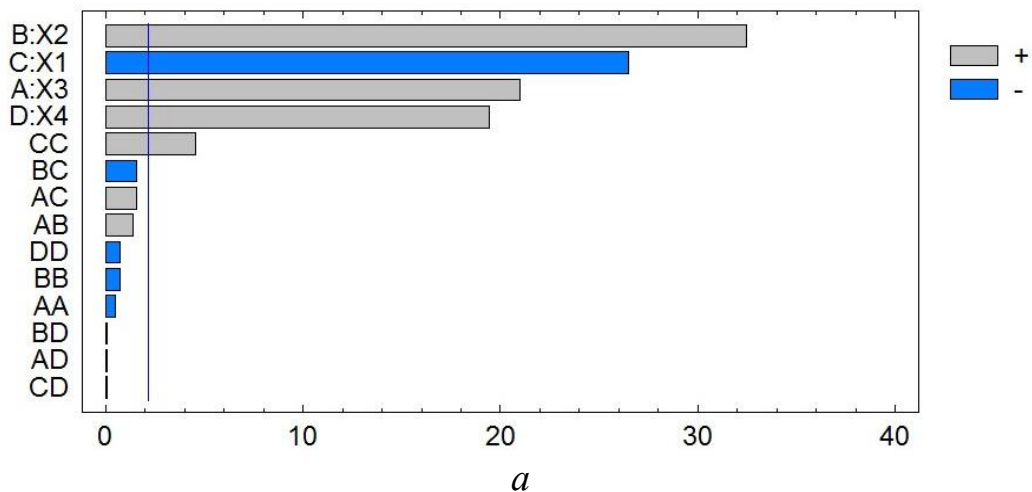
$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} X_i X_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} X_i^2, \quad (1)$$

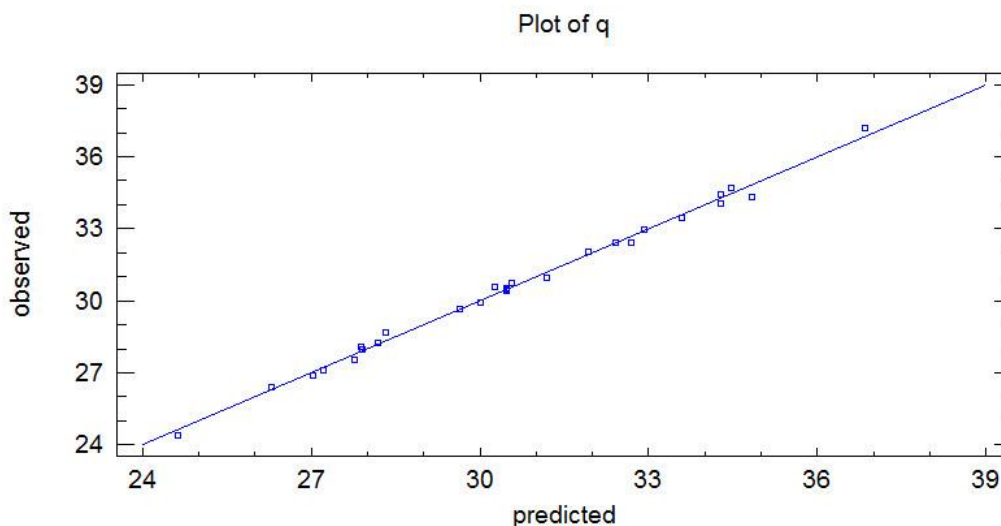
де k – число незалежних змінних.

Обробка результатів експерименту та аналіз регресійної моделі здійснено за допомогою модуля «Планування експерименту» статистичної програми Statgraphics Plus (розробник Statpoint Technologies, Inc., США). Рівняння регресії (2) з урахуванням значення коефіцієнтів має вигляд:

$$\begin{aligned} q = & 30,475 + 1,28975 \cdot X_1 + 1,99608 \cdot X_2 - \\ & -1,62917 \cdot X_3 + 1,19583 \cdot X_4 - 0,031875 \cdot X_1^2 + \\ & + 0,10625 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,11875 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,00625 \cdot X_1 \cdot X_4 - \\ & - 0,045375 \cdot X_2^2 - 0,11875 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,00625 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\ & + 0,27875 \cdot X_3^2 + 0,00625 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,04625 \cdot X_4^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Адекватність отриманої регресійної моделі підтверджується великим значенням коефіцієнта детермінації R^2 , який склав 99,55 %. Значимість коефіцієнтів моделі визначалася за допомогою Р-рівня і наведена на стандартизованому Парето-графіку (рис. 5, а).





б

Рис. 5. Статистичні оцінки регресійної моделі: а – Паретто-графік ; б – графік порівняння експериментальних (observed) та розрахункових (predicted) значень цільової функції

Вертикальна лінія на графіку відповідає 95 %-ій статистичній значущості коефіцієнтів.

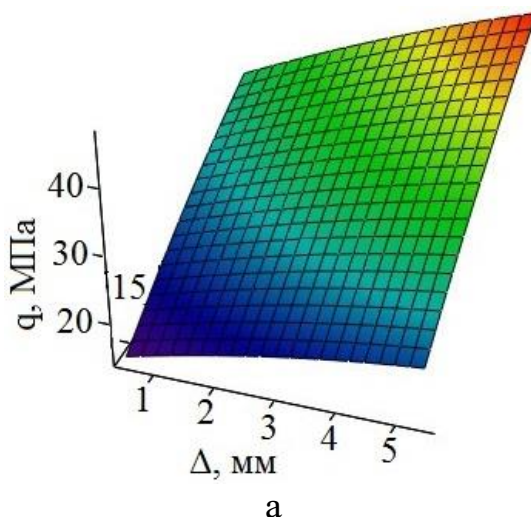
З урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії (3) має вигляд:

$$q = 30,475 + 1,28975 \cdot X_1 + 1,99608 \cdot X_2 - 1,62917 \cdot X_3 + 1,19583 \cdot X_4 - 0,031875 \cdot X_1^2. \quad (3)$$

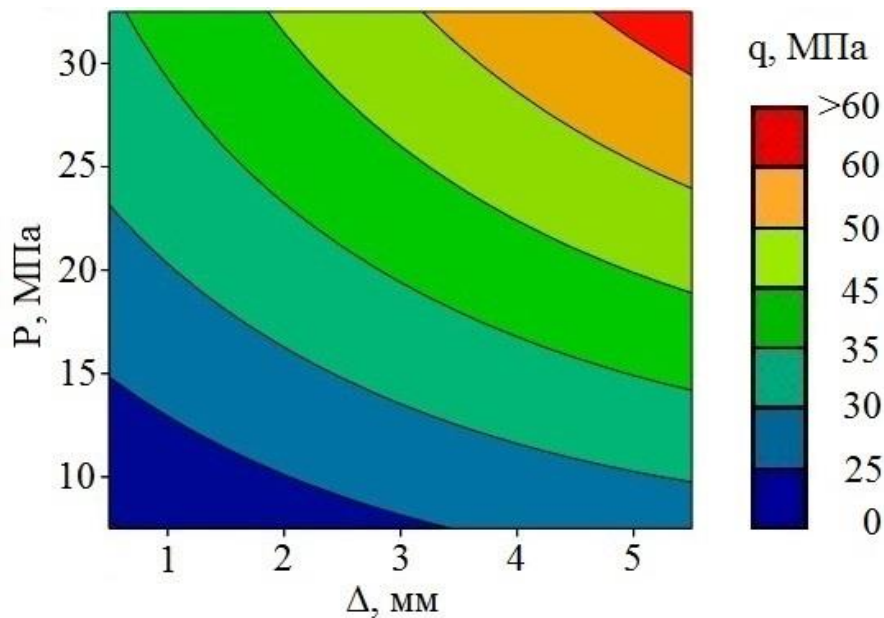
Як видно з Паретто-графіка, найбільш значимим є фактор X_2 – тиск випробування, наступні за значимістю: X_1 – діаметральний натяг, X_3 – радіальний зазор та X_4 – модуль зсуву матеріалу ущільнення.

На рис. 5, б показано порівняння експериментальних (observed) та розрахункових (predicted) значень цільової функції контактних тисків.

На рис. 6, 7 показано часткові тривимірні перетини цільової функції та контурні криві цих поверхонь, які показують залежності контактних тисків від факторів впливу.



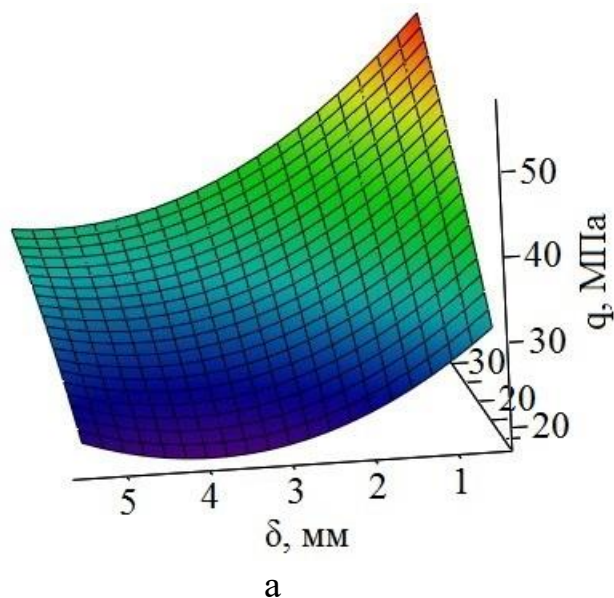
а



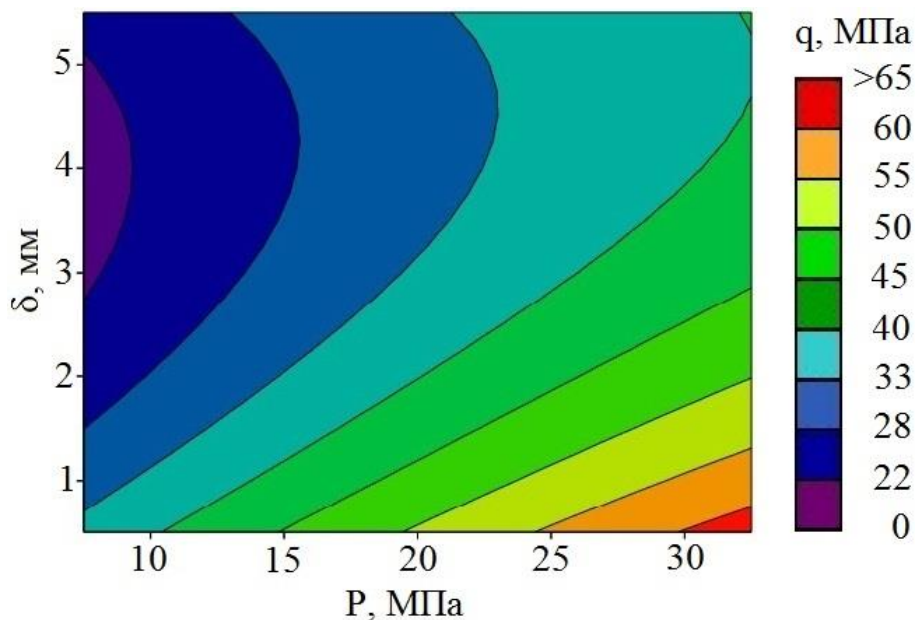
б

Рис. 6. Тривимірний перетин гіперповерхні цільової функції контактного тиску від тиску випробування та натягу манжети: *a* – тривимірна поверхня; *б* – контурна крива

На рис. 6 представлено тривимірний графік залежності контактного тиску від тиску випробування та натягу. Спостерігається яскраво виражена прямо пропорційна і близька до лінійної в межах факторного простору залежність.



а



б

Рис. 7. Тривимірний перетин гіперповерхні цільової функції контактного тиску від тиску випробування та радіального зазору: *a* – тривимірна поверхня; *б* – контурна крива

На рис. 7 подано тривимірний графік залежності контактного тиску від тиску випробування та радіального зазору. Характер цієї гіперповерхні суттєво відрізняється від попередньої нелінійністю з тенденцією до екстремуму–мінімуму в межах факторного простору.

Дослідження розподілу контактного тиску по довжині спряженої поверхні

Враховуючи нестабільність контактних тисків по довжині спряженої поверхні на експериментальному лабораторному стенді було отримано графічну залежність при тиску випробування 35 МПа (рис. 8).

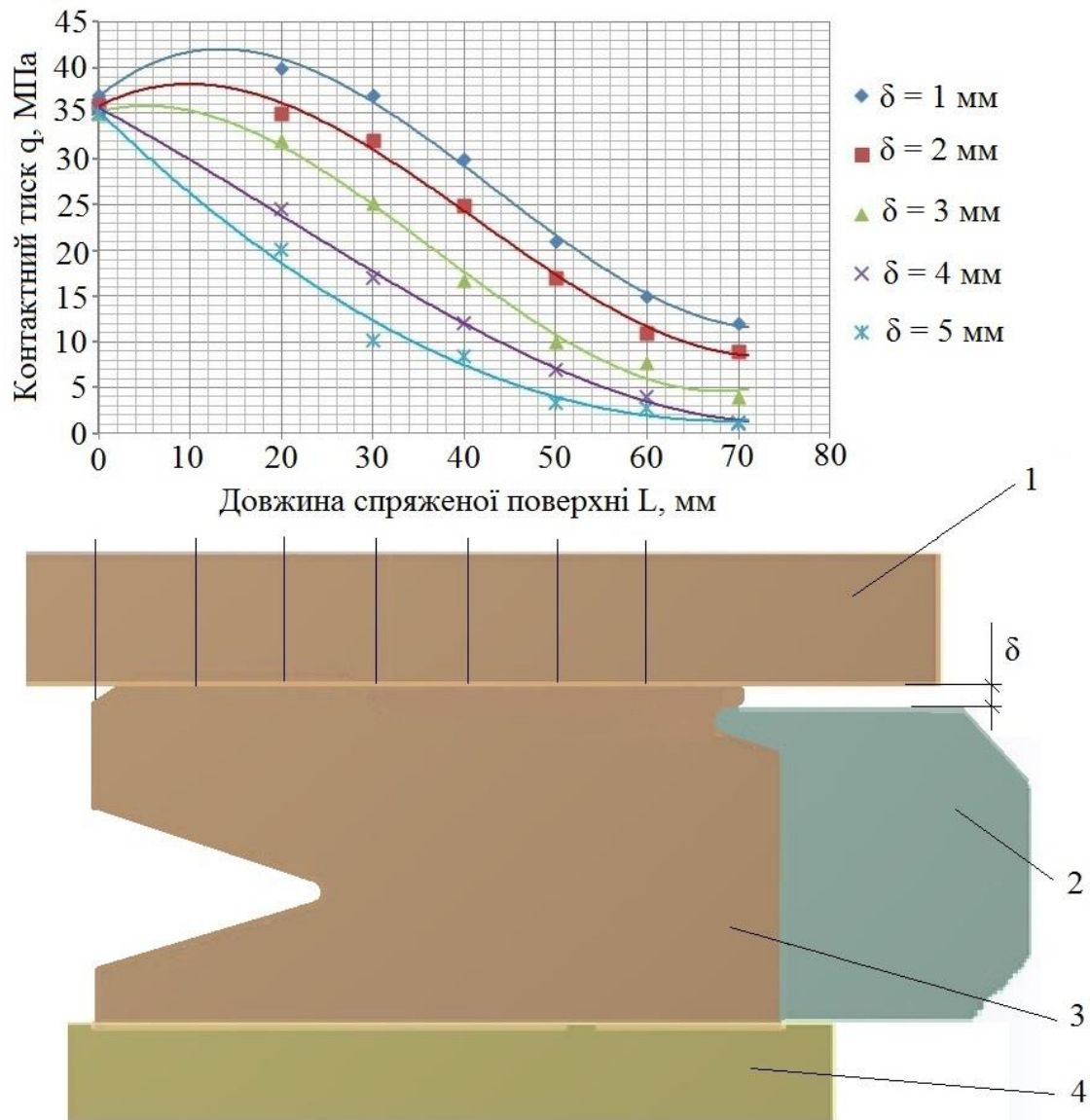


Рис. 8. Графік розподілу контактних тисків по довжині спряженої поверхні залежно від радіального зазору при тиску випробування 35 МПа: 1 – обсадна труба; 2 – упор; 3 – самоущільнювальна манжета; 4 – ствол пакера; δ – радіальний зазор між упором манжети та обсадною трубою

Аналіз отриманої графічної залежності $q(L)$ (рис. 8) показав на суттєву розбіжність контактних тисків по довжині спряженої поверхні: манжета – обсадна труба. Контактні тиски приймають мінімальне значення в зоні опорної частини манжети.

Зазор δ величиною ≥ 3 мм спричиняє витискання опорної частини манжети в просторову зону, як показано на рис. 9.



Рис. 9. Результати витискання опорної частини манжети в зазор 3 мм при вилученні пакера після дослідження із лабораторного стенду

Витискання гуми (екструзія) призводить, спочатку, до значного витискання матеріалу, внаслідок дії розтягуючи сил, і перерозподілу робочих контактних тисків по спряженій поверхні, а потім і до втрати герметичності. Критичним наслідком екструзії є руйнування опорної частини манжети.

Обговорення результатів дослідження контактних тисків

Аналіз тривимірного перетину гіперповерхні $q(P, \Delta)$ залежності контактного тиску від тиску випробування та натягу показує, що при збільшенні діаметрального натягу та величини випробувального тиску контактний тиск зростає. Зважаючи на результати досліджень авторів роботи, можна стверджувати на значну схожість результатів приросту контактних тисків від вказаних факторів в манжеті устьового випробувального пакера та манжет гідроциліндра.

Цікавим є тривимірний графік $q(P, \delta)$ залежності контактного тиску від тиску випробування та радіального зазору. Радіальний зазор виступає в процесі роботи манжети просторовою зоною куди, внаслідок нестисливості гуми, відбувається її часткове витискання під дією робочого навантаження (випробувальних тисків P). Крім того, як показують дослідження, зазор є основним концентратором напружень в тілі манжети. Саме в цій області спостерігається утворення тріщин. Частина матеріалу, що витискується в зазор, знаходиться під дією розтягуючи сил, а в перетині, що знаходиться поблизу зазору, відбувається різке зниження контактних напружень до нульового значення.

З графіка $q(P, \delta)$ (рис. 7) видно, що контактні тиски мають мінімальне значення при радіальному зазорі вже більше 3 мм. При збільшенні тиску випробування, при тих же значення радіального зазору, контактні тиски зростають, але виходячи з нормативних вимог до величини тиску випробування, цей фактор, хоч і напряму впливає на герметизаційну здатність, не може коригуватися і має залишатися незмінними.

З графіку (рис. 8) розподілу контактних тисків по довжині спряженої поверхні $q(L)$ видно, що контактні тиски знижуються від кромки робочої губи (відповідає позначці 0 мм на вісі абсцис) самоущільнюваної манжети до опорної частини (відповідає позначці 65 мм). Локальний екстремум максимум в області

$L=10-20$ мм для $\delta=1-3$ мм пояснюється тим, що рідина під час випробування, за рахунок наявності в манжеті монтажної фаски, частково просочується між спряженими поверхнями.

Характер кривої $q(L)$ при $\delta > 3$ мм і при $\delta = 1-3$ мм суттєво різний. Інтенсивність спаду контактних тисків при радіальному $\delta > 3$ мм збільшується, що викликано збільшенням просторової зони для витискання матеріалу ущільнення.

Визначення контактних тисків за описаним вище методом дало змогу дослідити залежність герметизаційної здатності ущільнення випробувального пакера від ряду конструктивних та технологічних факторів в умовах, наближених до умов випробування в свердловині. Проте визначення контактних тисків на виготовленому лабораторному стенді не дає можливості врахувати стан ущільнюваної поверхні обсадної труби. На початкових етапах випробування стан ущільнюваної поверхні має важливе значення для забезпечення герметичності пакера. Перспективним напрямом у дослідженні герметизаційної здатності самоущільнюваних манжет свердловинних пакерів за «методом контрольних отворів» є додаткове моделювання (врахування наявності) обсадних труб з різним станом ущільнюваної поверхні (слабка, середня та сильна кавернозність поверхні).

Висновки

1. Із застосуванням повного факторного планування експерименту на основі центрального композиційного ротатабельного плану другого порядку Бокса-Хантера одержано статистичну математичну модель впливу діаметрального натягу Δ , мм; тиску випробування P , МПа; радіального зазору δ між опорною втулкою та обсадною трубою, мм та модуля зсуву матеріалу σ_{zc} , МПа на величину контактного тиску, МПа, яка представлена поліномом другого порядку. При цьому, на основі Паретто-графіка встановлено, що найбільш значимим фактором є тиск випробування, наступні за значимістю: діаметральний натяг, радіальний зазор та модуль зсуву матеріалу ущільнення. Тривимірний графік залежності контактного тиску від тиску випробування та натягу показує яскраво виражену прямо пропорційну і близьку до лінійної залежність. Тривимірний графік залежності контактного тиску від тиску випробування та радіального зазору характеризується нелінійністю з тенденцією до екстремуму-мінімуму в межах факторного простору.

2. Експериментально встановлено розподіл контактних тисків по довжині спряженої поверхні, що характеризується зменшенням контактних тисків від кромки робочої губи до опорної частини манжети (координата L). Виявлено локальний екстремум-максимум в області $L=10-20$ мм для зазорів між опорною втулкою та обсадною трубою $\delta=1-3$ мм, який пояснюється тим, що рідина під час випробування, за рахунок наявності в манжеті монтажної фаски, частково просочується між спряженими поверхнями. Встановлено, що характер зміни контактних тисків по довжині спряженої поверхні при абсолютних значеннях $\delta > 3$ мм та $\delta = 1-3$ мм суттєво різний. Інтенсивність спаду контактних тисків при радіальному зазорі $\delta > 3$ мм збільшується, що спричинено збільшенням просторової зони для витискання матеріалу ущільнення. Для всіх значень зазору кон-

тактні тиски приймають мінімальне значення в зоні опорної частини манжети.

Таким чином, проведені дослідження контактних тисків самоущільнювальної манжети устьового випробувального пакера виявили вплив на якісні і кількісні показники герметизаційної здатності самоущільнювальних манжет свердловинних випробувальних пакерів силових факторів, геометричних характеристик ущільнення та фізико–механічних властивостей матеріалу манжети. У подальших дослідженнях доцільно розглянути вплив на герметизаційну здатність самоущільнюваної манжети стану ущільнюваної поверхні. Інша невирішена задача – визначення впливу висоти опорної частини манжети на розподіл контактних тисків по довжині спряженої поверхні.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 3-17

ПРАКТИКУМ З КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ КОРИСНИХ КОПАЛИН¹

6.2. Приклади моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин.....

- 6.2.1. Процес адгезійного контакту «вуглемасляна речовина – золото».....
- 6.2.2. Процес зневоднення вугільних шламів фільтруванням за допомогою латексних флокулянтів.....
- 6.2.3. Процес зневоднення вуглемасляного агломерату центрифугуванням.....
- 6.2.4. Процес зневоднення дрібнодисперсних матеріалів методом зриву водної плівки..
- 6.2.5. Процес знесолення вугілля.....
- 6.2.6. Процес селективного подрібнення руд.....
- 6.2.7. Визначення раціонального складу композиційних.....
реагентів-нафтопродуктів для інтенсивного зневоднення вугілля фільтруванням.....
- 6.2.8. Процес масляної грануляції бурого вугілля.....
- 6.2.9. Визначення оптимального складу флокулянта на основі масляних реагентів.....
 - 6.2.9.1. Визначення оптимального складу флокулянта на основі нафтопродуктів.
 - 6.2.9.2. Визначення оптимального складу флокулянта на основі продуктів коксохімії.....
- 6.2.10. Процес селективної флокуляції вугілля маслами.....
- 6.2.11. Процес селективної флокуляції вугілля латексами.....
- 6.2.12. Флокуляційно-флотаційний процес збагачення вугілля.....
- 6.2.13. Суміщений процес «селективна масляна агрегація – гідротранспорт вугілля»..
- 6.2.14. Процес осадження твердої фази хвостів флотації рідкіснометалічних руд.....

Загальна література до Практикуму.....

6.2. ПРИКЛАДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ КОРИСНИХ КОПАЛИН

6.2.1. Процес адгезійного контакту «вуглемасляна речовина – золото»

Рядом наукових центрів в США, Австралії, Великобританії, Росії активно розробляється новий напрямок збагачення тонкодисперсного золота та інших гідрофобних пиловидних корисних копалин шляхом селективної адгезії олеофільних частинок руди на спеціальних адгезійно активних гранульованих носіях. Область застосування цього процесу широка - вона включає рудну сировину крупністю від 10 мкм до 0,5 мм, яка характерна для ряду золотоносних родовищ України. Процес адгезійного збагачення в порівнянні з сучасними технологіями-аналогами вигідно відрізняється високою ефективністю та більшою екологічною чистотою [1, 2].

¹ Нумерація елементів тексту збережена за посібником Нумерація елементів тексту збережена за посібником Білецький В. С., Смирнов В. О., Сергєєв П. В. Моделювання процесів переробки корисних копалин: Посібник / За ред. І. М. Фика. НТУ «Харківський політехнічний інститут», Львів: «Новий Світ-2000», 2020. — 399 с.

Елементарним актом процесу адгезійного збагачення тонкодисперсного золота при використанні в якості носіїв вуглемаляних гранул є контакт “вуглемаляна речовина – золото”. Попри лабораторні та стендові дослідження процесу в цілому і його промислові апробації, дослідження власне елементарного акту адгезійного контакту “адгезив-субстрат” не були проведені, що звужує можливості цілеспрямованої корекції вибору реагентів-зв’язуючих, температурного режиму процесу адгезійного збагачення та оптимізації характеристик гранул-носіїв.

1. Нами вперше в рамках НДР “Розробка наукових основ процесу адгезійного збагачення тонкодисперсного золота” (2000 р., ДР 0199U001117) досліджено процес адгезійного контакту “вуглемаляна речовина – золото” із застосуванням планування експерименту. Об’єктом досліджень була грануляційна речовина, одержана з донецького вугілля марки Г крупністю 0-0,1 мм, зольністю 9% і топкового мазуту марки М100. Факторами, які варіюються були вибрані: крупність вихідного вугілля (оцінювалася за зовнішньою питомою поверхнею вугілля $S_{\text{п}}$), температура грануляційної речовини $t_{\text{гр}}$ та витрати реагенту-зв’язуючого $Q_{\text{м}}$.

Експериментальна область факторного простору: $S_{\text{п}} = 650-4400 \text{ м}^2/\text{г}$ (що відповідає зміні крупності вихідного вугілля від $-0,05 \text{ мм}$ до $0,2-0,5 \text{ мм}$), $t_{\text{гр}} = 10-40 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q_{\text{м}} = 25-45 \text{ мас.}\%$. Функція відгуку – липкість L золота проби 500 до грануляційної речовини. Липкість вимірювалася по запропонованій нами методиці [3].

Для планування використаний план Бокса-Бенкена [4]. Обробка результатів експерименту виконана за комп’ютерною програмою “Statgraphics”.

Одержаний поліном (регресійна модель) має вигляд:

$$L = 10,3 + 1,7125 Q_{\text{м}} + 5,6 S_{\text{п}} - 7,4125 t_{\text{гр}} - 3,8 Q_{\text{м}}^2 - 3,275 Q_{\text{м}} \cdot S_{\text{п}} - 8,8 Q_{\text{м}} \cdot t_{\text{гр}} + 3,775 S_{\text{п}}^2 - 4,675 S_{\text{п}} \cdot t_{\text{гр}} + 7,4 t_{\text{гр}}^2.$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому (кодованому) виді. Як показує стандартизований комп’ютерний аналіз, найбільший питомий ефект на параметр липкості L справляє температура грануляційної речовини (середовища, в якому здійснюється адгезійний контакт), сукупність факторів “витрати реагенту – температура середовища” та крупність вихідного вугілля. Всі коефіцієнти моделі значимі (рис. 1.). Це свідчить, зокрема, про правильно обраний факторний простір.

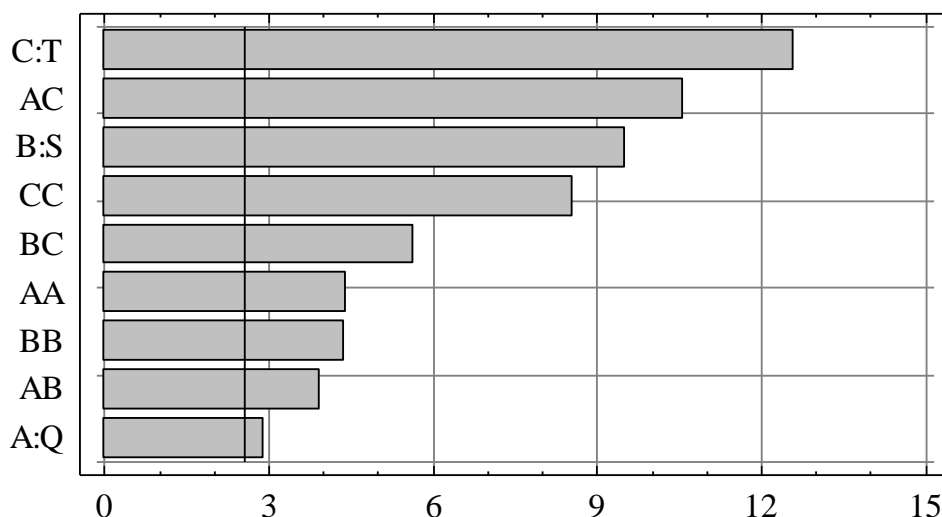


Рис. 1. Значимість коефіцієнтів моделі (Парето-графік). Вертикальна лінія відповідає 95% значимості.

На рис. 2. подані розрахункові гіперповерхні $L = f(Q_m, t_{гр})$, $L = f(Q_m, S_{п})$, $L = f(S_{п}, t_{гр})$. На рис. 3: a – перетини цих гіперповерхонь по “головних ефектах”, які показують вплив на параметр L одного фактора при фіксуванні інших на “0”, та b – ефекти парних взаємодій факторів.

Гіперповерхні мають неекстремальний складний характер.

Локальні перетини по “головних ефектах” показують наявність екстремуму-максимуму залежності липкості від витрат реагенту, різке зниження липкості при збільшенні крупності вихідного вугілля та збільшенні температури середовища. Фізична суть цих ефектів пояснюється впливом обраних факторів на властивості масляних плівок, а також структурованої тонкодисперсним вугіллям зв’язуючої речовини.

Аналіз ефектів парних взаємодій факторів показує, що липкість досягає максимальних значень при поєднанні: а) значеннях витрат реагенту-зв’язуючого та крупності гранулоутворюючого вугілля близьких до точки “0” матриці планування експерименту; б) мінімальної температури середовища і максимальному вмісті масляного реагенту в грануляційній речовині; в) мінімальної температури середовища і максимального подрібнення гранулоутворюючого вугілля.

Одержана модель може бути використана як для поглибленого дослідження впливу на процес адгезійного збагачення тонкодисперсного золота обраних варіативних факторів, так і для прогнозування липкості гранул-носіїв [5, 6].

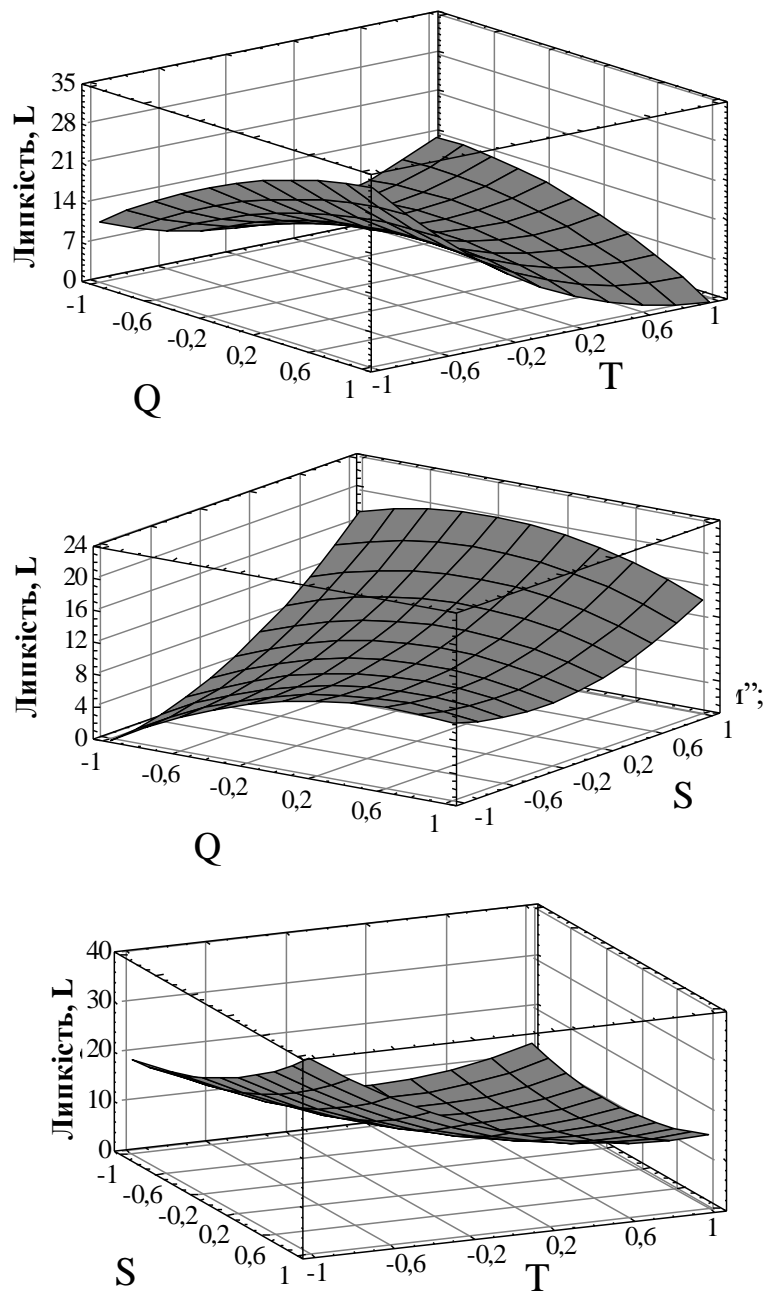


Рис. 2. Розрахункові гіперповерхні:

$$L = f(Q_m, t_{rp});$$

$$L = f(Q_m, S_n);$$

$$L = f(S_n, t_{rp}).$$

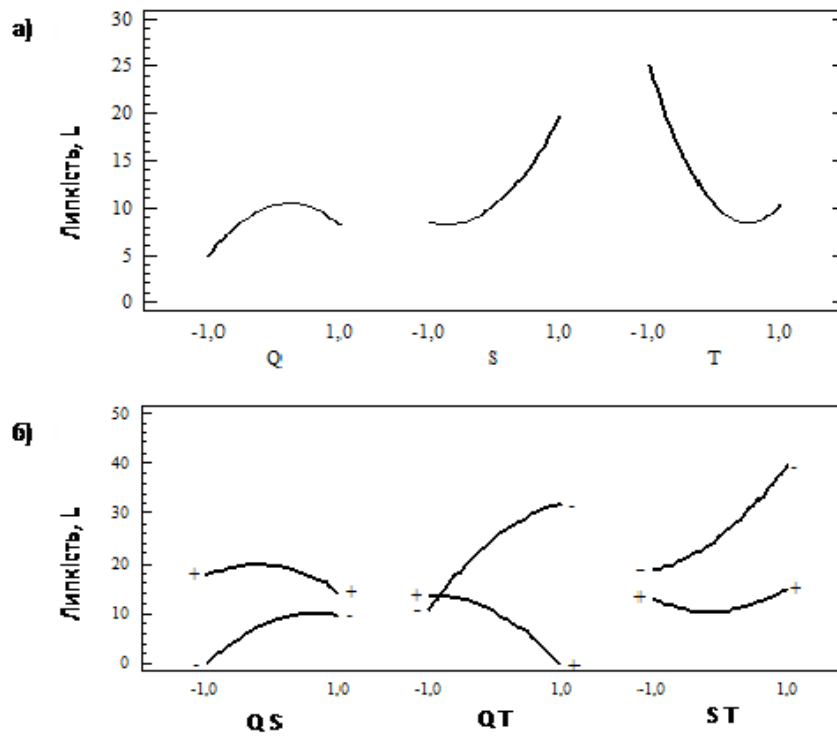


Рис. 3. Контурні криві

6.2.2. Процес зневоднення вугільних шламів фільтруванням за допомогою латексних флокулянтів

Ефективність зневоднення вугільних флотоконцентратів вакуумним фільтруванням в значній мірі залежить від вмісту у вихідному живленні класу менш 63 мкм [1-4]. Під час формування шару осаду на фільтрувальній поверхні тонкі вугільні частинки заповнюють порові простори між більш крупними зернами, що різко зменшує швидкість фільтрування і питому продуктивність процесу. При вмісті класу – 63 мкм більше 50-60 % цей негативний вплив призводить практично до припинення процесу фільтрування [4]. В роботах [5-6] запропоновано використання технології флокуляції (агрегації) тонких вугільних частинок за допомогою синтетичних латексів для підвищення ефективності зневоднення флотоконцентратів. Встановлено, що при витратах латексу 100 - 200 г/т шлама можливе зниження вологості осаду на 0,8 – 1% при підвищенні питомої продуктивності вакуум-фільтрів.

Оскільки наведені в технічній літературі дані про цей напрямок використання латексів мають обмежений характер і не дозволяють зробити узагальнюючих висновків, нами проведені лабораторні дослідження впливу синтетичних латексів на цей процес.

Суть досліджень полягала у встановленні впливу природи та витрат згаданих латексів на питомий об'ємний опір осаду (R_{oc}), його вологість (W_{oc}) та питому продуктивність процесу фільтрування по твердому продукту (q).

Дослідження проводилися на лабораторній фільтрувальній установці за методикою, наведеною в роботі [7]. В якості об'єкту досліджень було використано флотоконцентрат вугілля марки Ж ЦЗФ "Київська" зольністю 9 % і вмістом класу – 63 мкм 40 %. Як флокулянти використовували синтетичні латекси БС-30Ф, БС-50 і ПС-100, що відрізнялися один від одного поступовим ростом концентрації стиrolу в тому ж ряді (від 30% у БС-30Ф до 100% у латексу ПС-100).

Густина гідросуміші флотоконцентрату в усіх опитах складала 250 кг/м³. Латексний флокулянт змішувався з гідросумішшю безпосередньо у ємності з мішалкою. Процес фільтрування здійснювався після 60 с перемішування з латексом при вакууметричному тиску 70 кПа. Тривалості набору осаду та його сушки складала 10 с і 20 с відповідно. Ці значення відповідають реальним, що характерні для дискових вакуум-фільтрів ДУ 250 "Сибір".

Результати експериментів приведені у табл.1. На рис.1 також наведені залежності $R_{oc} = f(Q)$ та $W_{oc} = f(Q)$, які збудовані на основі даних табл.1.

Витрати латексу Q, г/т	БС-30Ф			БС-50			ПС-100			Примітки
	$R_{oc}, \times 10^{10} \text{ м}^{-2}$	$W_{oc}, \%$	$q, \text{ т}/(\text{г} \cdot \text{м}^2)$	$R_{oc}, \times 10^{10} \text{ м}^{-2}$	$W_{oc}, \%$	$q, \text{ т}/(\text{г} \cdot \text{м}^2)$	$R_{oc}, \times 10^{10} \text{ м}^{-2}$	$W_{oc}, \%$	$q, \text{ т}/(\text{г} \cdot \text{м}^2)$	
0	16,5	24,8	0,32	16,5	24,8	0,32	16,5	24,8	0,32	фільтрація без латексу
50	5,3	24,1	0,36	8,4	24,4	0,33	12,7	24,6	0,33	
100	1,6	23,7	0,41	5,2	24,1	0,36	10,1	24,5	0,34	
150	0,61	23,5	0,46	3,6	24,0	0,39	9,2	24,4	0,36	
200	0,34	23,4	0,49	2,7	23,9	0,42	8,6	24,4	0,37	

Таблиця 1. – Результати експериментів

Як видно, латексні флокулянти суттєво зменшують питомий опір осаду R_{oc} . Зменшення R_{oc} при введенні в гідросуміш флотоконцентрату латексів обумовлено агрегацією тонкодисперсних вугільних часток в мік-

рофлокули. Це суттєво збільшує пористість осаду, знижує його опір, внаслідок чого зростає швидкість фільтрації води. Найбільш впливовішим є латекс БС-30Ф. При його витратах 150200 г/т величина R_{oc} зменшується в десятки разів. Збільшення концентрації в полімерних ланцюжках латексів БС-50 і ПС-100 стиrolу призводить до значного зниження їх впливу на R_{oc} . При витратах латексу ПС-100 200 г/т питомий опір осаду зменшується тільки в 2 рази.

Аналогічна закономірність спостерігається при вивченні залежності $W_{oc} = f(Q)$. Вплив латексів на зниження вологості осаду W_{oc} зростає в ряду флокулянтів ПС-100 – БС-50 – БС-30Ф. При витратах останнього 100-150 г/т вологість осаду зменшується на 1,1 -1,3 %.

З використанням програмного модуля SigmaPlot нами проведені дослідження з визначення найбільш оптимальних регресійних моделей, що описують знайдені залежності $R_{oc} = f(Q)$ та $W_{oc} = f(Q)$. Встановлено, що в обох випадках найбільш високими статистичними характеристиками володіють експонентні рівняння регресії виду:

$$R_{oc} = R_{oc}^o + a \cdot e^{-b \cdot Q} \quad (1)$$

$$W_{oc} = W_{oc}^o + a \cdot e^{-b \cdot Q} \quad (2)$$

де R_{oc}^o та W_{oc}^o – деякі початкові значення питомого опору та вологості осаду; a и b – параметри рівняння регресії.

Для латексу БС-30Ф рівняння регресії $R_{oc} = f(Q)$ має вигляд:

$$R_{oc} = 0,1186 + 16,3911 \cdot e^{-0,0233 \cdot Q} \quad (3)$$

Оцінки моделі: коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,99988$; стандартна помилка оцінки $SE = 0,1051$.

Для того ж латексу рівняння регресії $W_{oc} = f(Q)$:

$$W_{oc} = 23,267 + 1,5354 \cdot e^{-0,0125 \cdot Q} \quad (4)$$

Оцінки моделі: коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,99982$; стандартна помилка оцінки $SE = 0,0150$.

Серед технологічних показників осаду, які реально можуть контролюватися на фабриці, найбільш суттєво змінюється під впливом добавки

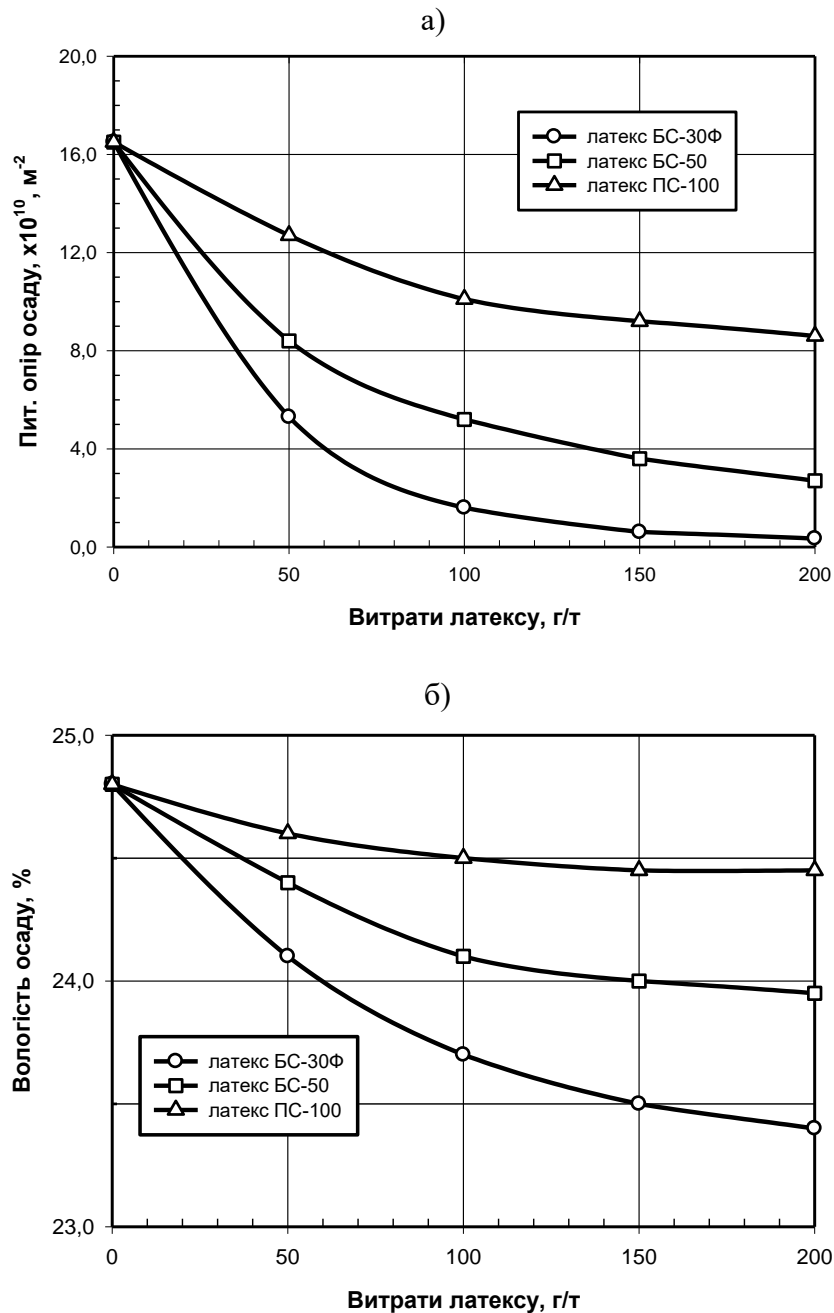


Рис. 1 Вплив витрат латексних флокулянтів на:
а – питомий опір осаду;
б – вологість осаду.

латексного флокулянта питома продуктивність процесу фільтрування по твердому продукту (q). З даних табл.1 витікає, що обробка латексами гідросуміші вугільного флококонцентрату призводить до значного збільшення q . Як і у випадку залежностей $R_{oc} = f(Q)$ та $W_{oc} = f(Q)$, зростання цього впливу спостерігається в ряду флокулянтів ПС-100 – БС-50 – БС-30Ф. При витратах латексу БС-30Ф 150-200 г/т питома продуктивність q зростає на 30-50 %.

Для більш змістовного дослідження впливу на питому продуктивність процесу фільтрування його основних технологічних параметрів реалізовано активний факторний експеримент на основі некомпозиційного плану Бокса-Бенкена для трьох факторів: густини гідросуміші (X_1), величини вакууму (X_2), витрат латексу БС-30Ф (X_3). Рівні варіювання факторів наведено у табл.2.

Таблиця 2

Фактори та рівні їх варіювання

Фактори	Код фактору	Один. виміру	Рівні факторів		
			-1	0	+1
Густина гідросуміші	X_1	кг/м ³	200	300	400
Вакууметричний тиск	X_2	кПа	40	60	80
Витрати латексу	X_3	г/т	0	100	200

Standardized Pareto Chart for q

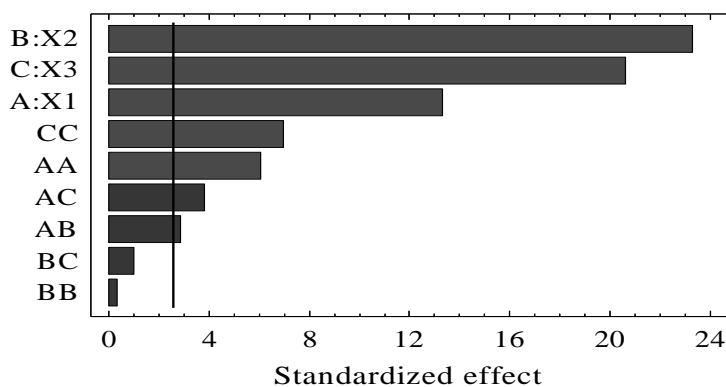


Рис.2 Парето-карта коефіцієнтів моделі (вертикальна лінія відповідає 95 % - значущості коефіцієнтів);

Дослідження проводилися на тій же лабораторній фільтрувальній установці і на тому ж самому вугіллі, що і у попередніх експериментах. Розробка та аналіз рівняння регресії здійснювалося за допомогою програми **Statgraphics Plus**. Як видно з паретографіка, що наведений на рис.2, статистично значимими є більшість коефіцієнтів рівняння регресії за винятком коефіцієнтів при парній взаємодії X_2X_3 та квадратичному члені X_2^2 .

З урахуванням значимості коефіцієнтів рівняння регресії має вигляд:

З урахуванням значимості коефіцієнтів рівняння регресії має вигляд:

$$q = 0,2933 + 0,05 \cdot X_1 + 0,0875 \cdot X_2 + 0,0775 \cdot X_3 + 0,0333 \cdot X_1^2 - 0,015 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,02 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0383 \cdot X_3^2 \quad (5)$$

Адекватність регресійної моделі підтверджується високим значенням коефіцієнту детермінації $R^2 = 99,60 \%$, та малою величиною стандартної помилки оцінки $SE = 0,01065$.

На рис.3 представлені часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції. Як видно, зростання величини кожного з факторів, що досліджуються, призводить до збільшення питомої продуктивності процесу фільтрації. Найбільш впливовішим фактором є вакууметричний тиск X_2 . Зростання вакууметричного тиску з 40 до 80 кПа викликає збільшення величини q в середньому на 50-60 %. Значущість коефіцієнту при парній взаємодії X_1X_2 свідчить про помітний вплив вакууметричного тиску на характер залежності $q = f(X_1)$. Дійсно, як видно з тривимірного графіка $q = f(X_1X_2)$, при великих значеннях вакууметричного тиску ($X_2 \rightarrow +1$) зростаюча функція $q = f(X_1)$ майже нівелюється, тобто густина гідросуміші істотно не впливає на питому продуктивність процесу фільтрації. Це підтверджує відомий факт, що механічні фактори в процесі зневоднення фільтрування є домінуючими.

При витратах латексного флокулянта (фактор X_3) 100-200 г/т спостерігається збільшення питомої продуктивності фільтрації q в середньому на 20-50 %. Значущість коефіцієнту при парній взаємодії X_1X_3 вказує на суттєвий взаємний вплив цих факторів на цільову функцію q . Зростання ви-

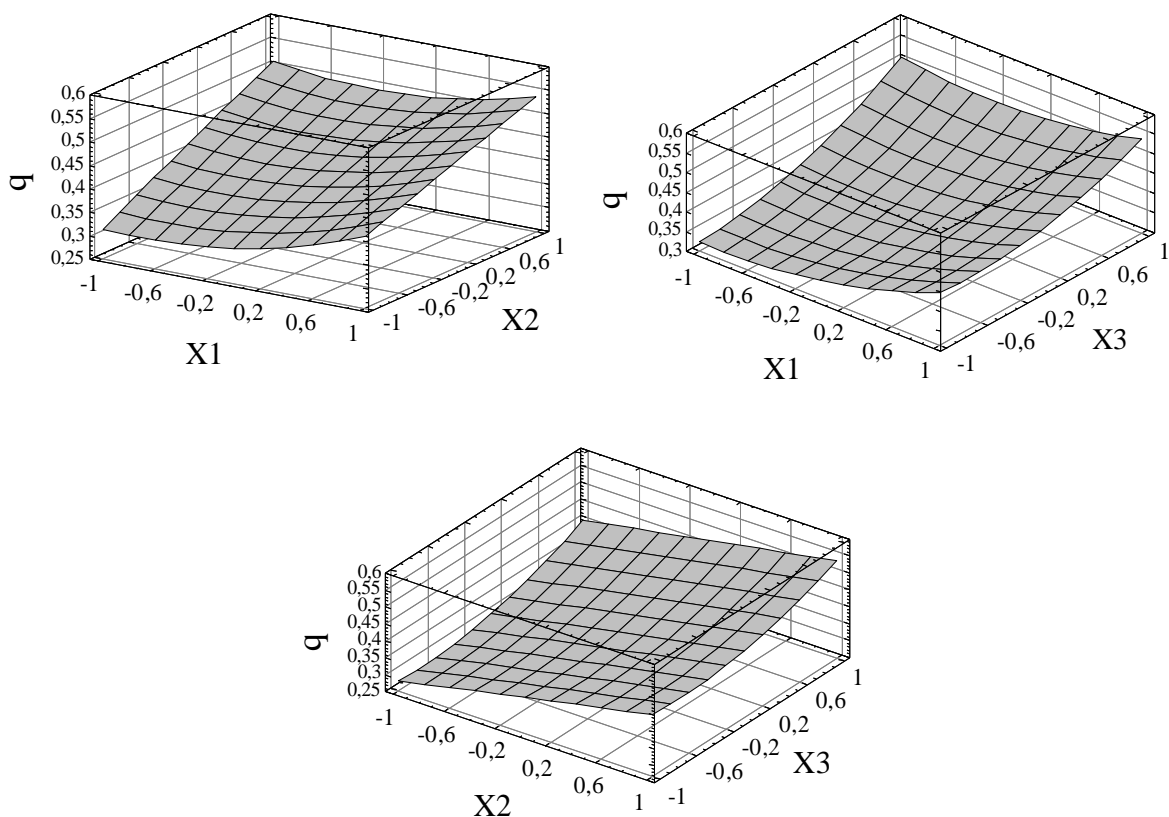


Рис.3 – Тривимірні перетини поверхні цільової функції

трат флокулянта (значень фактору X_3) значно зменшує вплив густини гідросуміші (фактору X_1) на питому продуктивність процесу. Це, імовірно, обумовлено певною стабілізацією в'язкості гідросуміші при агрегації латексом вугільних часток в мікрофлокули. Тому застосування латексів для підвищення ефективності вакуумного фільтрування достатньо ефективно у широкому діапазоні густини вихідної гідросуміші.

Список джерел

1. Бейлин М.И. Теоретические основы процессов обезвоживания углей. - М.: Недра. - 1969. - 240 с.
2. Руденко К.Г., Шемаханов М.М. Обезвоживание и пылеулавливание. - М.: Недра, 1981. - 350 с.
3. Каминский В.С., Барбин Н.Б., Долина Л.Ф. Интенсификация процессов обезвоживания.- М.: Недра, 1982. - 224 с.

6.2.3. Процес зневоднення вуглемасляного агломерату центрифугуванням

Підвищення ефективності механічного зневоднення вугілля, що передається гідравлічним транспортом, можливе шляхом застосування нових комплексних технологій, що поєднують операції механічного зневоднення і фізико-хімічної обробки вугільної поверхні, наприклад, технології масляної агрегації. Остання забезпечує, по-перше, гідрофобізацію вугільної поверхні, і, по-друге, структурування тонкодисперсного вугілля у водному середовищі в агломерати-гранули за допомогою масляних реагентів. В основі цих процесів лежить механізм адгезійної взаємодії олеофільної вугільної поверхні з маслами, в результаті якого досягається її селективне змочування і агрегатування в турбулентному потоці води [1-6].

Ефект зневоднення вугілля при його пелетуванні пояснюється як результат адгезійних взаємодій на межі розділу фаз вугілля-зв'язуюче і аутогезійних контактів зерен та мікрогранул по поверхневих плівках зв'язуючого, які приводять до витіснення гідратної плівки з вугільної поверхні та об'єму гранули. Другу основну операцію процесу масляної грануляції, – зневоднення агломератів, – здійснюють на відсаджувальних центрифугах.

Зневоднення вугілля із застосуванням процесів центрифугування та масляної агрегації, як показали дослідження і практика вуглезбагачення, особливо перспективні у схемах підготовки вугілля до коксування (приклад – Губахінський КХЗ) та для вирішення задачі зневоднення гідравлічно транспортованого вугілля. Досягнута при цьому вологість – 10-11% є кондіційною і практично виключає необхідність термосушіння, яке є одним з

найбільш дорогих процесів технологічного ланцюга збагачення вугілля, крім того, екологічно брудним та пожежонебезпечним [1].

Мета цієї роботи – дослідження процесу зневоднення дрібнодисперсного вугілля поєднанням процесів “центрифугування – масляна агломерація” із застосуванням методу планування експерименту та одержання і аналіз математичних моделей процесу зневоднення.

Для одержання регресійної моделі досліджуваного процесу використано центральньо-композиційний рототабельний план другого порядку для чотирьох факторів, вибраних на основі попередніх досліджень: зовнішня питома поверхня вугілля S_B , витрата зв’язуючої речовини $Q_{ЗВ}$, фактор Фруда F_r , тривалість центрифугування $t_{ц}$. Фактори та границі їх варіювання наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Фактор	Код фактора	Одиниця вимірювань	Рівні факторів		
			-1	0	+1
Зовнішня питома поверхня вугілля, S_B	X_1	см ² /г	1000	1500	2000
Витрата зв’язуючої речовини, $Q_{ЗВ}$	X_2	%	2,5	4,0	5,5
Фактор Фруда, F_r	X_3		400	700	1000
Тривалість центрифугування, $t_{ц}$	X_4	с	3	5	7

Об’єктом досліджень була грануляційна речовина, одержана з вугілля марки Г крупністю 0-2 мм, зольністю 10,2% і топкового мазуту марки М100.

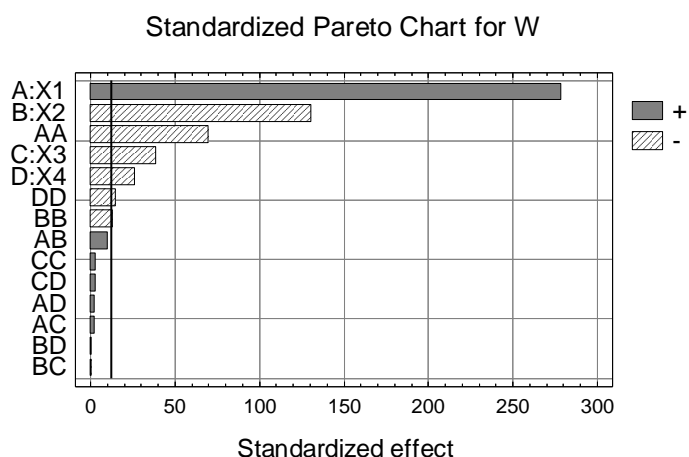


Рис.1 Значимість коефіцієнтів моделі (парето-графік). Вертикаль відповідає 95% значимості.

Експериментальна область факторного простору: $S_{п} = 1000-2000$ м²/г (що відповідає зміні крупності вихідного вугілля від 6-0 мм до 1-0 мм), $Q_{ЗВ} = 2,5-5,5$ мас.%, $F_r = 400-1000$, $t_{ц} = 1-5$ с. Цільова функція – вологість W_a^r зневоднених центрифугуванням агрегатів. Розробка плану експерименту, визначення значущості коефіцієнтів моделі та її аналіз виконані за допомогою комп’ютерної програми Statgraphics. Одержано поліном:

$$W = 18,75 + 4,025 \cdot X_1 - 1,883 \cdot X_2 - 0,5583 \cdot X_3 - 0,3750 \cdot X_4 - 1,185 \cdot X_1^2 - 0,2229 \cdot X_2^2 - 0,2479 \cdot X_4^2$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому вигляді. Модель адекватна процесу, що досліджується. Про це свідчить високе значення коефіцієнта детермінації ($R^2 = 99,01\%$). На рис. 1 подано стандартизований парето-графік, згідно якого коефіцієнти A , B , AA , C , D , BB і DD статистично значимі. Найбільший вплив на вологість зневодненого продукту має зовнішня питома поверхня вугілля S_B . Інші фактори впливають на цільову функцію значно менше.

На парето-графіку показано характер впливу факторів та ефектів їх взаємодій на вологість W_B^r . При цьому виділено фактори і ефекти – складові регресії, які знижують вологість зневодненого вугілля (гістограми зі знаком “-“) і збільшують її (гістограми зі знаком “+“).

На рис. 2 подані часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції $W_a^r(S_B, Q_{зв})$ і $W_a^r(F_r, t_{ц})$. На рис. 3 наведені контурні криві цих гіперповерхонь.

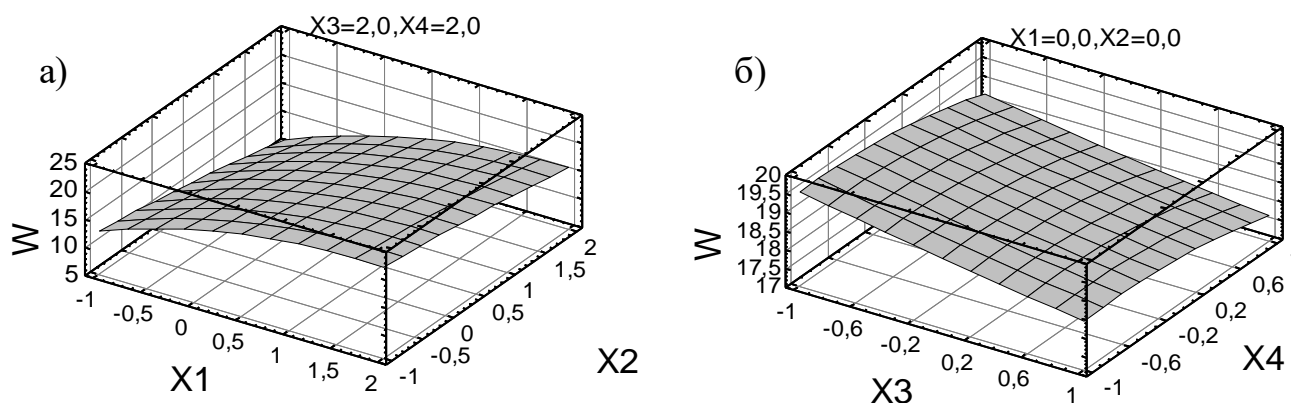


Рис.2 – Часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції.

а - $W_a^r(S_B, Q_{зв})$; б - $W_a^r(F_r, t_{ц})$

Як видно з наведених рис. 2 і 3, зростання зовнішньої питомої поверхні вугілля S_B в діапазоні значень факторного простору приводить до суттєвого збільшення вологості зневоднюваних вугільно-масляних агрегатів. При цьому спостерігається спочатку різке збільшення W_B^r в діапазоні значень S_B від -1 до $0,5$ (1000 - 1750 $см^2/г$), подальше збільшення S_B понад 1750 $см^2/г$ значно менше впливає на цільову функцію. Крива $W_a^r(S_B)|_{S_B > 2000}$ виводиться. Позитивний ефект від зростання витрат зв'язуючого та збільшення фактору Фруда носить рівномірний неекстремальний характер в даному факторному просторі. Час перебування матеріалу у центрифугі порівняно менше впливає на його вологість.

Аналіз ефектів парних взаємодій факторів показує, що вологість досягає мінімальних значень при поєднанні значення витрат реагенту-зв'язуючого більше 4 мас.% та зовнішньої поверхні вугілля близької до точки “-1” матриці планування експерименту.

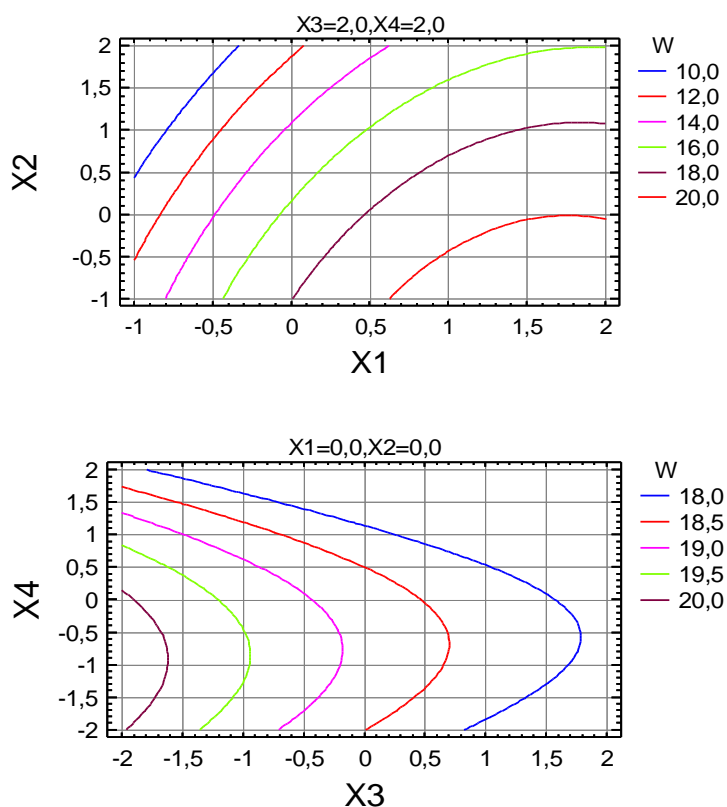


Рис. 3. Контурні криві гіперповерхонь

них варіативних факторів, а також для прогнозування вологості кеку центрифуг при зневодненні вугільного агломерату [7].

Список джерел

1. Харада Т., Мацуо Т. Агломерация у рідинах// Ніхон Когьо Кайсі. - 1982. - № 1134, С. 714-722.
2. Білецький В.С., Сергеев П.В., Папушин Ю.Л. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля. – Донецьк: Грань, 1996, 264 с.
3. Shrauti S.M., Arnold D. W. Recovery of waste fine coal by oil agglomeration // Fuel, 1995, 74 , № 3, p. 454-465.
4. Tovas D. Wheelock ea. The role of eir in oil agglomeration of coal at a moderate shear rate// Fuel, 1994, v. 73, № 7. p. 1103-1107.
5. Vega V.G. ea. Selective agglomeration of hing rank coals with vegeta-tible oils // 8 th Int. Conf. on coal Science. Oviedo. Spain, 10-12 September 1995. p. 296-297.
6. Сергеев П.В., Білецький В.С. Селективна флокуляція вугілля. – До-нецьк:ДонНТУ, УКЦентр, 199. – 136 с.
7. Зневоднення вугільного агломерату центрифугуванням / В. С. Білецький, П. В. Сергеев, Д. В. Павлов // Збагачення корисних копалин. – 2009. – Вип. 36 (77)/37(78). – С. 173–176.

Висновки

1. Встановлено, що в процесі зневоднення вугле-масляного агломерату центрифугуванням за значимістю впливу на вологість зневодненого матеріалу фактори розташовуються у такій послідовності: питома зовнішня поверхня вихідного вугілля, витрата масла-зв'язуючого в процесі агрегації вугілля, фактор Фруда центрифуги, тривалість центрифугування.

2. Одержана математична модель процесу зневоднення вугільного агломерату може бути використана для поглибленого дослідження впливу на процес зневоднення центрифугуванням обра-

6.2.4. Процес зневоднення дрібнодисперсних матеріалів методом зриву водної плівки

Ефективне зневоднення дрібнодисперсних матеріалів є актуальною проблемою сучасних технологій збагачення корисних копалин [1-3]. Традиційні методи зневоднення, - центрифугування, фільтрація, зневоднюоче грохочення, - в ряді випадків не забезпечують потрібного рівня вологості кінцевого продукту [3].

В роботах [4-10] запропоновано новий високоефективний метод зневоднювання дрібного матеріалу зривом водної плівки (метод ЗВП) у швидкісному струмені повітря. Вітчизняними дослідниками опрацьовано оригінальний спосіб реалізації цього методу ежектуванням зневоднюваного матеріалу [7, 10]. Разом з тим, до сьогодні процес зневоднення ежектуванням досліджено на первинному емпіричному рівні без системного підходу до вивчення факторних взаємозв'язків. Це утруднює розробку теоретичних основ і раціональних конструкцій ежекторних установ.

Суть досліджень полягала у вивченні впливу на вологість $W_{п}$ зневодненого продукту таких факторів: швидкості повітря на зрізі сопла ежектора (X_1), температури повітря (X_2), середнього діаметра частинок зневоднюваного матеріалу (X_3) та зольності вугілля (X_4). В якості останнього прийнято вугільний шлам марки ДГ шахти Південно-Донбаська № 1. Рівні варіювання факторів наведено у таблиці.

Фактори та рівні їх варіювання

Фактори	Код	Один. виміру	Інтервал варіювання	Рівні факторів				
				-2	-1	0	+1	+2
Швидкість повітря (газу)	X_1	м/с	50	50	100	150	200	250
Температура газу	X_2	°С	15	0	15	30	45	60
Середній діаметр частинок	X_3	мм	0,8	0,2	1,0	1,8	2,6	3,4
Зольність вугілля	X_4	%	6	8	14	20	26	32

Процес зневоднення реалізувався на полігонній установці, схема якої наведена на рис. 1. Вологість вихідного вугілля складала 18-20 % при збереженні його сипучості.

Розробка плану експерименту та аналіз одержаного рівняння регресії здійснено за допомогою комп'ютерної програми Statgraphics Plus. При цьому реалізовано центрально-композиційний рототабельний план типу 2^4 з зірковими точками.

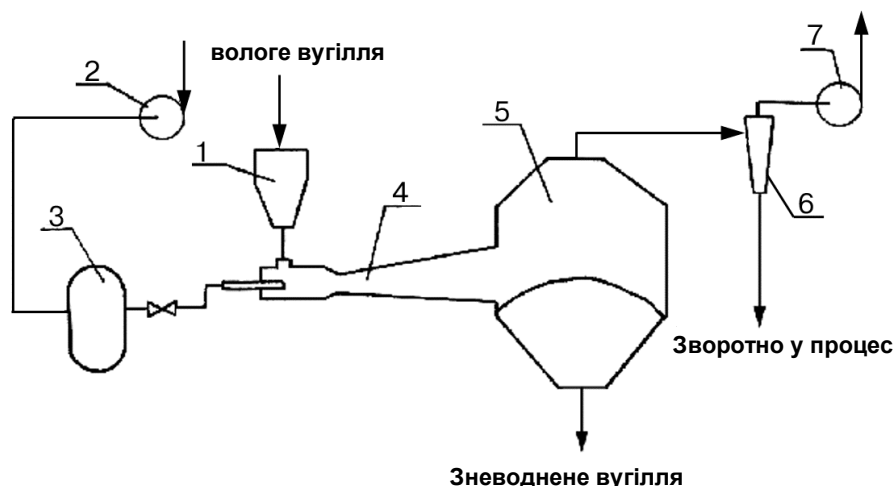


Рис. 1 – Схема установки зневоднення вугілля механічним зривом водної плівки: бункер вологого вугілля; 2 – компресор; 3 – ресивер; 4 – ежектор; 5 – збірник; 6 – циклон; 7 – вентилятор.

На рис.2 показано парето-графік і графік порівняння розрахункових та експериментальних даних. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 98,29\%$, показник втрат узгодженості функції Lack-of-fit $P = 0,1989$, а стандартна помилка оцінки $SE = 0,0707$, що свідчить про адекватність регресійної моделі.

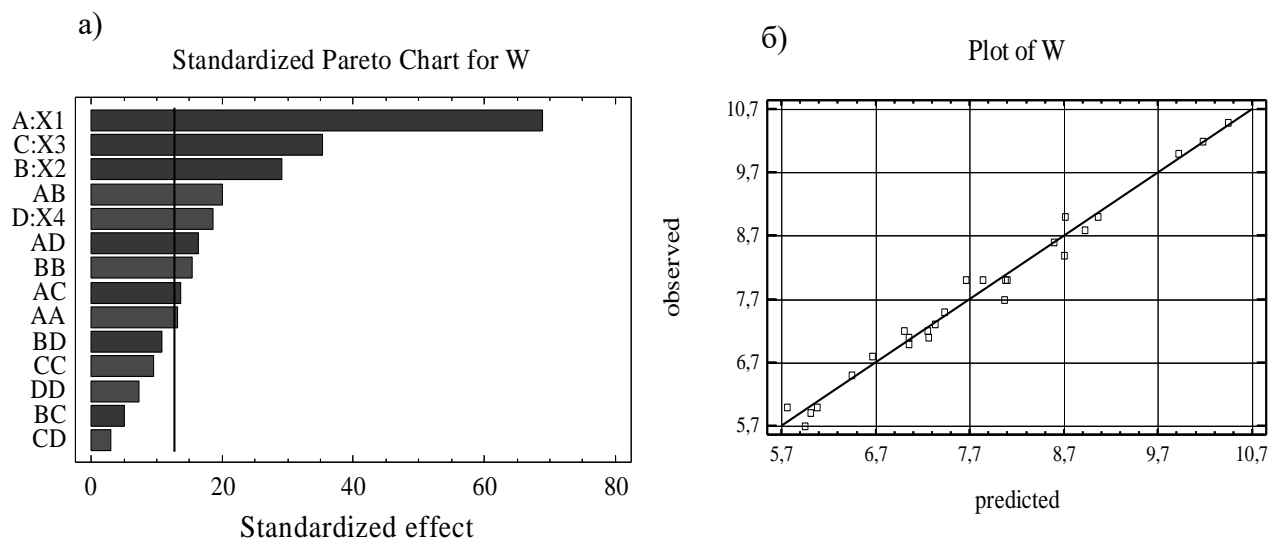


Рис.2 – Статистичні оцінки регресійної моделі:
а – парето-графік (вертикальна лінія відповідає 95 % значущості коефіцієнтів);
б – графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції.

На рис.2б показано взаємозв'язок одержаних і розрахункових даних. Основна частина експериментальних точок знаходиться в околиці прямої, що ще раз побічно підтверджує висновок про адекватність моделі.

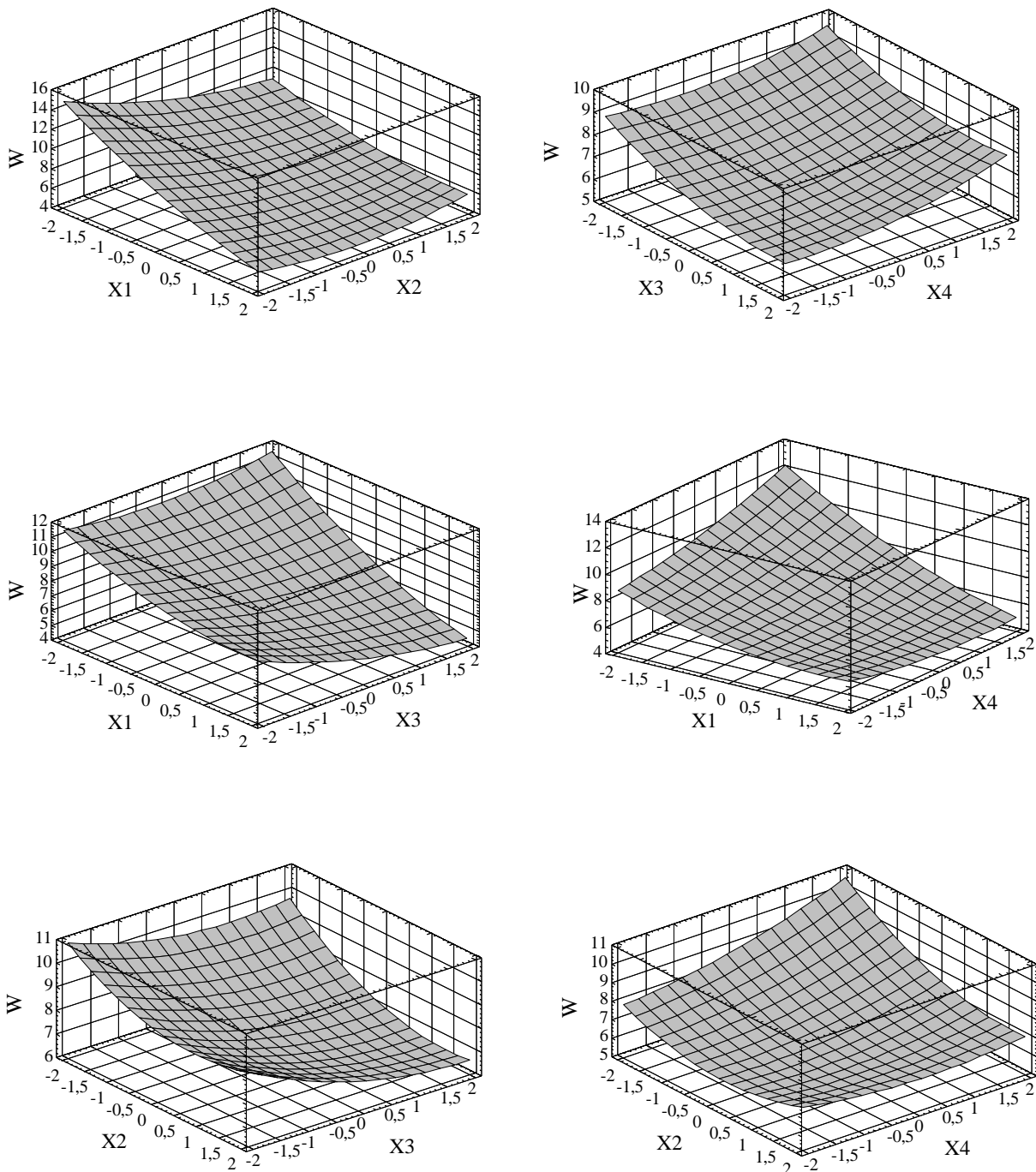


Рис.3 Тривимірні перетини цільової функції $W_{п}(X_1, X_2, X_3, X_4)$

Значущими є більшість коефіцієнтів моделі, за винятком коефіцієнтів при парних взаємодіях X_2X_4 , X_2X_3 , X_3X_4 та коефіцієнтів при X_1^2 , X_3^2 та X_4^2 .

З урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії має вигляд:

$$W = 7,050 - 0,9917 \cdot X_1 - 0,4167 \cdot X_2 - 0,5083 \cdot X_3 + 0,2667 \cdot X_4 + 0,2208 \cdot X_1^2 + 0,3500 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,2375 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,2875 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,2583 \cdot X_2^2$$

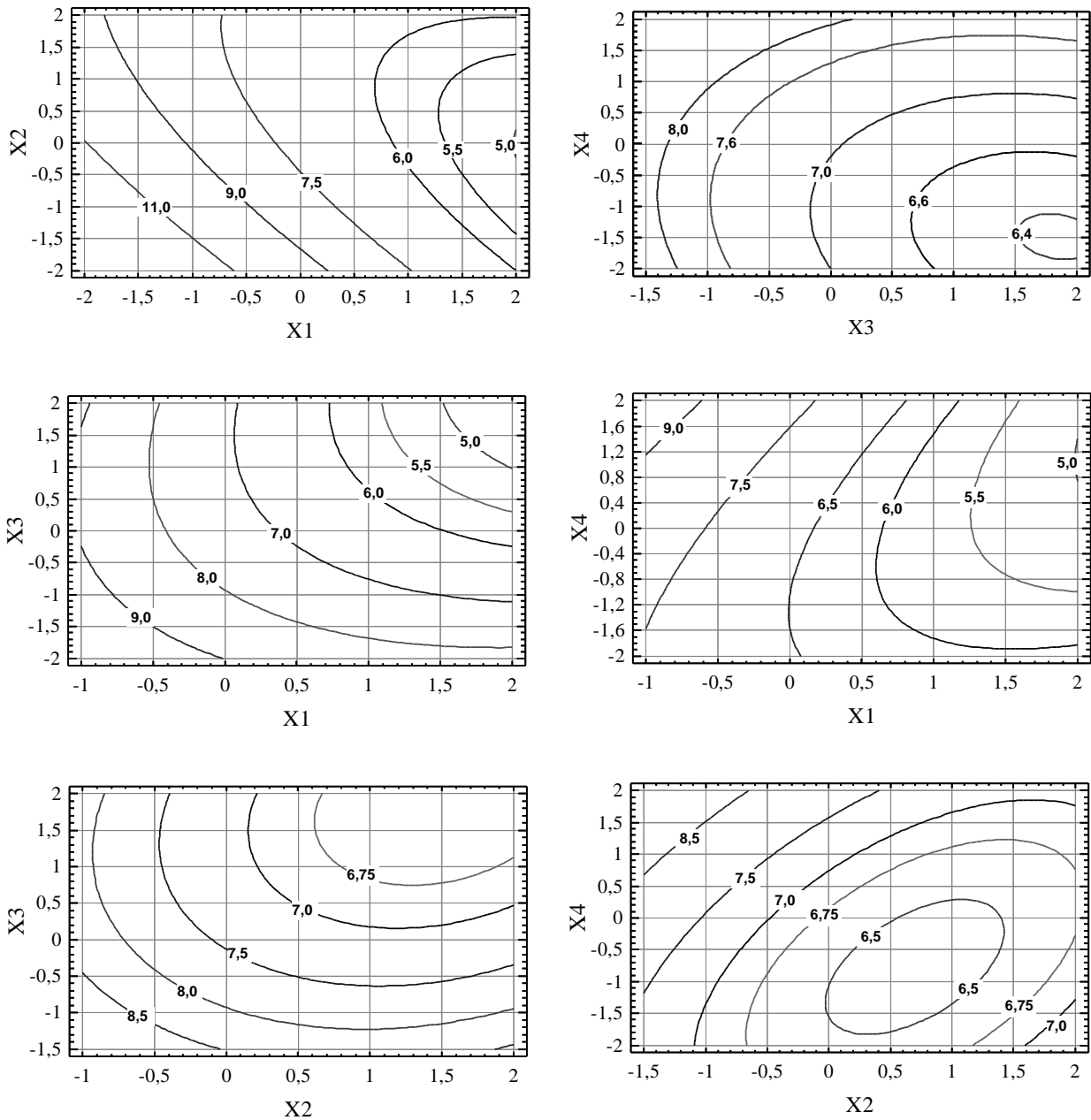


Рис.4 – Контурні криві цільової функції $W_{\Pi}(X_1, X_2, X_3, X_4)$

Як видно з паретто-графіка (рис.2а) та рівняння регресії, найбільш значимим є фактор X_1 – швидкість струменя повітря на зрізі сопла ежектора. Далі за значущістю фактори слідують у такому порядку: X_3, X_2, X_4 .

На рис.3 показано тривимірні перетини цільової функції $W_{\Pi}(X_1, X_2, X_3, X_4)$, а на рис. 4 – контурні криві цих поверхонь.

Згідно рис. 3 і 4, збільшення значень фактора X_1 однозначно веде до суттєвого зниження вологості зневодненого продукту. Разом з тим простежується певне нівелювання впливу механічного фактора X_1 при збільшенні температури повітря X_2 . У свою чергу, при малих значеннях фактора X_1 спостерігається спадна залежність $W_{\Pi}(X_2)$. При збільшенні швидко-

сті повітря X_1 вказана залежність $W_{\text{п}}(X_2)$ нівелюється. Отже, механічний фактор превалює над тепловим.

Другим за значущістю впливу на цільову функцію $W_{\text{п}}$ є середній діаметр частинок X_3 . З його збільшенням спостерігається зниження вологості вугілля. Разом з тим, при невеликих значеннях швидкості повітря X_1 залежність $W_{\text{п}}(X_3)$ майже не простежується. А при зростанні X_1 маємо чітко виражену спадну функцію $W_{\text{п}}(X_3)$, що свідчить про роботоздатність методу ЗВП саме при високих значеннях швидкості повітря X_1 .

Аналогічна картина спостерігається для перетину гіперповерхні $W_{\text{п}}(X_2, X_3)$, де чітко видно зменшення вологості вугілля при збільшенні температури повітря.

Найменш суттєво впливає на вологість зневодненого методом ЗВП вугілля його зольність. Хоча можна констатувати наявність тенденції до збільшення вологості $W_{\text{п}}$ зі зростанням зольності X_4 . Водночас при збільшенні кількісних значень факторів X_1 та X_2 вплив фактора X_4 нівелюється.

Висновки:

1. Аналіз одержаної регресійної моделі дозволяє ранжувати фактори за їх впливом на процес зневоднення вугілля зривом водної плівки ежектуванням у такому порядку: швидкість повітря на зрізі сопла ежектора, середній діаметр частинок зневоднюваного матеріалу, температура струменю повітря, зольність вугілля[11].

2. Одержана модель може бути застосована при розробці технології зневоднення дрібнодисперсного матеріалу ежектуванням, автоматичного управління і оптимізації процесу.

Список джерел

1. Руденко К.Г., Шемаханов М.М. Обезвоживание и пылеулавливание. - М.: Недра, 1981.- 350 с.
2. Чуянов К.Г., Шемаханов М.М. Обезвоживание, пылеулавливание и охрана окружающей среды.- М.: Недра. 1987.- 236 с.
3. Білецький В.С., Гаркушин Ю.К., Сергєєв П.В. Зневоднення дрібнодисперсного вугілля: застосування та інтенсифікація сучасних технологій//Українсько-польський форум гірників. Ялта, Крим, 13-19 вересня 2004. Матеріали форуму. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004, С, 603-614.
4. Кваша В.Б., Чижов В.В., Айнштейн В.Г. Срыв влаги с поверхности частиц в инжекторном слое //Инженерно-физический журнал. - 1976, - т.ХХХ, № 3. - С.411-415.
5. Филиппов В.А., Подлущкий Л.Д. Интенсификация обезвоживания мелких продуктов обогащения// Уголь .- 1981, № 12. - С. 47-48.

6. Филиппов В.А. Технология сушки и термоаэроклассификации углей. – Москва: Недра, - 1987. – 288 с.
7. Білецький В.С., Сергеев П.В., Папушин Ю.Л. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля. - Донецьк: Грань, 1996. - 264 с.
8. Білецький В.С. Розробка наукових основ і способів селективної масляної агрегації вугілля та вуглевміщуючих продуктів. - Дисертація на здобуття вченого ступеня докт. техн. наук. - Донецьк, 1994, 452 с.
9. Кхелуфи Абделькрим. Разработка технологии обогащения соленых углей. Автореф. на соиск.учен. степ. канд. техн. наук. - Днепропетровск, 1998, 19 с.
10. Скібенко В.М., Сергеев П.В., Білецький В.С. Аеромеханічне зневоднення дисперсних матеріалів//Збагачення корисних копалин. - № 10(51). – 2000. – С. 92-99.
11. Дослідження процесу зневоднення дрібнодисперсних матеріалів методом зриву водної плівки / В. С. Білецький, П. В.Сергеев, Ю. К. Гаркушин // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. пр. – 2005. – Вип. 6. – С. 155– 158.

6.2.5. Процес знесолення вугілля

Вичерпання запасів високоякісного вугілля обумовлює необхідність видобутку і переробки забалансної та низькоякісної паливної сировини. До такої, зокрема, належить так зване “солоне” вугілля, родовища якого відомі в Німеччині, Польщі, США, Україні, Казахстані, Росії, Чехії, Великобританії, Австралії та ін. країнах.

“Солоним” прийнято називати вугілля з аномально підвищеним вмістом лужних металів, в основному, натрію. Критерієм “солоності” більшість дослідників приймають вміст оксиду натрію (Na_2O) у вугіллі або його золі. В Україні до солоного зараховують вугілля зі вмістом $\text{Na}_2\text{O} \geq 2\%$ в золі або 0,3% на суху масу вугілля [1]. Розвідані запаси солоного вугілля в Україні досить істотні – вони складають понад 10 млрд. т. і зосереджені у Богданівському (Луганська область) та Новомосковському (Дніпропетровська область) родовищах [2].

Основні причини, які обумовлюють віднесення “солоного” вугілля до низькоякісної сировини є те, що легкоплавкі сполуки лужних металів, особливо натрію, викликають активне шлакування робочих поверхонь котлів при спалюванні вугілля. Крім того, хлор виступає як основний кородуючий агент, а також активно забруднює докільця [3].

Сьогодні в світі опрацьовано декілька альтернативних варіантів переробки солоного вугілля – газифікація, спалювання, комплексна переробка, причому найрадикальнішим способом його облагороджування є знесолення вугілля промивкою, наприклад, суміщеною з гідротранспортом.

Основним недоліком цієї технології є виникнення великої кількості тонких фракцій вугілля, які при своїй природній гідрофільності практично не піддаються ефективному зневодненню механічними засобами. Для уникнення цього недоліку в ДонНТУ опрацьована технологія знесолення вугілля типу “вугілля-агломерація”, яка передбачає його попереднє часткове обмаслення, знесолення промивкою у воді і подальшу агломерацію з використанням активних гідрофобних (обмаслених) ділянок на поверхні вугілля.

Ця робота є розвитком виконаних раніше досліджень [3] процесу знесолення обмасленого вугілля шляхом планування експерименту. Об'єктом досліджень служило вугілля пласта С₁₂ Новомосковського родовища Західного Донбасу. Вміст Na₂O в цьому вугіллі становив 0,9 %, зольність - 20 %. Вугілля перед знесолюванням заздалегідь обмаслювалося по запропонованій нами технології.

Функція відгуку – залишковий вміст Na₂O у вугіллі. Факторами, які варіюються на основі результатів досліджень [4, 5] були вибрані: тривалість промивки τ_0 , режим турбулізації водовугільної суміші (частота обертання імелера мішалки n_m), густина пульпи ρ_p (Т:Ж) та і витрата зв'язуючого Q_1 для обмаслення вугілля. Як обмаслювач використаний композиційний реагент на основі топочного мазуту марки М 100 і флотореагента ААР-1.

Вибрані чинники задовольняють вимогам керованості, однозначності, сумісності і незалежності, яким повинні задовольняти варіативні чинники при плануванні експеримента.

Експериментальна область факторного простору: діапазон варіювання тривалості промивки τ_0 прийнятий 2-10 хв, частота обертання імелера мішалки n_m - 1000-2000 хв⁻¹, ρ_p - 100-300 г/л, що відповідає рекомендаціям ІМР і ВНИИПИГТ [4-6]. Діапазон зміни чинника Q_1 вибраний рівним 0,1-0,4 мас.% на основі виконаних нами раніше експериментів. Фактори та границі їх варіювання показано в таблиці .

Таблиця 1.

Рівень факторів та інтервал варіювання	Параметр τ_0 , хв	Параметр n_m , хв ⁻¹	Параметр ρ_p , г/л	Параметр Q_1 , мас.%
Кодове позначення	X_1	X_2	X_3	X_4
Інтервал варіювання	4	500	100	0,15
Нижній рівень $X_i = -1$	2	1000	100	0,1
Основний рівень $X_i = 0$	6	1500	200	0,25
Верхній рівень $X_i = 1$	10	2000	300	0,4

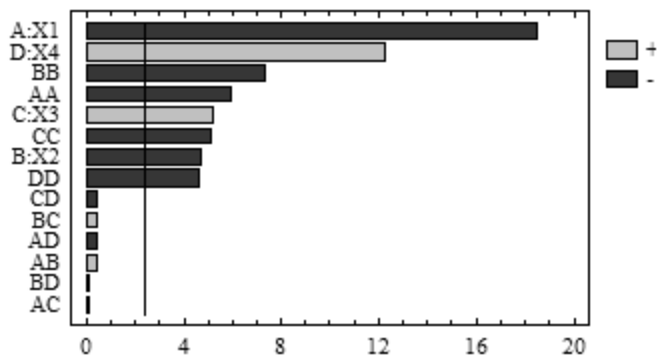


Рис.1 – Парето-карта коефіцієнтів моделі (вертикальна лінія відповідає 95% значущості)

Для планування прийнятний ротатабельний центрально-композиційний план експерименту, який забезпечує однакову точність моделі за всіма напрямками гіперпростору при мінімальній кількості експериментів. Обробка результатів експерименту виконана за комп'ютерною програмою "Statgraphics".

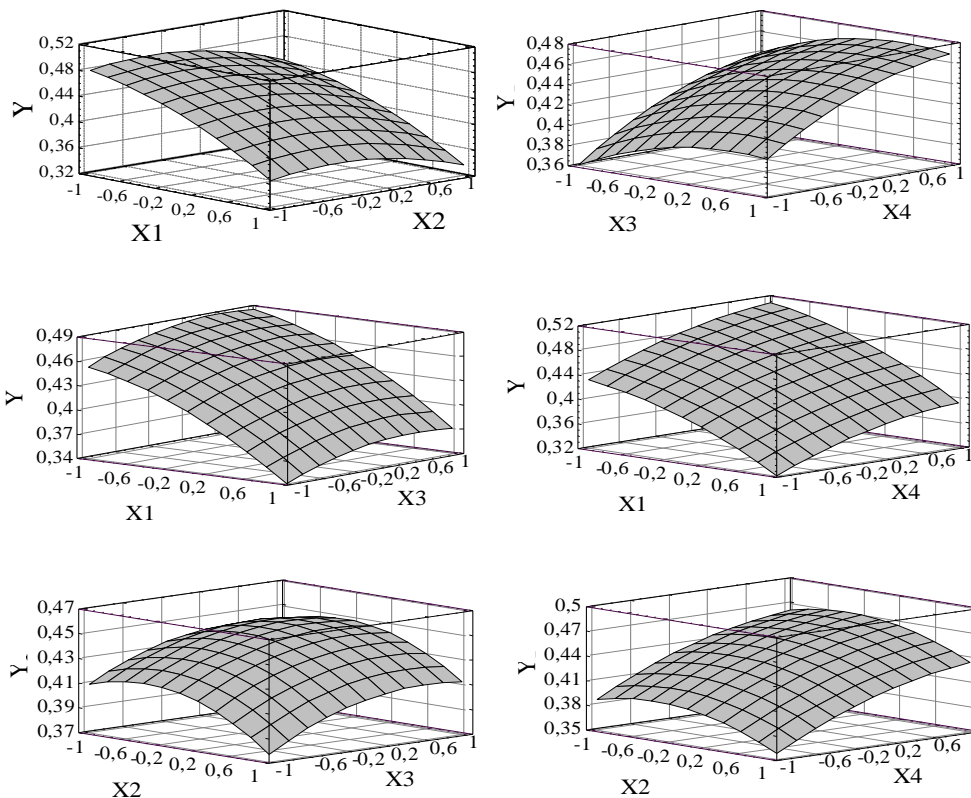


Рис.2 – Тривимірні перетини гіперповерхні $Y(X_n)$.

Як видно з паретто-графіка (див. рис. 1) статистично значимими є коефіцієнти при лінійних та квадратичних членах рівняння регресії. Тобто одержана модель є моделлю другого порядку. Коефіцієнти, які враховують ефекти парних взаємодій, статистично незначимі. Крім того, з рис. 1 видно, що найбільш значимими з досліджених параметрів є тривалість промивки X_1 , далі за значимістю фактори знаходяться в ряду: X_4 , X_3 , X_2 . З урахуванням цього одержаний поліном (рівняння регресії) має вигляд:

$$Y = 0,4443 - 0,0571 \cdot X_1 - 0,0146 \cdot X_2 + 0,0163 \cdot X_3 + 0,0379 \cdot X_4 - 0,01701 \cdot X_1^2 - 0,0208 \cdot X_2^2 - 0,0146 \cdot X_3^2 - 0,0133 \cdot X_4^2$$

Проаналізуємо одержаний вираз. На рис. 2 та 3 відповідно показано тривимірні перетини гіперповерхні $Y(X_n)$ та контурні криві цих поверхонь. Як бачимо, при збільшенні тривалості агітації гідросуміші (X_1) та інтенсивності перемішування (X_2) спостерігається зменшення залишкової концентрації Na_2O у вугіллі. Залежність цієї концентрації від факторів густина пульпи (X_3) та і витрат масляного реагенту-зв'язуючого (X_4) пряма – зі збільшенням цих параметрів збільшується і залишкова концентрація Na_2O у вугіллі. Це загалом відповідає описаному в [3] механізму процесу знесолення вугілля.

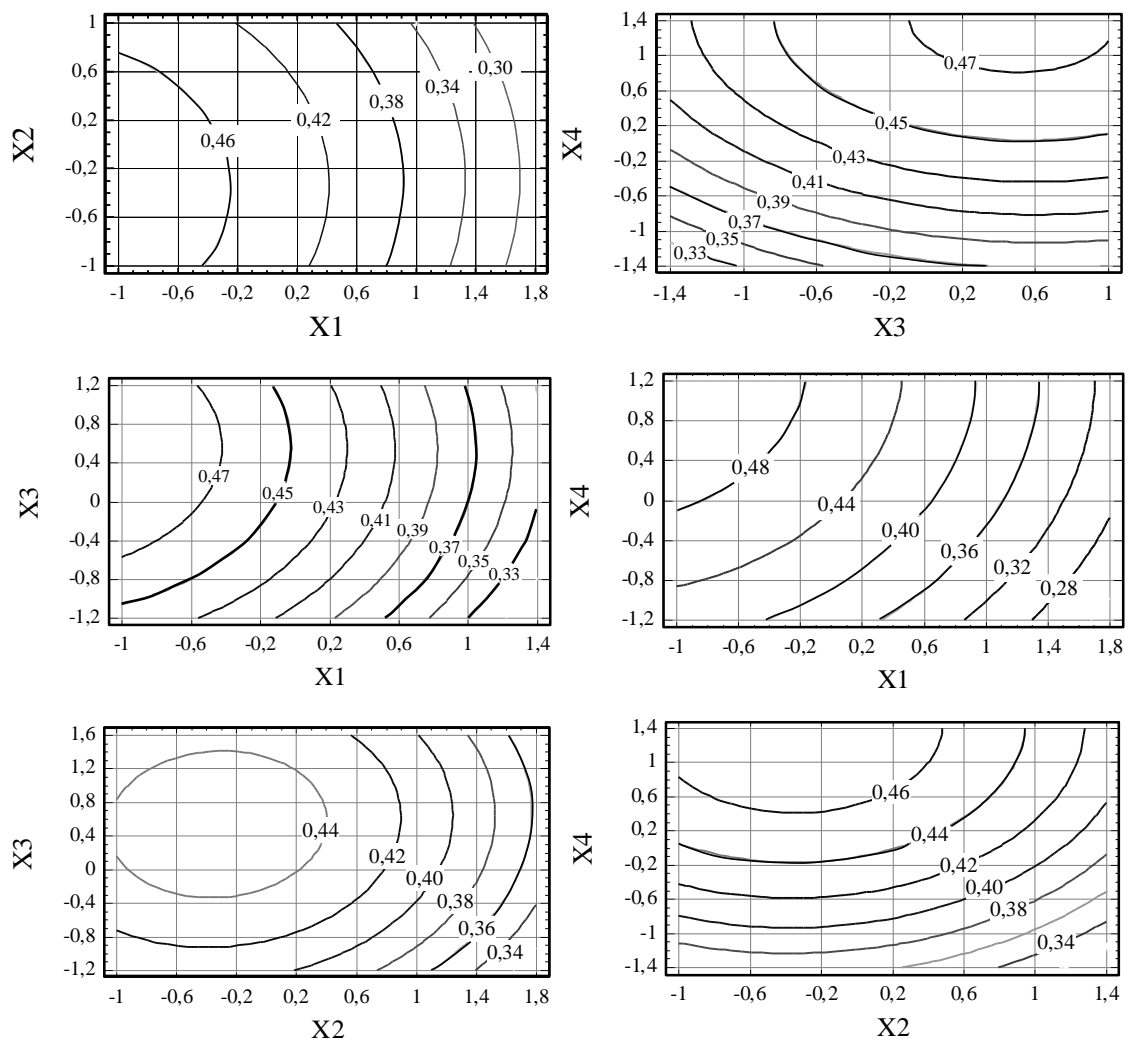


Рис.3 – Контурні криві

Одержана модель може бути використана при розробці промислових технологій облагороджування солоного вугілля Західного та Північно-Східного Донбасу[4].

Список джерел:

1. Никитин И.Н. Разработка флокуляционно-флотационного способа обогащения угольных шламов с применением латексного флокулянта. – Автореф. дис. на соиск.уч. степ.канд.техн.наук.-Люберцы: ИОТТ,1986.- 16 с.

2. Залевський В.І. Селективна флокуляція вугільних шламів синтетичними латексами.-Автореф.дисерт.наздоб.вчен.ступ.канд.техн.наук.- Дніпропетровськ: ДНГА, 2001.-20 с.

3. Небера В.П. Флокуляція мінеральних суспензій. – М.: Недра, 1983. – 288 с.

4. Математичне моделювання процесу знесолення вугілля / В.С. Білецький, П.В. Сергєєв, Абделькрім Кхелуфі // Збагачення корисних копалин. – 2002. – № 16. – С. 61–65.

6.2.6. Процес селективного подрібнення руд

Процес селективного подрібнення мінералів руд, який має суттєве значення в збагаченні корисних копалин, вивчався на прикладі руд Мазурівського родовища (дослідження проведені за участі К.Л. Шпильового, інж., ТОВ «Азов-Мінералтехніка», м.Маріуполь).

При подрібненні основного різновиду руд Мазурівського родовища – маріуполіту, - відбувається суттєвий приріст масової частки пентоксиду ніобію в тонких класах. Такий приріст можна використати для фракціонованого збагачення крупних та дрібних класів після подрібнення. Але таке фракціонування має передбачати високу ефективність технології вилучення пентоксиду ніобію з тонких класів. Виходячи з критерію кращого розкриття руд, що визначається ступенем розкриття та коефіцієнтом ефективності рудопідготовки по розкриттю руди, оптимальним для руд Мазурівського родовища є подрібнення у апараті відцентрово-ударного типу.

Для обґрунтування раціональних технологічних параметрів селективного подрібнення руди дослідження проводилися у відцентровому млині відцентрово-ударного типу ДЦ-0,36. Млин був оснащений динамічним відцентровим сепаратором та системою пилеочищення.

Вивчалася залежність вмісту класу -0,044 мм у подрібненому продукті від частоти обертання ротора (прискорювача) млина, навантаження на млин по вихідній руді та крупності вихідної руди.

Вплив основних факторів на вміст (С, %) класу -0,044 мм у подрібненому продукті вивчали за допомогою активного експерименту. Для планування експерименту застосовували ротатабельний центральний композиційний план другого порядку [1], який дозволяє одержати однакову точність поліноміальної моделі у всіх напрямках факторного простору у вигляді:

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i X_i + \sum_{1 \leq i, l \leq k} b_{il} X_i X_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} X_i^2,$$

де Y - функція відгуку; b_0 - вільний член; b_i , b_{il} , b_{ii} - коефіцієнти при змінних, коваріаціях та квадратичних членах; X_i - лінійні ефекти; $X_i X_l$ - парні взаємодії; X_i^2 - квадратичні члени; k – число незалежних змінних.

В основі методу лежить факторне планування типу ПФЕ 2^n , матриця якого доповнюється «зоряними точками» і нульовими (центральними) точками.

Ядро плану представлено напівреплікою 2^3 ($1=X_1X_2X_3$). Реалізовувалось 8 дослідів на основних рівнях та ще 6 дослідів в зіркових точках (величина зіркового плеча в цьому випадку дорівнює 1,682), і шість дослідів в центрі плану.

Вибрані фактори задовольняють вимогам керованості, незалежності, однозначності, яким повинні задовольняти варіативні чинники при плануванні експерименту.

Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження, наведені в табл. 1, вибрані на основі апріорної інформації [2] та за результатами попередніх експериментів. Матриця планування та результати її реалізації наведені у табл.2.

Таблиця 1. – Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження

Параметр	Позначення	Код	Одиниці виміру	Основні рівні				
				+1,682	+1	0	-1	-1,682
Колова швидкість ротора відцентрового млина	V	X_1	м/с	86,88	80	70	60	53,18
Крупність вихідної руди	d	X_2	мм	18,7	16	12	8	5,3
Витрати вихідної руди	Q	X_3	кг/год	2841	2500	2000	1500	1159

Обробку результатів експериментів та аналіз регресійних моделей здійснювали за допомогою модуля „Планування експерименту” статистичної програми Statgraphics 5.1 Plus [3].

Обробка результатів експерименту (табл. 2) дозволила отримати модель у вигляді рівняння регресії з врахуванням значущості коефіцієнтів:

$$C = 50,409 + 9,71388X_1 - 8,01511X_2 - 4,98155X_3 - 1,97968X_1^2 - 0,99625X_1X_2 - 0,89375X_1X_3 + 0,848756X_3^2 \quad (1)$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому (кодованому) вигляді.

Значущість коефіцієнтів моделі визначали за допомогою Р – рівня і наведено на стандартизованому Парето-графіку (рис. 1). Вертикальна лінія на рисунку відповідає 95 % статистичній значущості коефіцієнтів.

Таблиця 2. – Матриця планування і результати її реалізації

№	X1	X2	X3	C _{експ.}	C _{розн.}
1	-1,0	-1,0	-1,0	50,86	50,6663
2	1,0	-1,0	-1,0	72,85	73,8741
3	-1,0	1,0	-1,0	35,65	35,9311
4	1,0	1,0	-1,0	54,05	55,1538
5	-1,0	-1,0	1,0	41,85	41,7932
6	1,0	-1,0	1,0	60,66	61,4259
7	-1,0	1,0	1,0	28,43	28,453
8	1,0	1,0	1,0	42,86	44,1007
9	-1,68179	0,0	0,0	28,00	28,4729
10	1,68179	0,0	0,0	63,10	62,1463
11	0,0	-1,68179	0,0	63,30	62,8894
12	0,0	1,68179	0,0	37,00	35,9299
13	0,0	0,0	-1,68179	62,00	61,1876
14	0,0	0,0	1,68179	45,10	44,4317
15	0,0	0,0	0,0	50,50	50,409
16	0,0	0,0	0,0	50,50	50,409
17	0,0	0,0	0,0	50,00	50,409
18	0,0	0,0	0,0	50,80	50,409
19	0,0	0,0	0,0	50,10	50,409
20	0,0	0,0	0,0	50,30	50,409

Як видно з Парето-графіка, статистично значущими є коефіцієнти при лінійних членах рівняння регресії, коефіцієнти при X_1^2 та X_3^2 , та коефіцієнти при парних взаємодіях членів X_1 та X_2 , і X_1 та X_3 .

Значення коефіцієнтів регресії в рівнянні (1) визначають силу впливу відповідних факторів чи їх комбінацій на величину функції відгуку, а знак перед коефіцієнтом – характер цього впливу. Як бачимо, на вміст класу -0,044 мм у вихідному продукті найбільше впливають колова (окружна) швидкість ротора відцентрового млина та крупність вихідної руди. Але треба враховувати, що фактори X_1 та X_3 входять до рівняння у вигляді квадратичних членів, що призводить до зниження їх впливу на функцію відгуку при оцінці за величиною коефіцієнтів регресії.

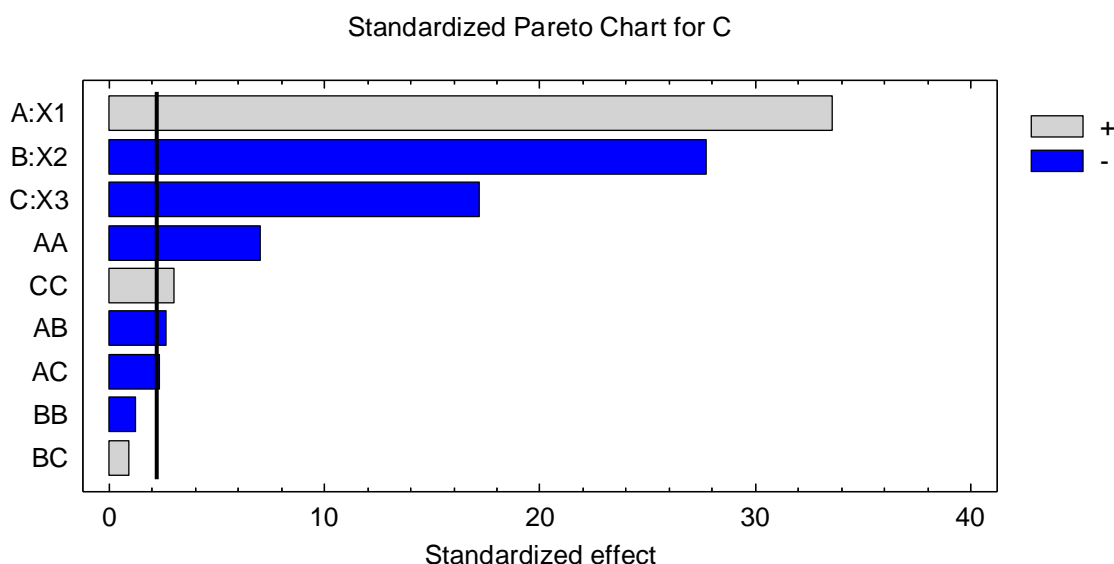


Рис. 1. – Значущість коефіцієнтів моделі (Парето-графік).

Адекватність одержаних регресійних моделей визначили за високим значеннями коефіцієнту детермінації R-квадрат: $R^2 = 99,5 \%$.

Середньоквадратичне відхилення (стандартна похибка) $\sigma = 1,07 \%$; похибка моделі складає $\pm 2,12 \%$.

Аналіз регресійної моделі здійснено за допомогою згаданої статистичної програми «Statgraphics 5.1 Plus».

На рис. 2 наведено тривимірні поверхні функції відгуку та їх перетини. Аналіз залежностей, наведених на рис. 2, показує, що зростання окружної швидкості прискорювача відцентрового млина призводить до помітного зростання вмісту класу -0,044 мм у вихідному продукті дроблення. Зростання вмісту класу дещо уповільнюється при зміні окружної швидкості прискорювача від 80 до 85-87 м/с. Швидкість 85-87 м/с можна вважати оптимальною для цієї моделі млина відцентрово-ударної дії.

Зростання крупності вихідної руди, що подається на подрібнення, приводить до зниження вмісту класу – 0,044 мм. Найвищий вміст цього класу спостерігається при подрібненні дрібної руди крупністю 6-4 мм.

Зростання навантаження на відцентровий млин по вихідній руді також призводить до зниження вмісту класу -0,044 мм у готовому продукті.

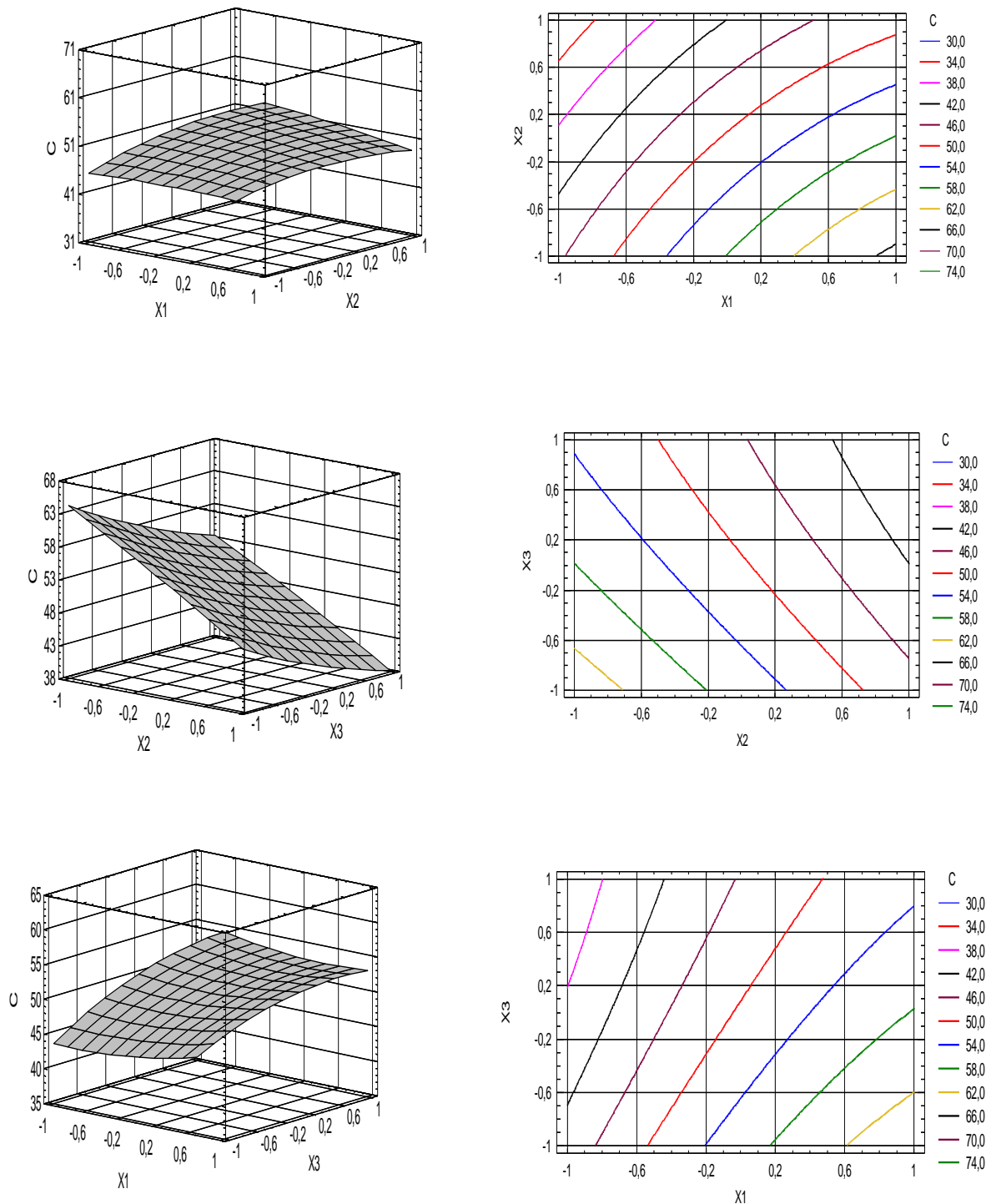


Рис. 2. – Тривимірні поверхні відгуку та їх перетини

Оптимальним за цим критерієм навантаженням треба прийняти 1100-1200 кг/год.

Таким чином, при ударно-відцентровому подрібненні, яке є оптимальним способом рудопідготовки рідкіснометалічної руди Мазурівського родовища з точки зору мінімізації втрат цінного компоненту – ніобію, з шлами, та розкриття мінералів, відбувається вибіркове руйнування як рудних, так і нерудних (альбіту, мікрокліну, нефеліну) мінералів.

Розкриття протікає в більш грубому класі – 0,08-0,071 мм. Це сприятиме зростанню показників гравітаційного збагачення. Вихід «технологічного» (найбільш розкритого) класу при цьому суттєво вищий.

Раціональними технологічними параметрами млина ударно-відцентрової дії є: окружна швидкість ротора – 85-87 м/с, продуктивність по вихідній руді – 1100-1200 кг/год, крупність вихідної руди – 4-6 мм.

Список джерел

1. Білецький В.С., Смирнов В.О. Моделювання процесів збагачення корисних копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. – 304 с.

2. Шпилевой Л. В., Назарова Т. С. Совершенствование технологии переработки полевошпатового сырья на основе избирательного измельчения минералов / Вісник НТУ «ХП» 2009. - № 25. – С. 115-122.

3. Статграфік: Руководство пользователя. - М., 2004. – 159 с.

6.2.7. Визначення раціонального складу композиційних реагентів-нафтопродуктів для інтенсивного зневоднення вугілля фільтруванням

Одним з методів підвищення ефективності механічного зневоднення дрібнозернистого вугілля є застосування реагентів-інтенсифікаторів: неорганічних електролітів, синтетичних і натуральних поверхнево-активних речовин (ПАР), полімерів, аполярних органічних рідин [1-3]. На нашу думку, застосуванню останніх в нашій країні не приділяється достатньої уваги. Промислові випробування показують, що аполярні реагенти нафтового походження забезпечують зниження вологості осаду на 5% при витраті реагенту до 500 г/т. У разі використання кам'яновугільних масел досягається зниження вологості осаду на 3% при витраті реагенту 1-1,5 кг/т. При цьому продуктивність вакуум-фільтрів зростає в середньому на 10% [1].

У зарубіжній практиці як гідрофобізуючу добавку до вугілля перед центрифугуванням застосовують водну емульсію бітуму або важкої нафти при співвідношенні реагент / вода = 30/70 - так звану «оріемульсію» (Orimulsion). Департамент енергетики США розробив спеціальний процес зневоднення Granuflo [4]. При крупності вугілля -0,6 мм; -0,2 мм; -0,1 мм; -0,075 мм і витраті емульсії 2-8% від маси вугілля зниження вологості кеку по відношенню до звичайного центрифугування відповідно склало 37%, 32%, 26%, 26% [5]. Наведені дані свідчать про помилковість висновків ряду вітчизняних досліджень щодо низької ефективності аполярних реагентів для інтенсифікації зневоднення тонких класів вугілля. У зв'язку з цим виникає необхідність в розробці теоретичних основ вітчизняної технології інтенсифікації зневоднення вугілля аполярними реагентами. Ефективність застосування аполярних реагентів багато в чому залежить від їх

групового хімічного складу. Однак дослідження цього параметра носять випадковий, несистемний характер і не можуть дати чітких теоретичних уявлень і практичних рекомендацій щодо раціонального складу цих реагентів.

Метою цієї роботи є визначення раціонального складу реагенту-інтенсифікатора процесу зневоднення вугілля різного ступеня зрілості (вуглефікації) вакуумним фільтруванням на основі продуктів нафтового походження. Ці реагенти широко застосовуються в практиці вуглезбагачення і на відміну від продуктів коксохімії в разі оптимального дозування істотно не впливають на організм людини і навколишнє середовище. Подібні дослідження найбільш доцільно проводити методами симплекс-решітчастого або симплекс-центроїдного планування для систем "склад-властивість". У даній роботі використаний симплекс-центроїдний план Шеффе, що забезпечує рівномірний розкид експериментальних точок по факторному простору [6].

Суть досліджень полягала у визначенні впливу складу композиційного реагенту на вологість вугілля W після його зневоднення вакуумним фільтруванням. Дослідження проводилися на шламах розміром - 0,5 мм 3 марок донецького вугілля:

- марки ДГ (ш. Південно-Донбаська № 1), $A_u^d = 8,2 \%$;
- марки К (ш. ім. Гайового), $A_u^d = 7,9 \%$;
- марки П (ш. "Комсомолець Донбасу"), $A_u^d = 8,5 \%$.

Рівняння регресії розроблялися окремо для кожної марки вугілля.

В якості вихідних компонентів композиційного реагенту застосовувалися найбільш широко використовувані у вуглезбагаченні реагенти-нафтопродукти: освітлювальний гас (X1), дизельне паливо (X2) і флотаційний реагент ААР-2 (X3). У всіх експериментах, що реалізують матрицю трикомпонентного симплекс-центроїдного плану, витримувалося умова

$$\sum_{i=1}^3 X_i = 1, \text{ де } X_i - \text{ частинна участь у реагенті } i\text{-го компонента.}$$

Дослідження проводилися на лабораторній фільтрувальній установці при наступних значеннях параметрів фільтрування: величина вакууму 70 кПа; густина вихідної суспензії 200 кг/м³; час фільтрації 1 хв. Вихідна суспензія перед фільтруванням оброблялася композиційним реагентом у високошвидкісній імпеллерній мешалці при $n = 2500 \text{ хв}^{-1}$. Витрата реагенту у всіх експериментах становила 500 г/т.

Розробка планів експериментів, оцінка значимості коефіцієнтів і адекватності регресійних моделей, а також аналіз отриманих рівнянь здійснювалися за допомогою модуля "Планування експерименту" програми Statgraphics 5.0 Plus.

Таблиця 1. – Результати експериментів та оцінки моделей

Мар-ка вугілля	Фактори (компоненти)			W, % експ.	W, % розрахунк.	Оцінки моделей	
	X ₁	X ₂	X ₃			Рівень значимості (p-рівень)	Коефіцієнт детермінації R ² , %
ДГ		0	0	19,1	19,08	0,0011	99,81
	0	1	0	19,0	18,98		
	0	0	1	21,9	21,94		
	0,5	0,5	0	18,7	18,66		
	0,5	0	0,5	20,9	29,91		
	0	0,5	0,5	21,5	21,52		
	0,333333	0,333333	0,333333	19,1	19,10		
	0,666667	0,166667	0,166667	18,9	18,98		
	0,166667	0,666667	0,166667	19,1	19,15		
	0,166667	0,166667	0,666667	21,0	20,89		
К	1	0	0	22,1	22,11	0,0010	99,90
	0	1	0	19,5	19,48		
	0	0	1	21,0	21,02		
	0,5	0,5	0	20,3	20,29		
	0,5	0	0,5	21,7	21,73		
	0	0,5	0,5	19,5	19,50		
	0,333333	0,333333	0,333333	19,8	19,82		
	0,666667	0,166667	0,166667	21,0	20,97		
	0,166667	0,666667	0,166667	19,3	19,35		
	0,166667	0,166667	0,666667	20,4	20,34		
П	1	0	0	21,0	21,01	0,0032	99,63
	0	1	0	20,6	20,61		
	0	0	1	19,5	19,47		
	0,5	0,5	0	20,5	20,53		
	0,5	0	0,5	20,9	20,89		
	0	0,5	0,5	19,2	19,18		
	0,333333	0,333333	0,333333	19,4	19,38		
	0,666667	0,166667	0,166667	20,4	20,37		
	0,166667	0,666667	0,166667	19,7	19,67		
	0,166667	0,166667	0,666667	19,3	19,41		

Попередня оцінка показала, що серед запропонованих в модулі регресійних моделей сумішей (лінійної, квадратної, кубічної та спеціальної кубічної) найбільш високими статистичними характеристиками володіє спеціальна кубічна модель у вигляді наступного полінома:

$$W = b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

У таблиці 1 наведені матриці планування, експериментальні і розрахункові (відповідно до моделі) значення цільової функції, а також основні статистичні оцінки рівнянь регресії. Як видно, всі регресійні моделі воло-

діють надійними статистичними характеристиками. Про це свідчать високий рівень значущості ($p < 0,05$) і великі (понад 99%) значення коефіцієнта детермінації R^2 для всіх без винятку моделей. Це дозволяє вважати ці моделі адекватними досліджуваному процесу.

Тому всі наступні розрахунки і оцінки здійснювалися на основі цієї

При обробці реагентами-інтенсифікаторами суспензії вугілля марки К ефективність індивідуальних реагентів зменшується в ряді "дизпаливо - реагент ААР - гас". Мінімальна вологість кеку ($W = 19,3\%$) досягається на трикомпонентній суміші наступного складу: $X_1 = 7\%$; $X_2 = 68\%$; $X_3 = 25\%$.

У разі обробки суспензії вугілля марки П посилюється зневоднююча дія реагенту ААР, який за своєю ефективністю починає перевершувати дизпаливо. У цьому випадку мінімальна вологість кеку ($W = 19,1\%$) досягається на суміші наступного складу: $X_1 = 8\%$; $X_2 = 38\%$; $X_3 = 54\%$.

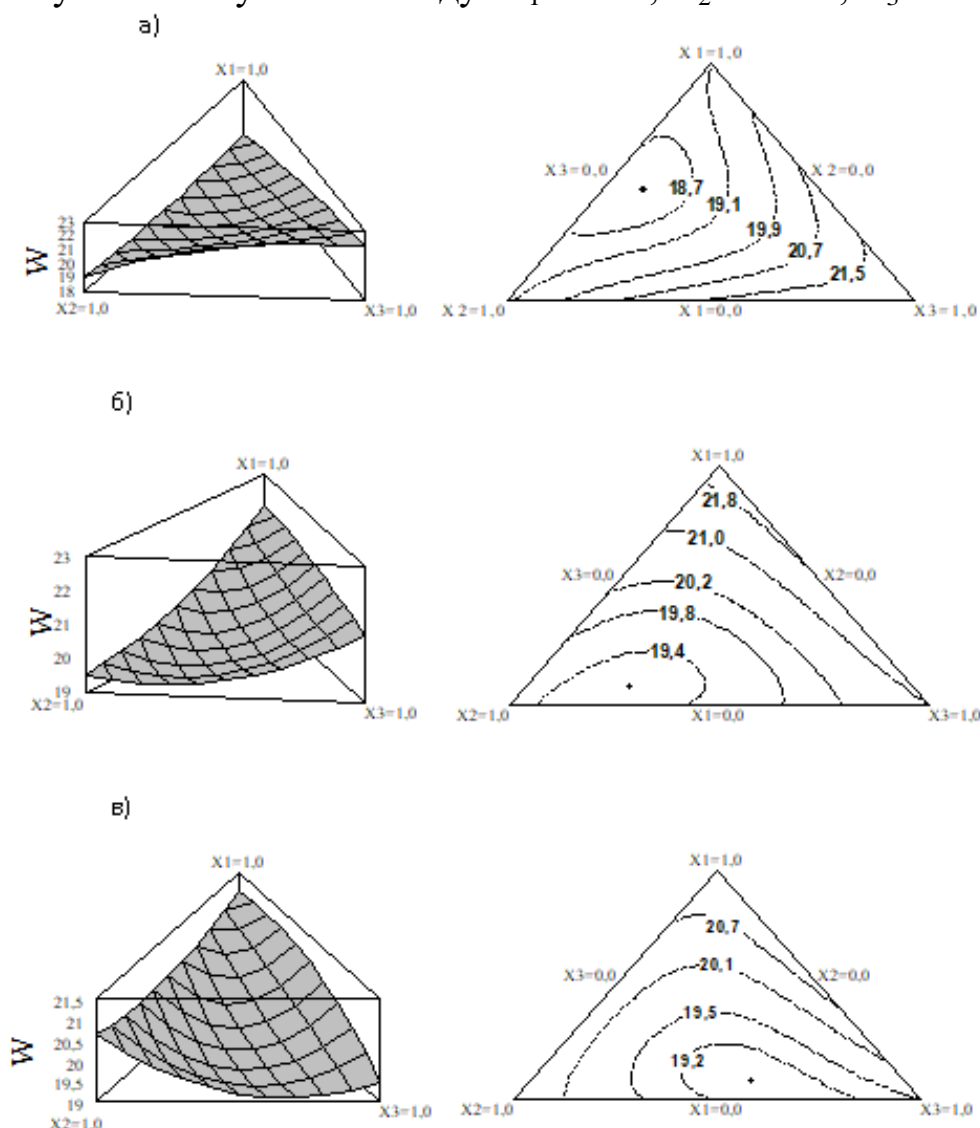


Рис. 1 – Тернарні графіки поверхонь відгуку та їх контурні криві: а – вугілля марки Д; б – вугілля марки К; в – вугілля марки П.

В цілому дослідження показують, що гас є найбільш ефективним реагентом-інтенсифікатором в разі переробки малометаморфізованого

вугілля. По мірі збільшення ступеня хімічної зрілості вугілля зростає інтенсифікуючий вплив на процес його зневоднення фільтруванням дизпалива і реагенту ААР. При цьому участь в композиційному реагенті гасу не повинна перевищувати 7-8%.

Аналіз групового хімічного складу і властивостей цих реагентів показує [7], що в тій же послідовності спостерігається закономірне збільшення густини, в'язкості, молекулярної маси інгредієнтів і вмісту ароматичних сполук. Отже, підвищення кожного з цих показників веде до збільшення зневоднюючого впливу реагенту.

ВИСНОВКИ

1. Інтенсифікуючий вплив на процес зневоднення вугілля фільтруванням реагентів-нафтопродуктів і їх композицій є функцією їх групового хімічного складу і властивостей. Він зростає в міру збільшення густини, в'язкості, молекулярної маси індивідуальних сполук, а також вмісту ароматичних сполук.

2. Для малометаморфізованого вугілля найбільш ефективними є композиції на основі гасу і дизпалива з невеликою часткою (до 10%) реагенту ААР.

3. У разі вугілля середньої і високої стадії метаморфізму найбільш ефективні композиції дизпалива і флотореагенту ААР з невеликою добавкою (7-8%) гасу.

Список джерел

1. Каминский В.С., Барбин М.Б., Долина Л.Ф. Интенсификация процессов обезвоживания. – М:Недра,-1982.- 224 с.

2. Чуянов К.Г., Шемаханов М.М. Обезвоживание, пылеулавливание и охрана окружающей среды. – М:Недра,-1987.- 226 с.

3. Майдуков Г.Л. Технология фильтрования продуктов обогащения углей.- М: Недра, 1975.- 144 с.

4. Новые данные об обогащении углей в США //Геол.изуч. и использ.недр.- 1999.- № 4-5.- С.32-33.

5. Wen W.W., Richard P. Killmeyer, Bruce R., Utz. Richard E. Husko. Simultaneous Fine Coal Dewatering and Reconstitution via the U.S. Department of Energy In Situ Cake Hardening Process // Proceeding of the 12th International Coal Preparation Congress, Cracow, Poland, May 23-27, 1994.

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

7. 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.

6.2.8. Процес масляної грануляції бурого вугілля

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 теплота 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 гідравлічному транспортуванні. 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.

Для розробки регресійної моделі процесу масляної грануляції бурого вугілля використовується центрально-композиційний ротатабельний 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-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: $Q_{зв} = 5-25$ мас.% від вугілля, $t_c = 15-55$ °С, $n = 600-1900$ 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	°C	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 центрально-композиційний ротатабельний 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 $SE = 0,143284$ коефіцієнти при членах рівняння регресії X_1 , X_4 , X_{12} , $X_1 \cdot X_4$, X_3 , $X_1 \cdot X_3$, X_{42} , X_{22} , 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

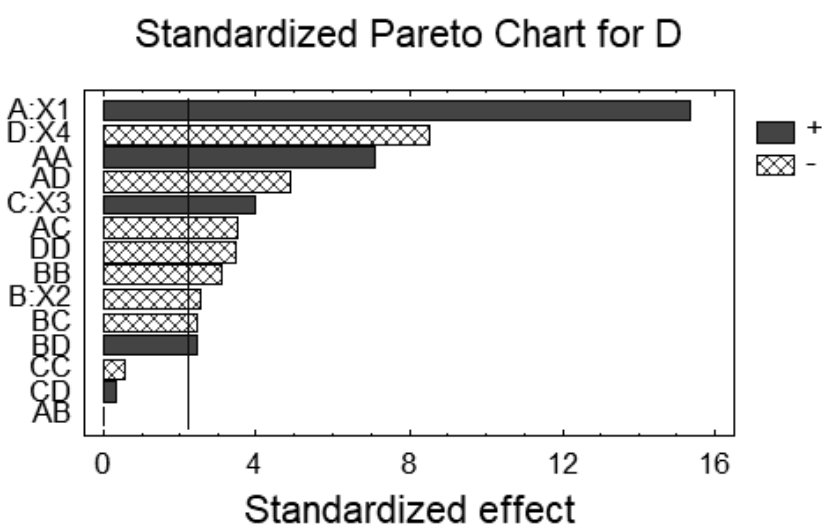


Рис. 1 – Значимість коефіцієнтів моделі (парето-графік)

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 рис. 1 подано стандартизований парето-графік, згідно

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

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.

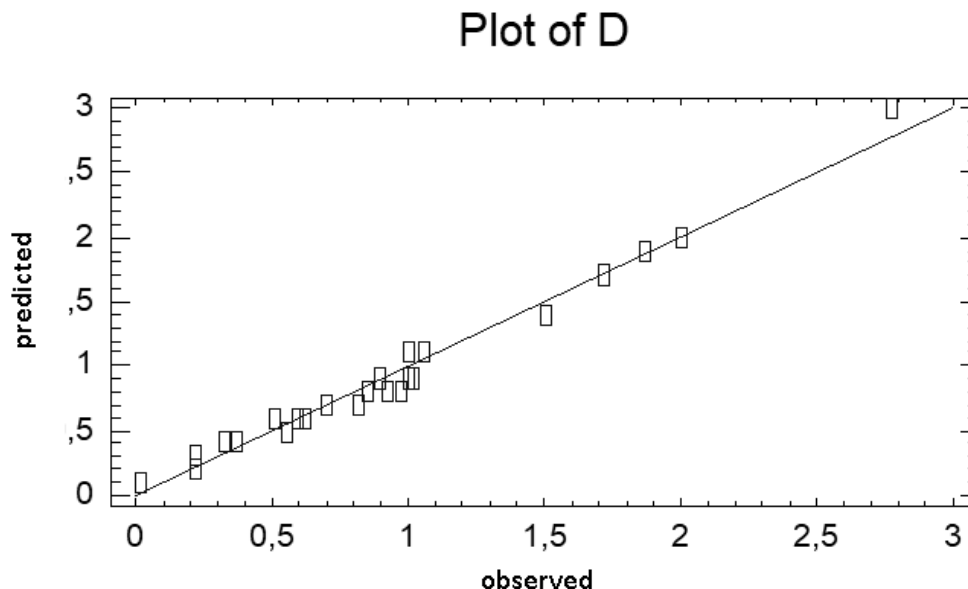


Рис. 2 – Графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції.

На рис. 3. подані часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції $D(X_1, X_2)$ і $D(X_3, X_4)$.

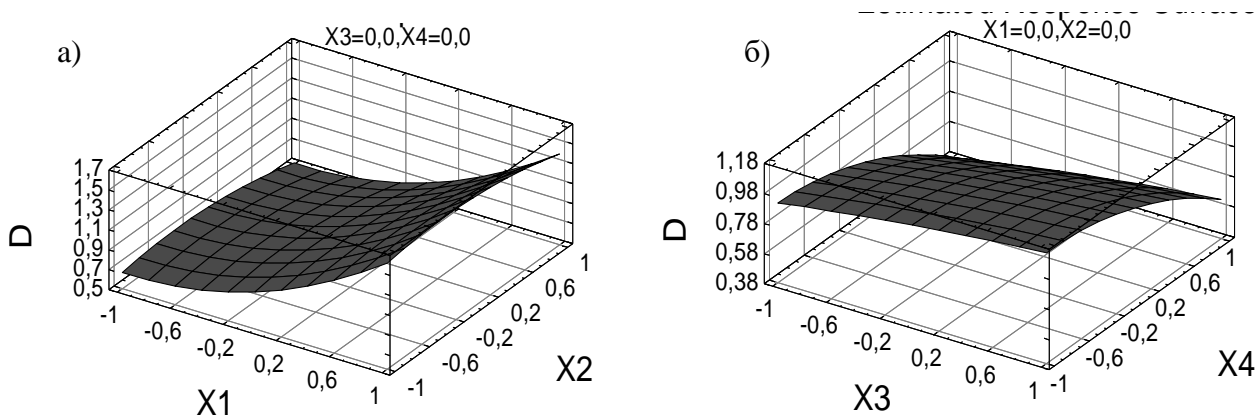


Рис. 3 – Часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції:
а) $D(X_1, X_2)$; б) $D(X_3, X_4)$

На рис. 4 наведені контурні криві цих гіперповерхонь. Простежується чітке збільшення діаметра D вуглемаляних агрегатів (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.

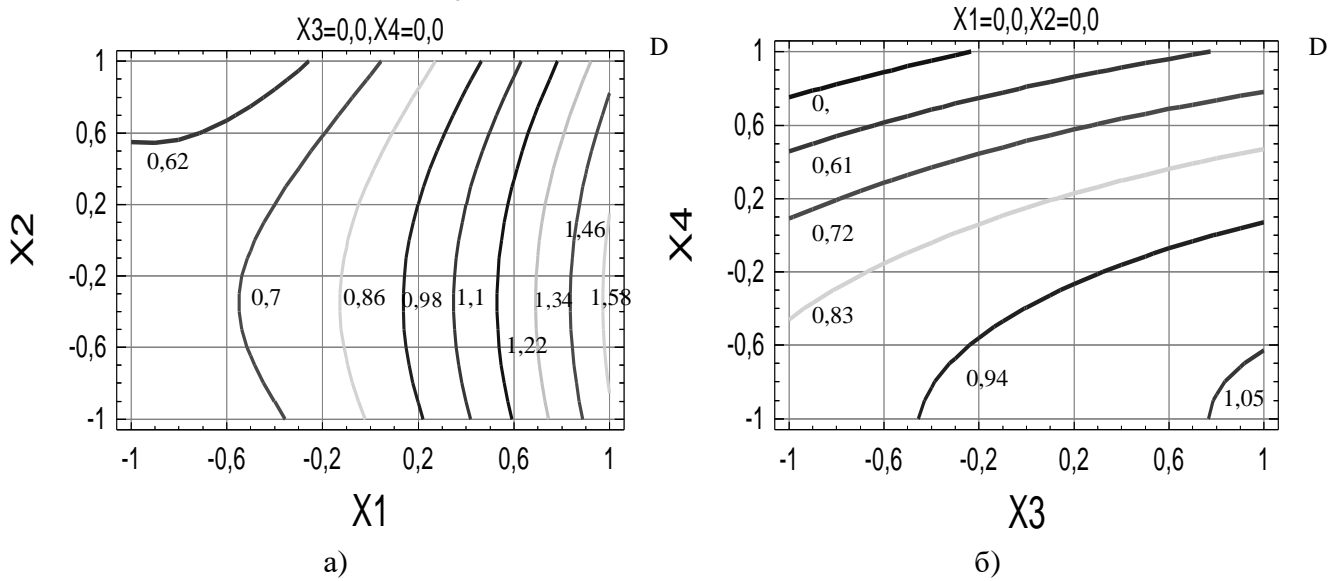


Рис. 4 – Контурні криві гіперповерхонь: а) $D(X_1, X_2)$; б) $D(X_3, X_4)$

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 [6].

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.

Список джерел

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. – Київ: Наук. Думка, 2002. – 172 с.
3. Білецький В.С., Воробйов А.П. Дослідження масляної агломерації бурого вугілля// Збагачення корисних копалин. - 2012. - №50(91). - С. 142-147.
4. Бродский Б.З., Бродский Л.И., Голикова Т.И. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей.- М.: Metallurgiya, 1982.- 752 с.
5. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента.- М.: Metallurgiya, 1981- 152 с.

6.2.9. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ ФЛОКУЛЯНТА НА ОСНОВІ МАСЛЯНИХ РЕАГЕНТІВ

6.2.9.1. Визначення оптимального складу флокулянта на основі нафтопродуктів

Як відомо, груповий хімічний склад більшості масляних реагентів являє собою суміш різноманітних вуглеводних речовин, співвідношення між якими може коливатися в дуже широких межах [1,2]. Тому визначення раціонального складу масляних флокулянтів є актуальним питанням розробки промислової технології селективної флокуляції вугілля маслами.

Подібні дослідження найбільш доцільно проводити методами симплекс-решітчатого або симплекс-центроїдного планування для систем “склад-властивість”. У даній роботі був використаний симплекс-центроїдний план Шеффе, що забезпечує рівномірний розкид експериментальних точок у багатомірному просторі [3].

Суть досліджень полягала у визначенні впливу складу композиційного флокулянта на показник вилучення вугільних фракцій у концентрат, ε . Цей параметр виступав як цільова функція і визначався з виразу:

$$\varepsilon = \frac{A_o^d - A_u^d}{A_o^d - A_k^d} \cdot \frac{100 - A_k^d}{100 - A_u^d} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де A_o^d , A_k^d і A_u^d - зольності відходів, концентрату і вихідного вугілля відповідно.

Дослідження проводилися на шламах крупністю – 0,1 мм таких чотирьох марок донецького вугілля:

- марки Д (ш. Трудівська), довгополум'яне, $A_u^d = 34,2 \%$;
- марки Г (ш. Куйбишевська) , газове, $A_u^d = 35,7 \%$;
- марки К (ш. ім. Леніна), коксівне, $A_u^d = 33,7 \%$;
- марки П (ш. “Комсомолец Донбасу”), пісне, $A_u^d = 35,1 \%$.

Рівняння регресії розроблялися окремо для кожної марки вугілля.

В першій серії експериментів як вихідні компоненти композиційного флокулянта застосовувалися реагенти-нафтопродукти, що найбільш широко використовуються у вуглезбагаченні: освітлювальний гас (X_1), дизельне паливо (X_2) і флотаційний реагент ААР-2 (X_3). У всіх експериментах, що реалізують матрицю трикомпонентного симплекс-центроїдного плану, витримувалась умова $\sum_{i=1}^3 X_i = 1$, де X_i – пайова участь у флокулянті i -го компонента. Витрати флокулянта у всіх дослідах складали 1% від маси вихідного шламу.

Таблиця 1.

Результати експериментів та оцінки моделей

Марка вугілля	Фактори (компоненти)			$\varepsilon, \%$ експ.	$\varepsilon, \%$ розрах.	Оцінки моделей	
	X_1	X_2	X_3			Рівень значущості (р-рівень)	Коефіцієнт детермінації $R^2 \%$
Д	1	0	0	89	89,34	0,0239	92,31
	0	1	0	85	84,80		
	0	0	1	83	82,52		
	0,5	0,5	0	83	83,09		
	0,5	0	0,5	82	81,81		
	0	0,5	0,5	80	79,27		
	0,333	0,333	0,333	81	80,00		
	0,6667	0,1667	0,1667	84	83,36		
	0,1667	0,6667	0,1667	80	80,99		
	0,1667	0,1667	0,6667	78	78,81		
Г	1	0	0	74	74,06	0,0090	98,57
	0	1	0	90	90,24		
	0	0	1	87	87,14		
	0,5	0,5	0	78	78,04		
	0,5	0	0,5	79	78,95		
	0	0,5	0,5	82	82,13		
	0,333	0,333	0,333	77	78,33		
	0,6667	0,1667	0,1667	76	75,54		
	0,1667	0,6667	0,1667	83	82,10		
	0,1667	0,1667	0,6667	82	81,37		
К	1	0	0	74	73,59	0,0015	95,76
	0	1	0	82	82,41		
	0	0	1	87	87,13		
	0,5	0,5	0	78	77,98		
	0,5	0	0,5	79	78,71		
	0	0,5	0,5	89	89,52		
	0,333	0,333	0,333	82	82,42		
	0,6667	0,1667	0,1667	76	77,10		
	0,1667	0,6667	0,1667	85	83,65		
	0,1667	0,1667	0,6667	86	85,47		
П	1	0	0	72	72,68	0,0071	90,75
	0	1	0	77	77,32		
	0	0	1	90	89,86		
	0,5	0,5	0	77	76,52		
	0,5	0	0,5	87	86,06		
	0	0,5	0,5	89	87,70		
	0,333	0,333	0,333	82	84,58		
	0,6667	0,1667	0,1667	81	79,58		
	0,1667	0,6667	0,1667	82	81,67		
	0,1667	0,1667	0,6667	88	89,03		

Дослідження проводилися на лабораторній установці, що включає високошвидкісний імпелерний змішувач з камерою обсягом 750 см³ і лабораторну флотомашину ФЛ-1 з таким же обсягом камери. Вихідна водовугільна суспензія густиною 150 кг/м³ оброблялася в змішувачі флокулянтном, склад якого відповідав необхідному згідно плану експерименту. Після турбулентного перемішування протягом 60 с при частоті $n = 2500 \text{ хв}^{-1}$ зфлокульований продукт піддавався наступному флотаційному поділу за рахунок аероефекту в камері флотомашини без подачі додаткових реагентів. Продукти поділу висушувалися і піддавалися аналізу на зольність. За даними аналізів згідно рівняння (1) розраховувалися значення цільової функції – вилучення ε .

Розробка планів експериментів, оцінка значимості коефіцієнтів і адекватності регресійних моделей у цілому, а також аналіз отриманих рівнянь здійснювалися за допомогою модуля “Планування експерименту” програми Statgraphics Plus.

Попередня оцінка показала, що серед пропонованих у модулі регресійних моделей сумішей (лінійною, квадратичною, кубічною і спеціальною кубічною) найбільш високими статистичними характеристиками володіє модель другого порядку, що описується поліномом:

$$\varepsilon_p = \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i \neq j}^3 b_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

Тому всі наступні розрахунки й оцінки здійснювалися на основі цієї моделі. У таблиці приведені матриці планування, експериментальні і розрахункові (відповідно до моделі) значення цільової функції, а також основні статистичні оцінки рівнянь регресії. Як видно, усі регресійні моделі статистично значимі. Про це свідчать високий рівень значимості ($p < 0,05$) і великі (понад 90 %) значення коефіцієнта детермінації R-квадрат для усіх без винятку моделей. Це дозволяє вважати ці моделі адекватними досліджуваному процесові.

Отримані остаточні рівняння регресії для різних марок вугілля мають такий вигляд:

$$\text{Д: } \varepsilon = 89,34X_1 + 84,80X_2 + 82,53X_3 - 15,94X_1 \cdot X_2 - 16,48X_1 \cdot X_3 - 17,58X_2 \cdot X_3$$

$$\text{Г: } \varepsilon = 74,06X_1 + 90,24X_2 + 87,15X_3 - 16,44X_1 \cdot X_2 - 6,63X_1 \cdot X_3 - 26,26X_2 \cdot X_3$$

$$\text{К: } \varepsilon = 73,59X_1 + 82,41X_2 + 87,14X_3 - 0,07X_1 \cdot X_2 - 6,62X_1 \cdot X_3 + 19,02X_2 \cdot X_3$$

$$\text{П: } \varepsilon = 72,68X_1 + 77,32X_2 + 89,86X_3 + 6,07X_1 \cdot X_2 + 19,16X_1 \cdot X_3 + 16,43X_2 \cdot X_3$$

Для аналізу отриманих моделей були використані графічні можливості програми Statgraphics. На рис. 1 представлені тернарні тривимірні графіки поверхонь відгуку, а на рис.2 – контурні криві (карти ліній рівня) цих поверхонь. На основі представлених графіків виконаємо оцінку впливу складу композиційних реагентів на їх флокулюючу здатність.

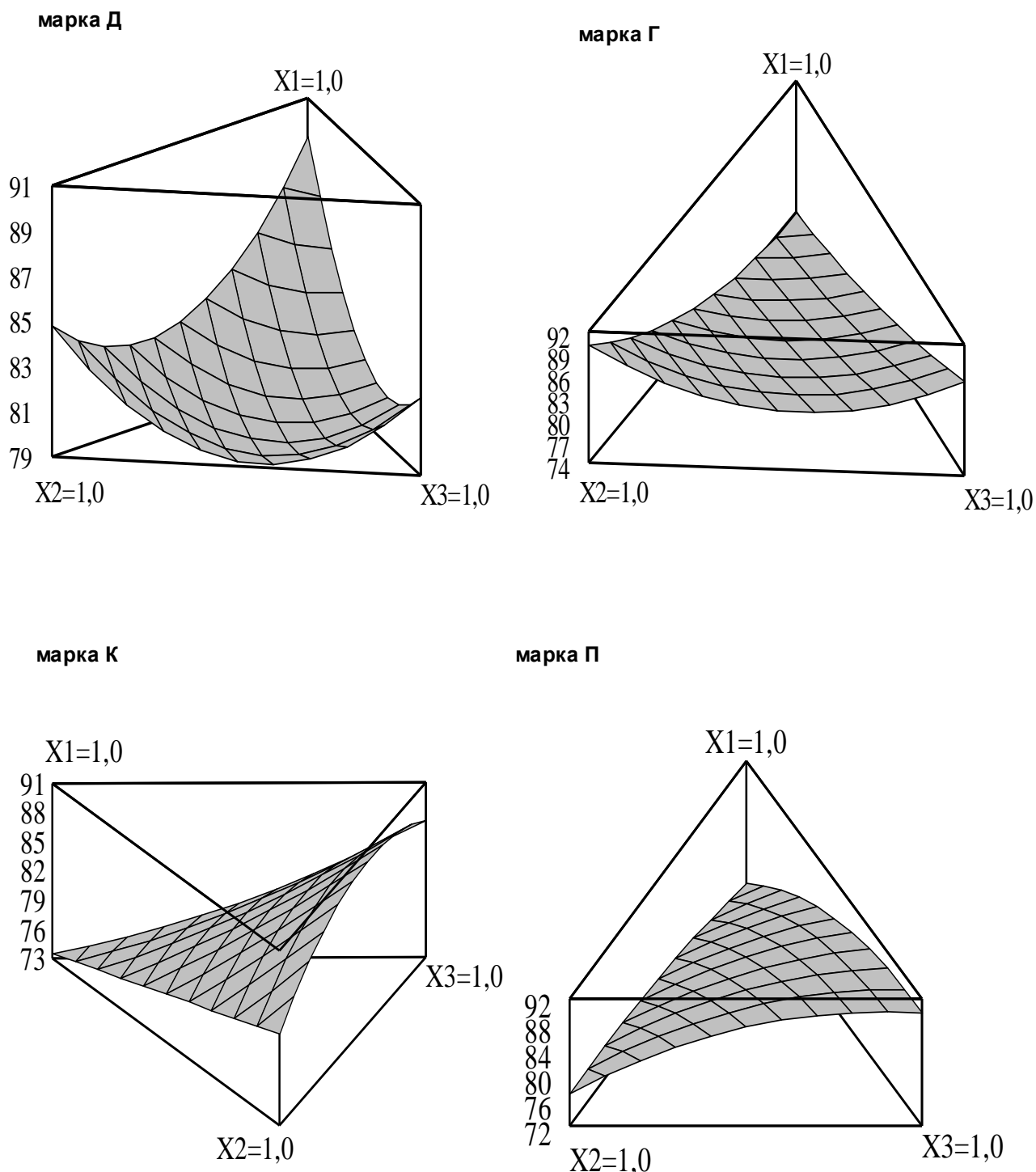


Рис. 1 – Тернарні графіки поверхонь відгуку

У випадку флокуляції вугілля марки Д однокомпонентними (індивідуальними) реагентами їх флокулююча здатність знижується в ряді “гас – дизпаливо – реагент ААР”.

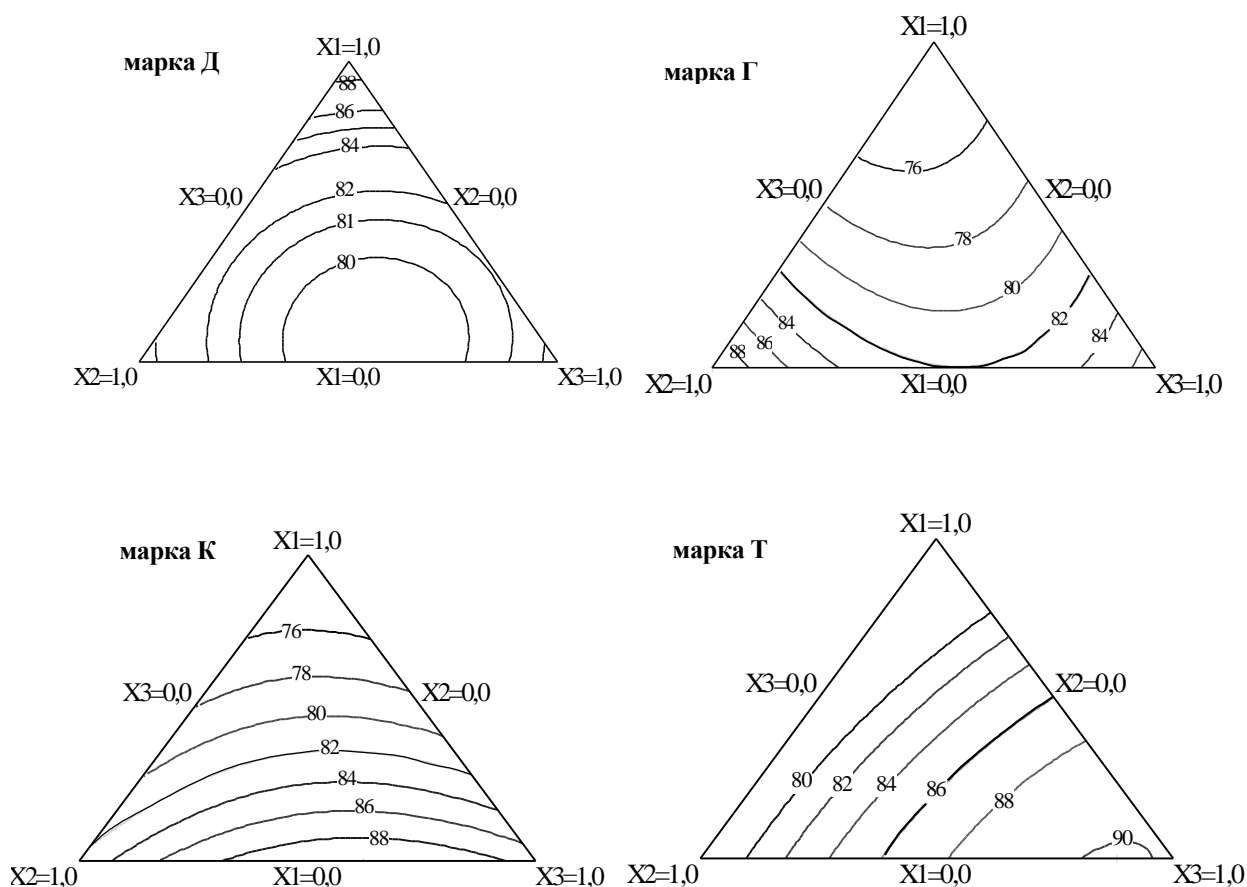


Рис.2 Контурні криві поверхонь відгуку

Розрахунки по визначенню екстремуму-максимуму рівняння регресії показують, що максимальне значення вилучення досягається при $X_1 = 1,0$, тобто при використанні у якості флокулянта тільки гасу. Також можливе застосування двокомпонентного флокулянта на базі гасу з невеликою добавкою (не більш 10-12 %) дизельного палива. Трикомпонентні суміші у випадку флокуляції вугілля марки Д малоефективні.

При обробці вугілля марки Г флокулююча здатність індивідуальних реагентів зменшується в ряді “дизпаливо – реагент ААР – гас”. Цільова функція досягає максимальних значень при $X_2 = 1,0$. Двокомпонентні суміші ефективні тільки на основі дизпалива при пайовій участі реагенту ААР у межах 0 – 10 %. Як і в попередньому випадку, флокуляція вугілля марки Г трикомпонентними сумішами малоефективна.

При селективній флокуляції вугілля марок К і П ситуація істотно змінюється. Найбільш ефективними стають двокомпонентні суміші на основі дизпалива і реагенту ААР. У випадку вугілля марки К оптимальним є співвідношення: $X_2 = 38 \%$; $X_3 = 62 \%$. Для вугілля марки П маємо: $X_2 =$

12 %; $X_3 = 88$ %. Трикомпонентні суміші можливі на базі дизпалива і реагенту ААР з невеликою добавкою (до 10%) гасу.

У цілому аналіз показує, що гас є найбільш ефективним флокулянт у випадку переробки вугілля малого ступеня вуглефікації. По мірі збільшення ступеня хімічної зрілості вугілля найбільш ефективним стає спочатку дизпаливо, а потім двокомпонентні суміші “дизпаливо - реагент ААР”, з поступовим ростом частки реагенту ААР при переході від вугілля середнього до вугілля високого ступеня зрілості.

Звідси випливає, що флокулююча здатність розглянутих нафтопродуктів у міру збільшення ступеня хімічної зрілості вугілля зростає в ряді “гас - дизпаливо - реагент ААР”. Аналіз групового хімічного складу і властивостей цих реагентів показує [1], що в тій же послідовності спостерігається закономірне збільшення густини, в'язкості, молекулярної маси інгредієнтів і вмісту ароматичних сполук. Отже, підвищення кожного з цих показників веде до збільшення флокулюючої здатності реагентів.

Таким чином, флокулююча здатність реагентів-нафтопродуктів та їх композицій є функцією їх групового хімічного складу і властивостей. Вона зростає в міру збільшення густини, в'язкості, молекулярної маси індивідуальних сполук, а також вмісту ароматичних сполук.

Для вугілля низької стадії метаморфізму найбільш ефективними є індивідуальні флокулянти на основі гасу і дизпалива, а також їх композиції. У випадку вугілля середньої і високої стадії метаморфізму найбільш ефективні композиції дизпалива і флотаційного реагенту ААР.

6.2.9.2. Визначення оптимального складу флокулянта на основі продуктів коксохімії

Розглянемо тепер визначення оптимального складу масляних реагентів на основі продуктів переробки кам'яновугільної смоли коксохімічного виробництва. Як вихідні компоненти композиційного флокулянта в наших експериментах застосовувалися (табл.): вбирне масло (X_1), друга антраценова фракція (X_2) і пековий дистилят (X_3).

Дослідження виконувалися на тому ж вугіллі, на тій самій установці і при тих же режимних параметрах флокуляції, що і в попередній серії експериментів. Для розробки і аналізу рівнянь регресії також застосовувалася програма Statgraphics, в якості цільової функції – вилучення вугілля в концентрат ε (%).

Встановлено, що у випадку композиційних флокулянтів на основі продуктів коксохімії найбільш високими статистичними характеристиками володіє спеціальна кубічна модель у вигляді наступного полінома:

$$\varepsilon = b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

Всі наступні розрахунки й оцінки здійснювалися на основі цієї моделі.

Таблиця 2.

Результати експериментів та оцінки моделей

Марка вугілля	Фактори (компоненти)			ε , % експ.	ε , % розн.	Оцінки моделей	
	X ₁	X ₂	X ₃			Рівень значущості (p-рівень)	Коефіцієнт детермінації R ² , %
Д	1	0	0	91,3	91,12	0,0042	99,02
	0	1	0	88,0	88,20		
	0	0	1	81,0	80,95		
	0,5	0,5	0	90,9	90,92		
	0,5	0	0,5	88,0	87,74		
	0	0,5	0,5	87,8	87,95		
	0,333	0,3333	0,3333	89,5	89,41		
	0,6667	0,1667	0,1667	90,0	90,56		
	0,1667	0,6667	0,1667	90,2	89,64		
	0,1667	0,1667	0,6667	86,0	86,18		
Г	1	0	0	88,5	88,48	0,0005	99,77
	0	1	0	88,0	88,10		
	0	0	1	81,0	80,94		
	0,5	0,5	0	91,2	91,28		
	0,5	0	0,5	88,0	87,92		
	0	0,5	0,5	87,8	87,84		
	0,3333	0,3333	0,3333	89,5	89,56		
	0,6667	0,1667	0,1667	90,0	90,03		
	0,1667	0,6667	0,1667	90,2	89,88		
	0,1667	0,1667	0,6667	86,2	86,37		
К	1	0	0	88,3	88,42	0,0016	99,48
	0	1	0	90,8	90,84		
	0	0	1	81,0	80,84		
	0,5	0,5	0	90,6	90,57		
	0,5	0	0,5	87,0	86,95		
	0	0,5	0,5	87,8	87,67		
	0,3333	0,3333	0,3333	90,6	90,57		
	0,6667	0,1667	0,1667	90,4	90,06		
	0,1667	0,6667	0,1667	91,2	91,10		
	0,1667	0,1667	0,6667	86,0	86,50		
П	1	0	0	88,3	88,35	0,0001	99,94
	0	1	0	90,8	90,77		
	0	0	1	81,0	80,97		
	0,5	0,5	0	90,6	90,62		
	0,5	0	0,5	89,0	89,02		
	0	0,5	0,5	89,8	89,74		
	0,3333	0,3333	0,3333	90,6	90,59		
	0,6667	0,1667	0,1667	90,4	90,25		
	0,1667	0,6667	0,1667	91,2	91,29		
	0,1667	0,1667	0,6667	87,4	87,49		

У таблиці 2 наведені матриці планування, експериментальні і розрахункові (відповідно до моделі) значення цільової функції, а також основні статистичні оцінки рівнянь регресії. Як видно, усі регресійні моделі воло-

діють надійними статистичними характеристиками. Про це свідчать високий рівень значимості ($p < 0,05$) і великі (більш 90 %) значення коефіцієнта детермінації R-квадрат для усіх без винятку моделей. Це дозволяє вважати ці моделі адекватними досліджуваному процесові.

Отримані рівняння регресії для різних марок вугілля мають такий вигляд:

$$\text{марка Д: } \varepsilon = 91,1235 \cdot X_1 + 88,1962 \cdot X_2 + 80,9508 \cdot X_3 + 5,03952 \cdot X_1 \cdot X_2 + \\ + 6,94861 \cdot X_1 \cdot X_3 + 13,4941 \cdot X_2 \cdot X_3 - 4,76443 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$\text{марка Г: } \varepsilon = 88,4826 \cdot X_1 + 88,1008 \cdot X_2 + 80,9372 \cdot X_3 + 11,9668 \cdot X_1 \cdot X_2 + \\ + 12,8395 \cdot X_1 \cdot X_3 + 13,2759 \cdot X_2 \cdot X_3 - 13,7644 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$\text{марка К: } \varepsilon = 88,4178 \cdot X_1 + 90,836 \cdot X_2 + 80,836 \cdot X_3 + 4,50744 \cdot X_1 \cdot X_2 + \\ + 9,30744 \cdot X_1 \cdot X_3 + 7,3438 \cdot X_2 \cdot X_3 + 41,0827 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$\text{марка П: } \varepsilon = 88,3531 \cdot X_1 + 90,7712 \cdot X_2 + 80,9712 \cdot X_3 + 4,24861 \cdot X_1 \cdot X_2 + \\ + 17,4486 \cdot X_1 \cdot X_3 + 15,485 \cdot X_2 \cdot X_3 - 6,56441 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

На рис. 3 представлені тернарні тривимірні графіки поверхонь відгуку, а на рис. 4 – контурні криві (карти ліній рівня) цих поверхонь. На основі представлених графіків виконаємо оцінку впливу складу композиційних реагентів на їх флокулюючу здатність.

Як видно з рисунків та рівняння регресії, у випадку флокуляції вугілля марки Д однокомпонентними флокулянтами їх ефективність зростає в ряду “пековий дистилят (X_3) – друга антраценова фракція (X_2) – вбирне масло (X_1)”. Найбільш високою ефективністю володіють двокомпонентні суміші на основі вбирного масла і другої антраценової фракції. Оптимальний склад двокомпонентного флокулянта має таке співвідношення складових: $X_1 = 80 \%$, $X_2 = 20 \%$.

У випадку вугілля марки Г відзначені вище особливості в основному зберігаються. Але слід відмітити значне зростання частки другої антраценової фракції (X_2) в двокомпонентному флокулянті. В цьому разі оптимальний склад флокулянта такий: $X_1 = 52 \%$, $X_2 = 48 \%$.

При селективній флокуляції вугілля марки К однокомпонентними флокулянтами їх ефективність зростає в ряду “пековий дистилят (X_3) – вбирне масло (X_1) – друга антраценова фракція (X_2) –”. Таким чином, серед інших індивідуальних реагентів найбільш високу флокулюючу здатність на вугіллі К має друга антраценова фракція. В разі композиційних флокулянтів найбільш ефективна трикомпозиційна суміш такого складу: $X_1 = 33 \%$; $X_2 = 54 \%$; $X_3 = 13 \%$.

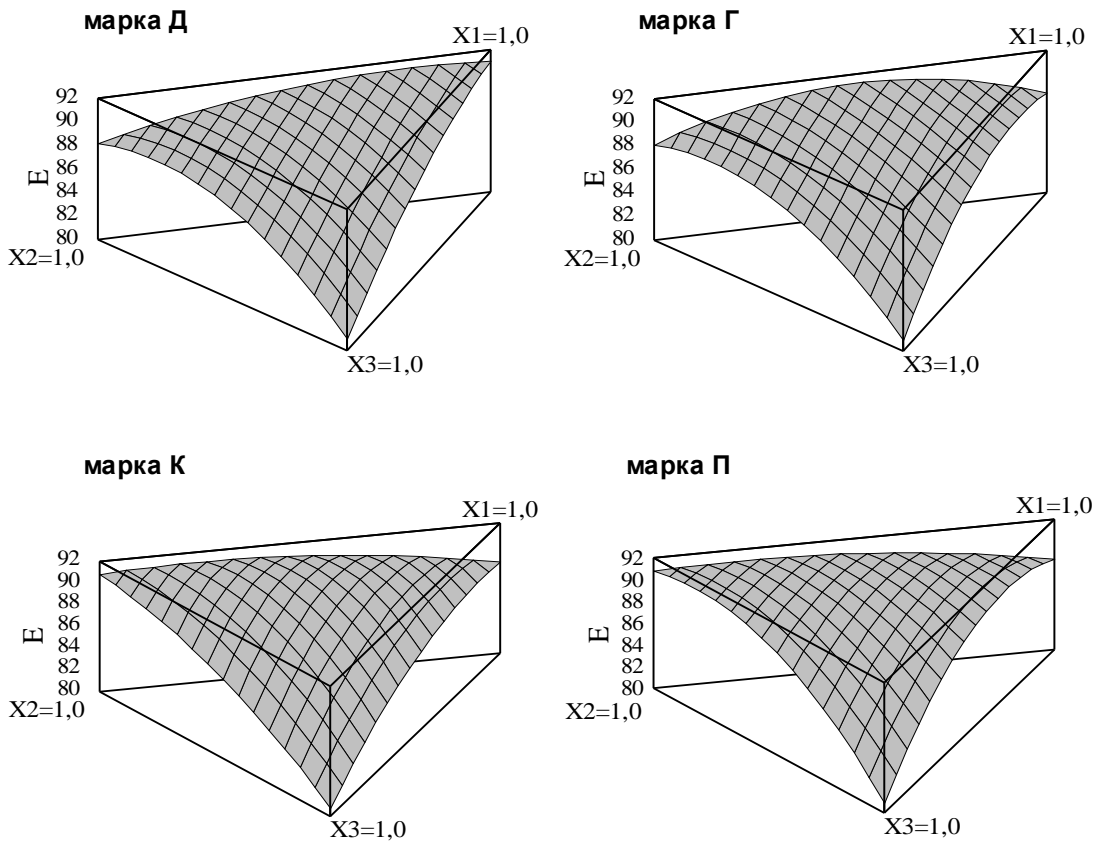


Рис. 3 – Тернарні графіки поверхонь відгуку

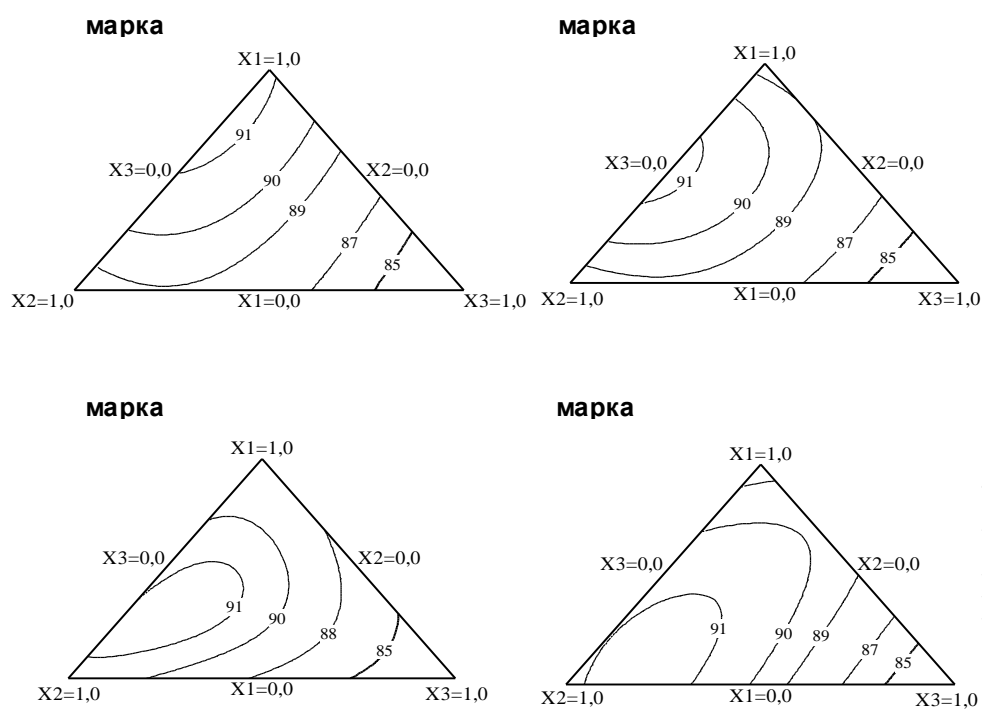


Рис. 4 – Контурні криві поверхонь відгуку

Флокуляція індивідуальними і композиційними флокулянтами вугілля марки П (пісне) має ті ж самі тенденції, що і у випадку вугілля марки К – висока флокулююча здатність другої антраценової фракції, найбільша ефективність трикомпонентних флокулянтів. Оптимальний склад флокулянта такий: $X_1 = 8 \%$; $X_2 = 75 \%$; $X_3 = 17 \%$. Особливістю в даному випадку можна вважати зростання частки у композиційному флокулянті другої антраценової фракції та пекового дистилляту.

Узагальнюючи одержані результати, можна зазначити такі особливості селективної флокуляції вугілля широкого метаморфічного ряду композиційними флокулянтами на основі коксохімічних продуктів. *По-перше*, у випадку флокуляції вугілля малого ступеня вуглефікації (марок Д і Г) найбільшою ефективністю володіють двокомпонентні реагенти на основі вбирного масла і другої антраценової фракції. *По-друге*, при флокуляції вугілля середньої і високої стадії вуглефікації найбільш ефективними стають трикомпонентні суміші з додатком пекового дистилляту.

В цілому слід відмітити, що по мірі зростання хімічної зрілості вугілля для його ефективної флокуляції потрібно знижувати частку в композиційному реагенті вбирного масла та поступово підвищувати частку другої антраценової фракції і пекового дистилляту. Для групового хімічного складу цих реагентів характерне зростання ступеня ароматичності в такому ряді: - вбирне масло - друга антраценова фракція - пековий дистиллят.

Очевидно, специфічні особливості будови ароматичних кілець (компланарність, ненасиченість С-С зв'язків) обумовлюють високу активність кам'яновугільних масел до вугільної поверхні. Ця активність набуває вирішального значення у випадку флокуляції більш хімічно зрілого вугілля, оскільки його структурна одиниця – макромолекула – також відрізняється максимальною ароматичністю за рахунок домінування ядерної частини над периферійною.

Список джерел

1. Білецький В.С., Сергеев П.В., Папушин Ю.Л. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля. – Донецьк: Грань, 1996, 264 с.
2. 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.
3. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 296 с.

6.2.10. Процес селективної флокуляції вугілля маслами

Розробка промислової технології селективної флокуляції вугілля маслами вимагає попереднього глибокого дослідження характеру та ступеню впливу на процес найважливіших технологічних параметрів.

Ефективність селективної флокуляції маслами багато в чому визначається фізико-хімічними властивостями контактуючих фаз, гідродинамічними умовами перемішування. Попередні дослідження дозволили одержати апріорну інформацію про найбільш значимі технологічні параметри процесу. До них відносяться: витрати флокулянта, зольність вихідного матеріалу, інтенсивність і час перемішування, густина суспензії, витрати регулятора середовища (їдкого натру) [1]. Подальші дослідження характеру і ступеня впливу на процес зазначених параметрів здійснювалися на основі аналізу регресійних моделей процесу, отриманих за результатами активного факторного експерименту.

При розробці статистичної моделі процесу був реалізований симетричний некомпозиційний трьохрівневий план Бокса-Бенкена для шести факторів, що представляє собою сполучення дворівневого (-1,+1) повного факторного експерименту з неповноблочним збалансованим планом [2]. Ці плани по ряду статистичних характеристик перевершують широко застосовувані в даний час центрально-композиційні ортогональні і ротатабельні плани. План Бокса-Бенкена для шести факторів включає 48 основних і 6 дослідів на нульовому рівні. Всього здійснено дві серії експериментів і відповідно одержано дві регресійні моделі – на шламах коксівного і шламах енергетичного вугілля.

Коксівне вугілля. У першій серії за вихідну сировину використовували шлами вугілля марки Ж мулонакопичувача ЦЗФ “Київська”. Дослідження проводилися на спеціальному лабораторному турбулізаторі з мішалкою лопатевого типу. Відділення концентрату від мінералізованої суспензії здійснювалося в камері лабораторної флотомашини. У якості флокулянта застосовувалася композиція із двох нафтопродуктів – дизельного палива та флотореагента ААР. Співвідношення між цими компонентами відповідало оптимальному:

- дизельне паливо – 38 %;
- флотореагент ААР – 62 %.

В якості цільової функції було обрано показник вилучення вугільних фракцій в концентрат, ε (%).

Умови експериментів були обрані на основі апріорної інформації про процес, що дозволило визначити координати центра експерименту в багатофакторному просторі у відносній близькості від області оптимуму (максимуму).

Фактори і рівні їхнього варіювання представлені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Фактори і рівні їх варіювання

Фактори	Код	Один. виміру	Інтервал варіювання	Рівні факторів		
				Нижній рівень -1	Основний рівень 0	Верхній рівень +1
Витрати флокулянта	X ₁	%	0,5	0,5	1,0	1,5
Зольність вихідного шламу	X ₂	%	10	30	40	50
Окружна швидкість імелера	X ₃	м/с	1,6	1,6	3,2	4,8
Час флокуляції	X ₄	с	30	30	60	90
Густина суспензії	X ₅	кг/м ³	50	50	100	150
Витрати їдконого на-тру	X ₆	%	0,01	0	0,01	0,02

Розробка і аналіз регресійної моделі здійснювалися з використанням статистичного модуля “Планування експерименту” програми Statgraphics Plus.

Як видно з парето-графіка, що наведений на рис.1 а, статистично значимими є більшість коефіцієнтів за винятком коефіцієнтів при парних взаємодіях X₃X₅, X₅X₆ та квадратичних членах рівняння регресії X₃², X₄² і X₆².

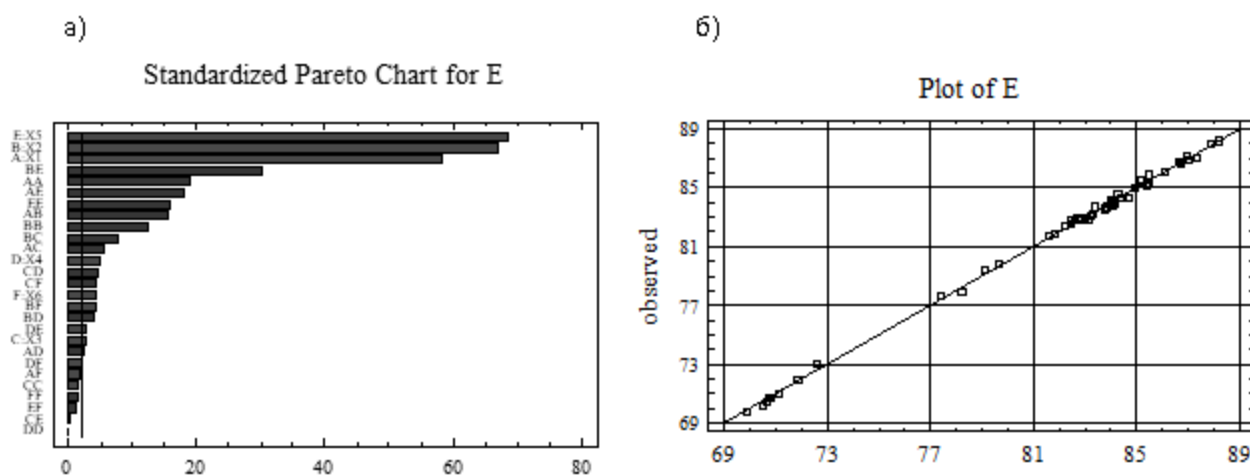


Рис. 1 – Статистичні оцінки регресійної моделі (шлам марки Ж):

а – парето-графік (вертикальна лінія відповідає 95 % значущості коефіцієнтів);

б – графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції.

З урахуванням значимості коефіцієнтів рівняння регресії має вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 83,9867 + 3,58125 \cdot X_1 + 4,12375 \cdot X_2 + 0,180833 \cdot X_3 + 0,309583 \cdot X_4 + \\ & + 4,21417 \cdot X_5 + 0,280417 \cdot X_6 - 1,80181 \cdot X_1^2 - 1,6675 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,61 \cdot X_1 \cdot X_3 - \\ & - 0,184375 \cdot X_1 \cdot X_4 - 1,95125 \cdot X_1 \cdot X_5 + 0,205 \cdot X_1 \cdot X_6 - 1,16556 \cdot X_2^2 - 0,8475 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ & - 0,44 \cdot X_2 \cdot X_4 - 2,28313 \cdot X_2 \cdot X_5 + 0,47625 \cdot X_2 \cdot X_6 - 0,5025 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,345 \cdot X_3 \cdot X_6 + \\ & + 0,32625 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0,25 \cdot X_4 \cdot X_6 - 1,48931 \cdot X_5^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Високе значення коефіцієнта детермінації ($R^2 = 99,8308\%$) свідчить про адекватність отриманої регресійної моделі досліджуваному процесові. На рис. 1б проілюстровано порівняння одержаних (observed) і розрахованих (predicted) даних. Як видно, у більшості випадків різниця між цими даними невелика. Значна кількість експериментальних точок знаходяться в околиці прямої.

На рис. 2 представлені найбільш характерні часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції та її контурні криві. Графіки було отримано при фіксації значень факторів на оптимальних рівнях. Точками на контурних кривих позначені координати оптимуму цільової функції у факторному просторі.

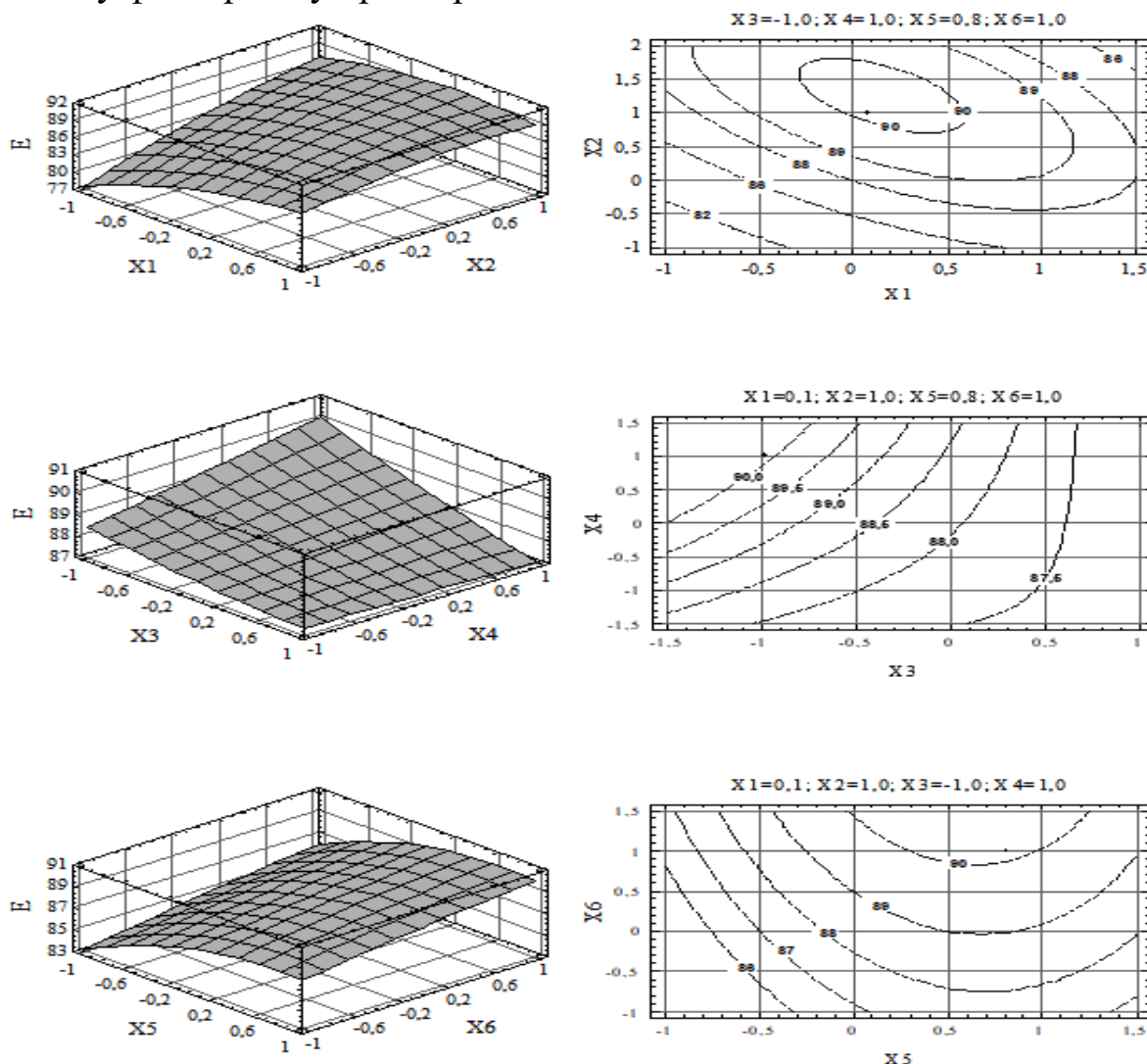


Рис. 2. Тривимірні перетини поверхні цільової функції та її контурні криві (шлам марки Ж).

Як видно з парето-графіка (див. рис. 1, а) і рівняння регресії (1), найбільш істотними факторами є густина вихідної суспензії (X_5), зольність шламів (X_2) та витрати масляного флокулянта (X_1). Збільшення кожного з них приводить до помітного росту вилучення вугільних фракцій в концентрат ε (див. рис. 2). При цьому залежність $\varepsilon = f(X_1)$ є екстремальною при оптимальному значенні фактору $X_1 = 0,1$. В натуральному вираженні оптимальні витрати масляного флокулянта становлять 1,05 %. Також екстремальною є залежність $\varepsilon = f(X_5)$ з екстремумом-максимумом $X_5 = 0,8$ (140 кг/м³ в натуральному вираженні). Як видно з рис. 2, оптимальне значення зольності шламу складає $X_2 = 1,0$, або 50 % в натуральному масштабі.

З графіків залежностей $\varepsilon = f(X_3, X_4)$ витікає, що в рамках вибраного факторного простору зростання інтенсивності турбулентного перемішування (фактор X_3) призводить до помітного зменшення цільової функції ε . Це свідчить про можливість зниження окружної швидкості обертання імелера до мінімального значення $X_3 = -1,0$ (1,6 м/с). В цьому випадку зростання часу флокуляції X_4 до максимального значення $X_4 = 1,0$ (90 с) дозволяє значно підвищити вилучення ε . В той же час при максимальних значеннях параметра X_3 вплив фактора “час флокуляції” на цільову функцію майже відсутній. Отже, оптимальні значення факторів X_3 та X_4 відповідно становлять: $X_3 = -1,0$ (1,6 м/с); $X_4 = 1,0$ (90с).

Як показують попередні дослідження, ступінь впливу на процес витрат їдкового натру (X_6) може бути різним в залежності від мінерального складу досліджуваних шламів. У випадку масляної флокуляції вугільних шламів марки “Ж” ЦЗФ “Київська” зростання витрат їдкового натру до $X_6 = 1,0$ (0,02 %) дещо підвищує значення цільової функції ε .

Таким чином, при селективній флокуляції маслом вугільних шламів марки Ж у межах заданого в експерименті факторного простору екстремум-максимум цільової функції ε характеризується наступними оптимальними значеннями параметрів:

$$\begin{aligned} X_1 &= 1,05 \% ; & X_2 &= 50 \% ; \\ X_3 &= 1,6 \text{ м/с} ; & X_4 &= 90 \text{ с} ; \\ X_5 &= 140 \text{ кг/м}^3 ; & X_6 &= 0,02 \% . \end{aligned}$$

Прогнозоване значення цільової функції в точці екстремуму складає $\varepsilon = 90,0841$ %. В результаті реалізації досліду в точці екстремуму вилучення вугілля в концентрат складало 90,21 %. Близькість експериментальних і розрахункових значень цільової функції в точці екстремуму є ще одним підтвердженням адекватності отриманого рівняння регресії.

Енергетичне вугілля. Аналогічні дослідження проведенні на шламах енергетичного вугілля. В якості об’єкту масляної селекції було обрано вугільні шлами марки Д мулонакопичувача ЦЗФ “Україна”. Експерименти здійснювалися на тій же самій лабораторній установці, що і в попередніх

дослідженнях. Фактори та область їх варіювання також відповідали даним, наведеним в табл.1. В якості цільової функції також було прийняте вилучення вугільних фракцій в концентрат, ε .

Відмінність полягала в тому, що у якості флокулянта застосовувався освітлювальний гас, який забезпечує максимальну ефективність процесу на вугіллі низького ступеня вуглефікації [1].

Розробка і аналіз регресійної моделі здійснювалися з використанням того ж статистичного модуля “Планування експерименту” програми Statgraphics Plus.

Як видно з парето-графіка, що наведений на рис. 3, статистично значимими є більшість коефіцієнтів за винятком коефіцієнтів при парних взаємодіях X_1X_5 , X_1X_6 , X_1X_6 та X_4X_5 . З урахуванням значимості коефіцієнтів рівняння регресії має вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 72,545 + 6,75333 \cdot X_1 + 7,10958 \cdot X_2 + 1,52708 \cdot X_3 + 0,58125 \cdot X_4 + \\ & + 7,86458 \cdot X_5 + 1,63708 \cdot X_6 - 2,61861 \cdot X_1^2 - 1,08875 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,425 \cdot X_1 \cdot X_3 + \\ & + 0,34125 \cdot X_1 \cdot X_4 - 1,69778 \cdot X_2^2 + 3,25 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,67875 \cdot X_2 \cdot X_4 - 1,6325 \cdot X_2 \cdot X_5 + \\ & + 0,555556 \cdot X_3^2 - 1,42375 \cdot X_3 \cdot X_4 - 2,0725 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0,963125 \cdot X_3 \cdot X_6 \\ & + 0,660139 \cdot X_4^2 - 1,63125 \cdot X_4 \cdot X_6 - 2,49028 \cdot X_5^2 + 1,97 \cdot X_5 \cdot X_6 - 1,08444 \cdot X_6^2 \end{aligned}$$

Високе значення коефіцієнта детермінації ($R^2 = 99,7721\%$) свідчить про адекватність отриманої регресійної моделі досліджуваному процесові. На рис. 3, б проілюстровано порівняння одержаних (observed) і розрахованих (predicted) даних. Як видно, у більшості випадків різниця між цими даними невелика. Значна кількість експериментальних точок знаходяться в околиці прямої.

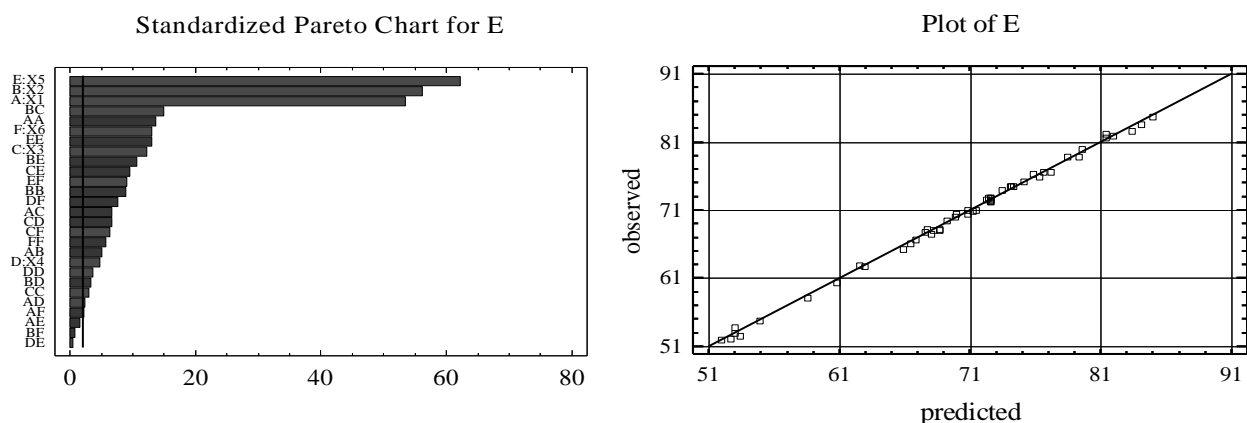


Рис. 3. – Статистичні оцінки регресійної моделі (шлам марки Д):
 а – парето-графік (вертикальна лінія відповідає 95 % значущості коефіцієнтів);
 б – графік порівняння експериментальних (observed) і розрахованих (predicted) значень цільової функції.

На рис. 4 представлені найбільш характерні часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції та її контурні криві. Тенденції, простежені по моделі (1) для вугілля марки Ж, зберігаються і у випадку моделі (2) для вугілля марки Д. Відмінність полягає у більшому ступені впливу факторів. Про це свідчать більші абсолютні значення коефіцієнтів моделі (2) та більш “крутий” характер гіперповерхонь. Більш активний вплив на процес технологічних факторів, напевне, обумовлено значною хімічною активністю вугілля низького ступеня вуглефікації.

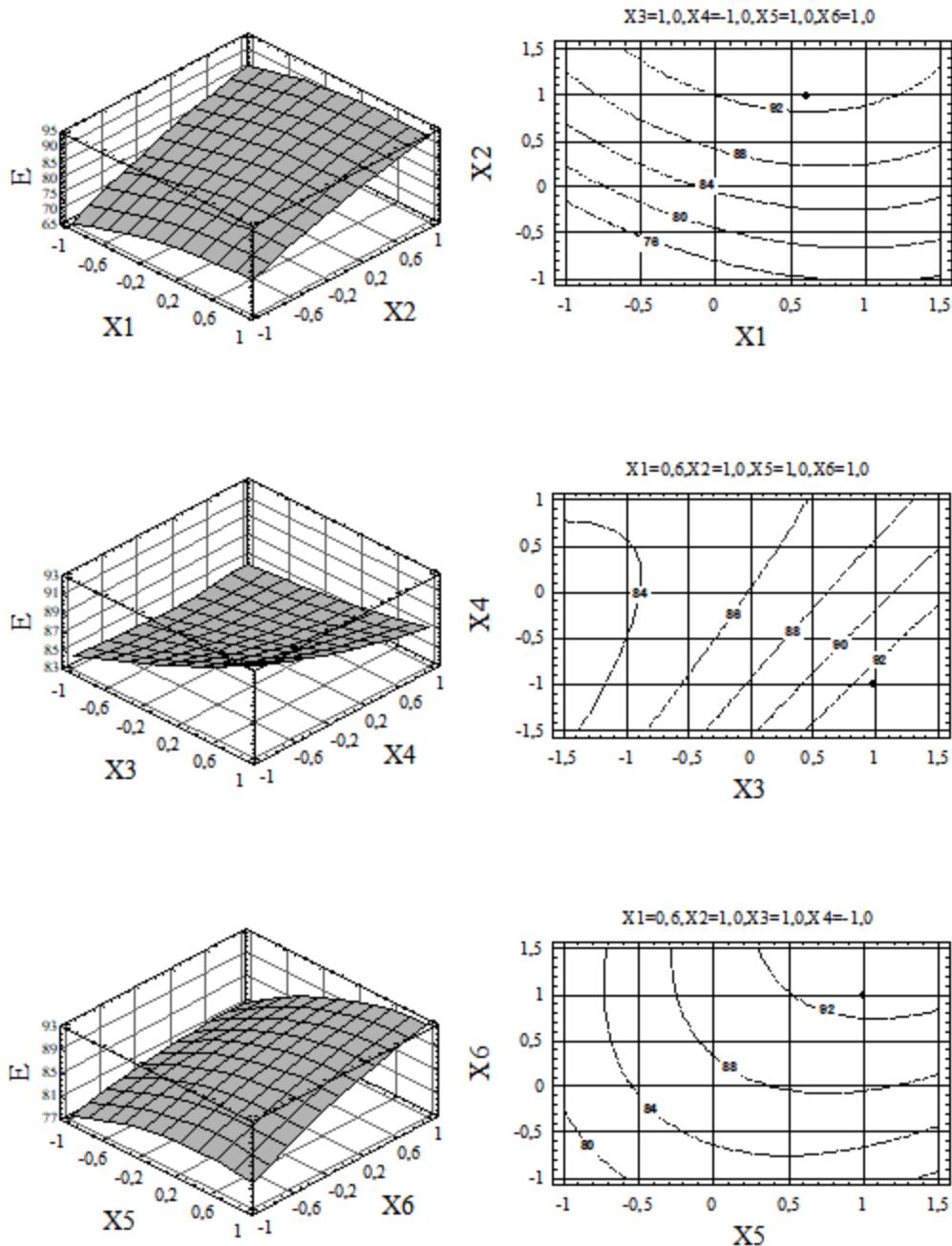


Рис. 4. – Тривимірні перетини поверхні цільової функції та її контурні криві (шлам марки Д).

Найбільш істотними факторами є густина вихідної суспензії (X_5), зольність шламів (X_2), витрати масляного флокулянта (X_1) та їдкого натру

(X_6). Збільшення кожного з них приводить до помітного росту вилучення вугільних фракцій в концентрат ε .

На відміну від коксівного вугілля, ефективність флокуляції вугілля марки Д суттєво зростає при більш високій інтенсивності турбулентного перемішування (зростанні фактору X_3) та мінімальному часі флокуляції (X_4). Зростання тривалості флокуляції приводить до зменшення ефективності процесу. Це обумовлено тим фактом, що з ростом тривалості флокуляції підвищується імовірність механічного “захвату” у флокули мінеральних часток, що, в свою чергу, знижує селективність процесу. При невеликих значеннях окружної швидкості обертання (фактору X_3) цей ефект не спостерігається, а при підвищенні значень (X_3) залежність $\varepsilon = f(X_4)$ стає убуваючою.

Екстремум-максимум цільової функції ε характеризується такими оптимальними значеннями досліджуваних факторів: $X_1 = 0,6$; $X_2 = 1,0$ %; $X_3 = 1,0$; $X_4 = -1,0$; $X_5 = 1,0$; $X_6 = 1,0$. В перерахунку на натуральні значення оптимальний режим селективної флокуляції вугілля марки Д має такі показники:

$$\begin{aligned} X_1 &= 1,3 \text{ \%}; & X_2 &= 50 \text{ \%}; \\ X_3 &= 4,8 \text{ м/с}; & X_4 &= 30 \text{ с}; \\ X_5 &= 150 \text{ кг/м}^3; & X_6 &= 0,02 \text{ \%}. \end{aligned}$$

Прогнозоване згідно моделі значення цільової функції в точці екстремуму складає $\varepsilon = 92,7675$ %. В результаті реалізації досліду в точці екстремуму вилучення вугілля в концентрат складало 92,57 %. Близькість експериментальних і розрахункових значень цільової функції в точці екстремуму підтверджує адекватність отриманого рівняння регресії.

Таким чином, розроблені регресійні моделі адекватні вивчаємому процесу селективної флокуляції вугілля масляними реагентами. Вони дозволяють оцінити характер та ступінь впливу на процес флокуляції найважливіших технологічних параметрів. Незалежно від ступеня хімічної зрілості вугілля зростання його зольності та витрат реагента-регулятора рН середовища (їдкого натру) призводить до помітного підвищення вилучення вугільних фракцій в концентрат, ε .

Залежності вилучення ε від витрат масла та густини суспензії є екстремальними. Оптимальні значення витрат масляного флокулянту та густини суспензії складають 1,05 – 1,3 % і 140-150 кг/м³ відповідно.

Селективна флокуляція молодого вугілля потребує більш інтенсивного режиму перемішування водовугільної суспензії, ніж це потрібно при переробці більш зрілого вугілля. В першому випадку оптимальне значення окружної швидкості імелера змішувача складає 4,8 м/с, в другому – 1,6 м/с.

Оптимальний час флокуляції маслами молодого вугілля складає 30 с. Подальше зростання тривалості флокуляції приводить до зменшення ефе-

ктивності процесу, імовірно за рахунок механічного “захвату” у флокули мінеральних часток. В разі хімічно зрілого вугілля негативний вплив мінеральної компоненти зменшується і оптимальний час флокуляції складає біля 90 с.

Одержані результати доцільно використати при розробці дослідно-промислової технології селективної флокуляції вугільних шламів маслами.

Список джерел

1. Сергеев П. В. Селективна флокуляція вугільних шламів органічними реагентами / П. В.Сергеев, В. С. Білецький ; Донец. від-ня наук. т-ва ім. Шевченка, Ред. Укр. гірничої енцикл. – Донецьк : Сх. вид. дім, 2010. – 240 с.

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

6.2.11. Процес селективної флокуляції вугілля латексами

Селективна флокуляція латексами – складний, багатоступеневий процес, що визначається цілим рядом технологічних факторів. Аналіз показує, що основними вхідними та вихідними параметрами процесу є такі:

- фізико-хімічні властивості ($\varphi_в$) та зольність ($A_в^d$) вугілля ;
- густина (ρ_c), температура (T_c) і рН суспензії;
- фізико-хімічні властивості ($\varphi_л$), концентрація ($c_л$) і витрати ($Q_л$) латексу ;
- тривалість (τ_ϕ), інтенсивність (n_ϕ) турбулентного перемішування;
- температура суспензії під час флокуляції (T_ϕ) ;
- вихід (γ_k) та зольність (A_k^d) концентрату ;
- вихід (γ_o) та зольність (A_o^d) відходів.

На основі апріорної інформації, одержаної з технічної літератури та попередніх досліджень [1], було визначено, що при застосуванні бутадієн-стирольних латексів у звичайних умовах збагачувальних фабрик найбільш важливими вхідними параметрами є витрати флокулянту, густина водовугільної суспензії, зольність вугілля та тривалість флокуляції. Для вивчення характеру та ступеня впливу цих факторів на процес флокуляції нами було розроблено математичну регресійну модель з використанням повного факторного експерименту типу 2^4 . При цьому реалізовано центральнокмпозиційний ротатабельний план другого порядку [2].

Дослідження проведені на шламах ЦЗФ “Київська”, яка переробляє вугілля марки Ж шахти ім. Засядько. Крупність шламу 0-0,5 мм, температура та рН суспензії 18-20 °С і 7,4 відповідно. Як флокулянт використано синтетичний латекс БС-30Ф. Селективна флокуляція здійснювалася у тур-

булізаторі-змішувачі, що представляв собою модернізовану лабораторну флотомашину з демонтованим статором й імпелерною мішалкою лопатевого типу з діаметром імпелера 60 мм, що має регульовану частоту обертання. Частота обертання імпелера змішувача складала 29 с^{-1} .

Відділення флокульованного продукту від мінералізованої суспензії проводилося в камері лабораторної флотомашини типу ФЛ-1 з обсягом камери 750 см^3 . Режим флотаційного поділу у всіх експериментах був постійним:

- витрати реагента-збирача (гасу) – 1200 г/т шламу;
- витрати реагента-вспінювача ("Оксаль") – 75 г/т шламу;
- час кондиціонування суспензії з реагентами – 30 с;
- частота обертання імпелера – 1750 хв^{-1} ;
- питомі витрати повітря – $2 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$;
- час флотації – 2 хвилини.

Фактори та умови їх кодування наведені у табл. 1.

Таблиця 1.

Фактори та умови їх кодування

Фактори	Код фактору	Одиниці виміру	Інтервал змін	Нижній рівень	Основний рівень	Верхній рівень
Витрати латексу	X_1	г/т	40	80	120	160
Густина суспензії	X_2	г/л	40	80	120	160
Зольність вугілля	X_3	%	5	15	20	25
Тривалість флокуляції	X_4	с	20	40	60	80

Прийнятий факторний простір для параметрів X_2 і X_3 відповідає дійсним змінам цих факторів в умовах фабрик. Інтервали факторів X_1 і X_4 встановлено за апріорною інформацією.

Цільовою функцією прийнято вилучення вугільних фракцій у концентрат ε . Матрицю планування та значення цільової функції в експериментах наведено в табл. 2.

Обробка та аналіз даних експерименту виконані на ПК з використанням статистичного програмного модулю Statgraphics. Як видно з паретографіка, наведеного на рис. 1 а, статистично значимими є більшість коефіцієнтів моделі за винятком коефіцієнтів при парних взаємодіях X_1X_4 , X_2X_4 та X_2X_3 .

Одержане рівняння регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів має вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 95,3286 + 0,204167 \cdot X_1 + 0,4625 \cdot X_2 - 0,1125 \cdot X_3 + 0,0541667 \cdot X_4 + \\ & + 0,260565 \cdot X_1^2 + 0,08125 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,29375 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0644345 \cdot X_2^2 + \\ & + 0,185565 \cdot X_3^2 - 0,11875 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,198065 \cdot X_4^2 \end{aligned}$$

(1)

Матриця планування та результати експериментів

№	X_1	X_2	X_3	X_4	$\varepsilon, \%$
1	0	0	0	0	95,4
2	0	0	0	0	95,3
3	0	0	0	0	95,4
4	0	0	0	0	95,2
5	0	0	0	0	95,2
6	0	0	0	0	95,3
7	0	0	0	0	95,4
8	-1	-1	-1	-1	95,5
9	1	-1	-1	-1	95,0
10	-1	1	-1	-1	96,6
11	1	1	-1	-1	97,2
12	-1	-1	1	-1	95,1
13	1	-1	1	-1	96,0
14	-1	1	1	-1	95,6
15	1	1	1	-1	96,9
16	-1	-1	-1	1	95,8
17	1	-1	-1	1	96,8
18	-1	1	-1	1	96,6
19	1	1	-1	1	96,6
20	-1	-1	1	1	94,5
21	1	-1	1	1	95,7
22	-1	1	1	1	95,7
23	1	1	1	1	96,8
24	-2	0	0	0	95,0
25	2	0	0	0	96,7
26	0	-2	0	0	93,6
27	0	2	0	0	96,0
28	0	0	-2	0	96,4
29	0	0	2	0	94,3
30	0	0	0	-2	95,0
31	0	0	0	2	95,4

Адекватність регресійної моделі підтверджується високим значенням коефіцієнту детермінації $R^2 = 98,15 \%$. На рис. 1 б, проілюстровано порівняння одержаних (observed) і розрахункових (predicted) даних. Як видно, у більшості випадків різниця між цими даними невелика. Значна кількість експериментальних точок знаходяться в околиці прямої.

На рис. 1, в приведено тривимірні перетини гіперповерхні моделі, а на рис. 1, г – контурні криві цих поверхонь. Як видно з рівняння регресії та наведених графіків, зростання значень факторів X_1 , X_2 та X_4 приводить до відповідного росту функції відгуку ε . В той же час підвищення зольності вугілля (X_3) супроводжується зниженням ε . Найбільш впливовими факторами є витрати латексу (X_1) та густина суспензії (X_2).

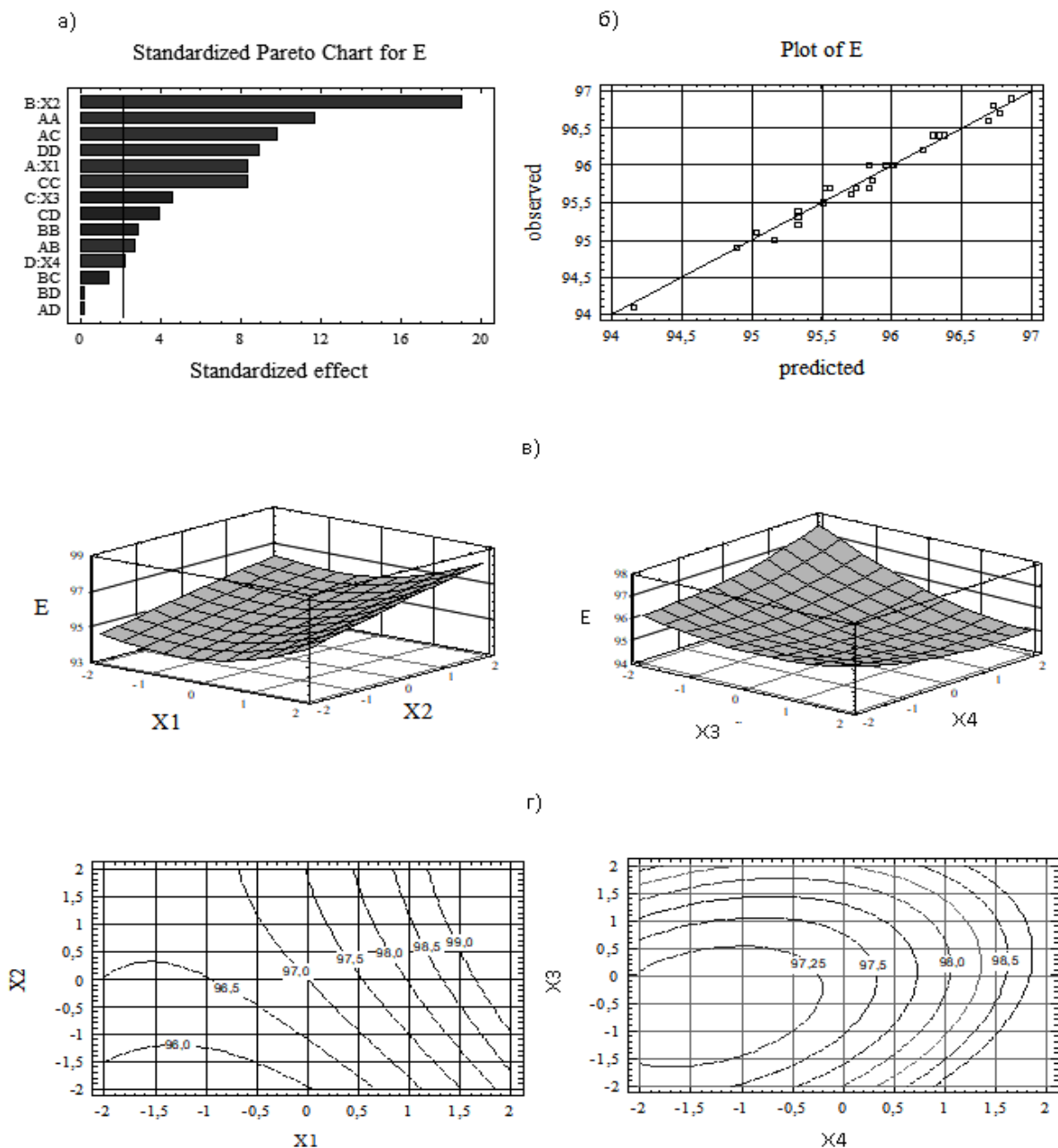


Рис. 1. – Результати аналізу рівняння регресії (1):

- а – парето-графік (вертикальна лінія відповідає 95% значущості коефіцієнтів моделі);
- б – графік порівняння розрахованих (predicted) і експериментальних (observed) даних;
- в – тривимірні перетини функції відгуку;
- г – контурні криві поверхні відгуку.

Можна зробити висновок, що залежність $\varepsilon = f(Q_n)$ має екстремальний характер і підвищення витрат латексу в діапазоні 40-80 г/т приводить до деякого зниження ε . Це можна пояснити, якщо припустити, що в даному інтервалі витрат відстань між вугільними частинками, що зв'язані полімерними ланцюжками, не перевищує подвійного радіусу дії електростатичних сил відштовхування між ними. Як відзначалося, ці сили знижують міцність флокул. В результаті частина вугільних зерен відокремлюється від флокул, що супроводжується зменшенням вилучення вугілля в концентрат. Подальше зростання довжини латексних ланцюжків за раху-

нок підвищення витрат латексу унеможливилює негативний вплив на вилучення електростатичних сил відштовхування.

Аналіз наведених поверхонь вказує на значне зниження ε при агрегації вугілля з високим вмістом золи (зростання параметра X_3). Особливо чітко ця тенденція проявляється при тривалості флокуляції 60 секунд і більше. Це обумовлено вже згаданим вище негативним впливом мінеральної компоненти на формування латексних ланцюжків та їх закріплення на вугільних частках. Крім того, з ростом тривалості флокуляції підвищується імовірність механічного “захоплення” у флокули мінеральних часток, що знижує селективність наступної флоатації. При невеликій зольності вугілля цей ефект не спостерігається, тому залежність $\varepsilon = f(X_4)$ є зростаючою, а при підвищенні зольності вугілля (X_3) вона поступово змінюється на протилежну.

Таким чином, розроблена регресійна модель підтверджує висунуті вище теоретичні положення, дозволяє прогнозувати результати процесу і може бути використана при розробці технологічних режимів селективної флокуляції вугілля латексами для промислових потреб.

Список джерел

1. Нікітін І. М. Селективна флокуляція вугільних шламів латексами / І. М. Нікітін, П. В. Сергєєв, В. С. Білецький; Донец. держ. техн. ун-т, Наук. т-во ім. Т. Г. Шевченка. – Донецьк : Сх. вид. дім, 2001. – 150 с.

2. Папушин Ю. Л. Дослідження корисних копалин на збагачуваність: навч. посіб. / Ю. Л. Папушин, В. О. Смирнов, В. С. Білецький ; Донец. нац. техн. ун-т, Донец. від-ня Наук. т-ва ім. Шевченка. – Донецьк : Сх. вид. дім, 2006. – 344 с.

6.2.12. Флокуляційно-флоатаційний процес збагачення вугілля

Особливий інтерес викликає розробка регресійних моделей флокуляційно-флоатаційного способу збагачення вугільних шламів[1]. Ці моделі повинні включати параметри власне флоатаційного процесу. Тому в якості вхідних було обрано три параметри: витрати латексу (X_1), витрати реагенту-збирача (X_2) і витрати реагенту-спінювача (X_3). Застосовувалися ті ж самі реагенти, що і в попередній серії експериментів.

Дослідження проводилися на тій же лабораторній установці з використанням суспензії вугільних шламів шахти ім. Засядько густиною 150 кг/м^3 і зольністю 26 %. Параметри режиму селективної флокуляції латексом: витрати латексу - згідно плану експерименту; тривалість перемішування (флокуляції) – 80 с; частота обертання імелера змішувача - 29 с^{-1} . Режим флоатаційного поділу флокульованого продукту:

- витрати реагенту-збирача (гасу) – згідно плану експерименту;

- витрати реагенту-спінювача ("Оксаль") – згідно плану експерименту;
- час кондиціонування суспензії з реагентами – 30 с;
- частота обертання імпелера – 1750 хв^{-1} ;
- питомі витрати повітря – $2 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$;
- час флотації – 2 хвилини.

При розробці статистичної моделі флокуляційно-флотаційного процесу був реалізований симетричний некомпозиційний трирівневий план Бокса-Бенкена, що представляє собою сполучення дворівневого (-1,+1) повного факторного експерименту з неповноблочним збалансованим планом [2]. Ці плани по ряду статистичних характеристик перевершують центрально-композиційні ортогональні і ротатабельні плани, що найбільш широко використовуються в наш час[3].

Як і у попередньому випадку, у якості відгуку був обраний показник вилучення вугільних фракцій в концентрат ε (%).

Рівні факторів та інтервали їх варіювання приведені у таблиці 1, а матриця планування і результати експерименту - в таблиці 2.

Розробка та аналіз регресійної моделі здійснювалися за допомогою тієї ж самої статистичної програми Statgraphics. Результати приведені на рис. 1.

Таблиця 1.

Область експериментування

Фактор	Код фактора	Один. виміру	Інтервал змін	Нижн. рівень	Основн. рівень	Верхн. рівень
Витрати латексу	X_1	г/т	50	150	200	250
Витрати збирача	X_2	г/т	500	500	1000	1500
Витрати спінювача	X_3	г/т	50	50	100	150

Таблиця 2.

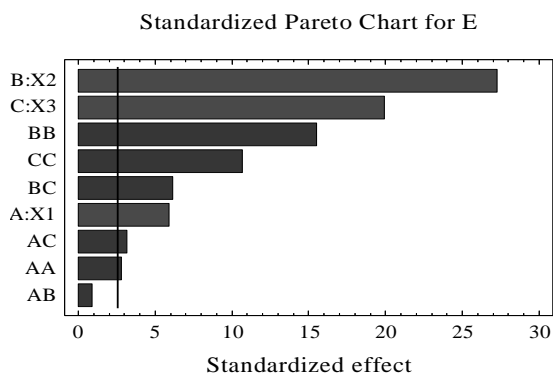
Матриця планування експерименту та результати дослідів

№ дослідів	X_1	X_2	X_3	ε експ %
1	-1	-1	0	85,3
2	+1	-1	0	87,3
3	-1	+1	0	94,4
4	+1	+1	0	95,6
5	-1	0	-1	87,0
6	+1	0	-1	90,7
7	-1	0	+1	94,4
8	+1	0	+1	95,2
9	0	-1	-1	79,1
10	0	+1	-1	91,2
11	0	-1	+1	89,1
12	0	+1	+1	95,5
13	0	0	0	95,0
14	0	0	0	95,1
15	0	0	0	95,1

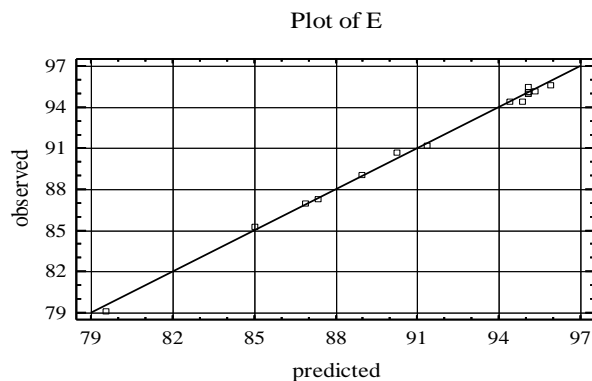
Як видно з парето-графіка (див. рис.1, а), статистично значимими в цій моделі є всі коефіцієнти за винятком коефіцієнта при парній взаємодії X_1X_2 . З урахуванням цього рівняння регресії має вигляд:

$$\varepsilon = 95,0667 + 0,9625 \cdot X_1 + 4,4875 \cdot X_2 + 3,275 \cdot X_3 - 0,658333 \cdot X_1^2 - 0,725 \cdot X_1 \cdot X_3 - 3,75833 \cdot X_2^2 - 1,425 \cdot X_2 \cdot X_3 - 2,58333 \cdot X_3^2$$

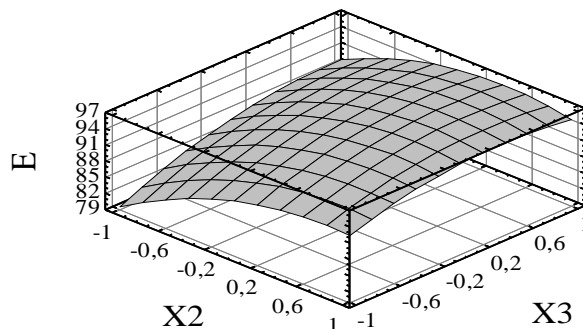
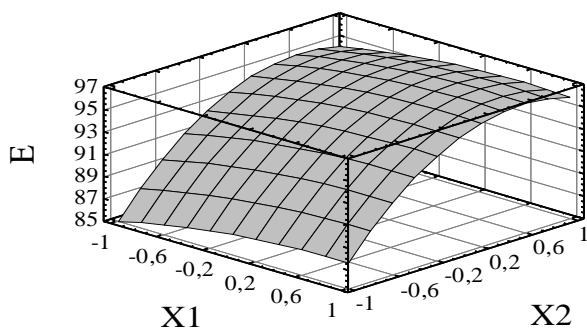
а)



б)



в)



г)

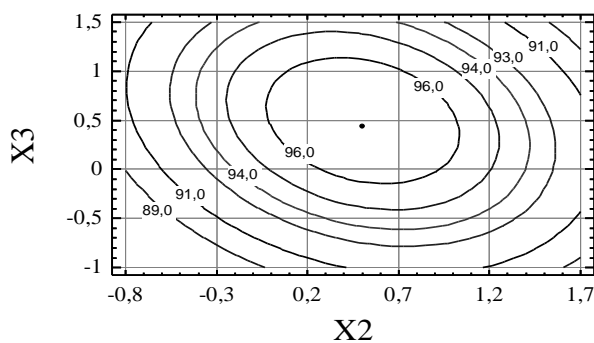
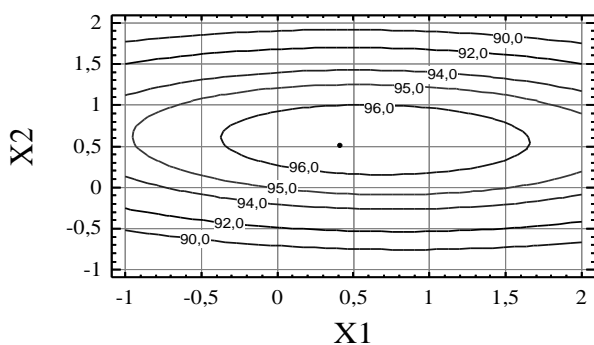


Рис.1. Аналіз регресійної моделі процесу флокуляційно-флотаційного збагачення вугільних шламів: а – парето-графік (вертикальна лінія відповідає 95% значущості коефіцієнтів моделі); б – графік порівняння розрахункових (predicted) і експериментальних (observed) даних; в – тривимірні перетини функції відгуку; г – контурні криві поверхні відгуку.

Графік порівняння розрахункових і експериментальних даних (рис. 1,б) показує, що в більшості випадків різниця між ними мінімальна. Адекватність моделі процесу, що досліджується, підтверджується великим значенням коефіцієнту детермінації $R^2 = 99,68 \%$.

З наведених даних витікає, що значущість досліджуваних факторів зростає в ряду $X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$. Залежність функції відгуку ε від всіх цих факторів має екстремальний характер з чітко визначеним екстремумом-максимумом. Це свідчить про можливість оптимізації процесу по всіх трьох факторах. Ця оптимізація була виконана засобами програми Statgraphics.

В межах факторного простору, що був заданий в експерименті, екстремум-максимум функції відгуку ε характеризується такими оптимальними значеннями факторів (в нормованому виді): $X_1 = 0,4138$; $X_2 = -0,5030$; $X_3 = 0,4373$. Координати екстремуму позначені точками на контурних кривих поверхні відгуку (див.рис. 1, г) В перерахунку на натуральні значення маємо:

- витрати латексу $X_1 = 230$ г/т ;
- витрати реагенту-збирача (гасу) $X_2 = 1250$ г/т ;
- витрати реагенту-спінювача (Оксаль) $X_3 = 130$ г/т.

Значення цільової функції, що передбачене регресійною моделлю в точці екстремуму, складає $\varepsilon = 97,1 \%$. Експериментально знайдене значення в цій точці $\varepsilon = 96,9 \%$. Близькість експериментальних і розрахункових значень цільової функції в точці екстремуму є ще одним підтвердженням адекватності одержаного рівняння регресії.

Список джерел

1. Нікітін І. М. Селективна флокуляція вугільних шламів латексами / І. М. Нікітін, П. В. Сергєєв, В. С. Білецький; Донец. держ. техн. ун-т, Наук. т-во ім. Т. Г. Шевченка. – Донецьк : Сх. вид. дім, 2001. – 150 с.
2. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 296 с.
3. Папушин Ю. Л. Дослідження корисних копалин на збагачуваність : навч. посіб. / Ю. Л. Папушин, В. О. Смирнов, В. С. Білецький ; Донец. нац. техн. ун-т, Донец. від-ня Наук. т-ва ім. Шевченка. – Донецьк : Сх. вид. дім, 2006. – 344 с.

6.2.13. Суміщений процес «селективна масляна агрегація – гідротранспорт вугілля»

Актуальною проблемою сучасного вуглезбагачення є ефективна переробка шламів мулонакопичувачів і шламовідстійників. При вуглезбага-

чувальних фабриках України станом на 2007 р. знаходилося 35 мулонакопичувачів загальним об'ємом 129 млн куб. м, які містили 114 млн т шламів, переважно відходів флотації зольністю 45-75 % [1].

Для переробки лежалих шламів використовують гравітаційні методи збагачення (гідросайзер, гвинтові сепаратори тощо). Разом з тим, недоліком гравітаційних технологій переробки є їх низька ефективність на класах $-0,1$ мм. Це робить актуальним пошук і впровадження комплексних технологій збагачення шламів включно з тонкими класами.

Нами пропонується для збагачення вугілля кл. $-0,1$ мм застосовувати технологію селективної масляної агрегації [2]. Але її вузьким місцем є відносно великі витрати аполярних реагентів, що суттєво обмежує можливість використання цієї технології для енергетичного вугілля. Доцільніше застосування селективної масляної агрегації для коксівного вугілля з використанням в якості реагенту продуктів коксохімічного виробництва (які у цьому випадку повертаються у процес коксування разом з вугіллям).

Для реалізації процесу селективної масляної агрегації використовують різноманітні мішалки [3], але водночас процес може відбуватися у будь-якому турбулентному потоці води, наприклад, під час гідравлічного транспортування вугільних шламів з мулонакопичувача до вуглепідготовчого цеху коксохімзаводу.

Мета цієї роботи – дослідження суміщеного процесу “Селективна масляна агрегація – гідротранспорт вугілля” методом планового експерименту з одержанням регресійної моделі процесу.

Суть дослідження полягала у виявленні характеру залежності зольності концентрату селективної масляної агрегації від трьох факторів: витрат реагенту (X_1), дальності гідравлічного транспортування водо-вугільно-реагентної суміші (X_2) та її концентрації (X_3). Схема експерименту: підготовка водо-вугільної суміші до гідротранспорту, добавка реагенту згідно плану експеримента, гідравлічне транспортування суміші на стенді при швидкості $V = 1,1V_{кр}$, зневоднення вугільного шламу на відсаджувальній центрифугі при $Fr = 1000$. Кек центрифуги являє собою концентрат процесу селективної масляної агрегації, а твердий осад фугату – відходи. Застосовувалися стенди НВО “Хаймек” та обладнання кафедри “Збагачення корисних копалин” Донецького національного технічного університету. Як вихідний матеріал взято шлами мулонакопичувача Ясинівського КХЗ, збагачений гвинтовою сепарацією до зольності 30 %. Крупність шламів складала 3-0 мм, вміст кл. $-0,1$ мм – 26 %.

Для планування експерименту вибрано некомпозиційний трирівневий план Бокса-Бенкена для трьох факторів, який згідно [4] за своїми характеристиками переважає центрально-композиційний план.

Фактори та границі їх варіювання наведені в таблиці 1.

Фактори та границі їх варіювання.

Фактор	Код фактора	Одиниця вимірювань	Рівні факторів		
			-1	0	+1
Витрати реагента	X_1	мас.%	0,5	1,5	2,5
Дальність транспортування	X_2	м	600	3000	5400
Концентрація гідросуміші	X_3	мас.%	10	30	50

Обробка результатів експерименту здійснювалася за комп'ютерною програмою "Statgraphics".

Аналіз значущості коефіцієнтів моделі виконано на основі Паретто-графіка (рис.1а). Як видно, значущими є коефіцієнти при X_1 , X_2 , X_3 , при квадратичному члені X_1^2 та члені, що відображає парну взаємодію X_1X_3 . Ці коефіцієнти знаходяться праворуч вертикальної лінії на Паретто-графіку, що відповідає 95 % значущості.

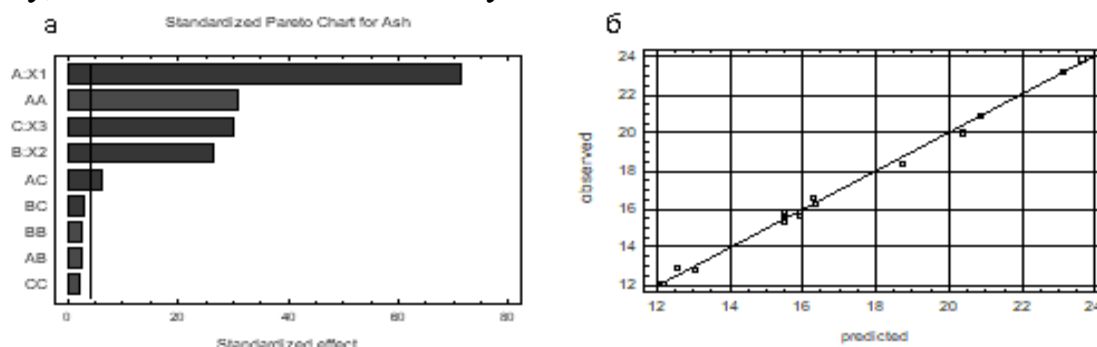


Рис.1 – Характеристики регресійної моделі

З урахуванням значущості коефіцієнти рівняння регресії має вигляд:

$$\text{Ash} = 15,4667 - 3,8625 \cdot X_1 - 1,4375 \cdot X_2 - 1,625 \cdot X_3 + 2,46667 \cdot X_1^2 - 0,475 \cdot X_1 \cdot X_3 \quad (1)$$

Адекватність моделі в цілому підтверджується високим значенням коефіцієнта детермінації $R\text{-кв} = 99,53\%$ і тим, що критерій Lack-of-fit (втрати узгодженості функцій) складає 0,0804, що перевищує критичне значення (0,05). На рис. 1б показана відповідність експериментальних даних (observed) і розрахункових (predicted). На рис. 2 подані тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції та їх контурні криві (лінії рівня).

Гіперповерхні мають неекстремальний характер. Як видно з рис. 1 і 2, зростання кожного з факторів (X_1 , X_2 , X_3) призводить до покращення якості концентрату (зниження його зольності), але найбільш впливає на зольність концентрату селективної масляної агрегації фактор X_1 – витрати реагента. Фактори X_2 , X_3 практично рівнозначні за своїм впливом на цільову функцію. На контурних кривих (рис. 2) точками показані оптимальні значення факторів X_1 , X_2 , X_3 , що відповідають мінімальному значенню зольності концентрату.

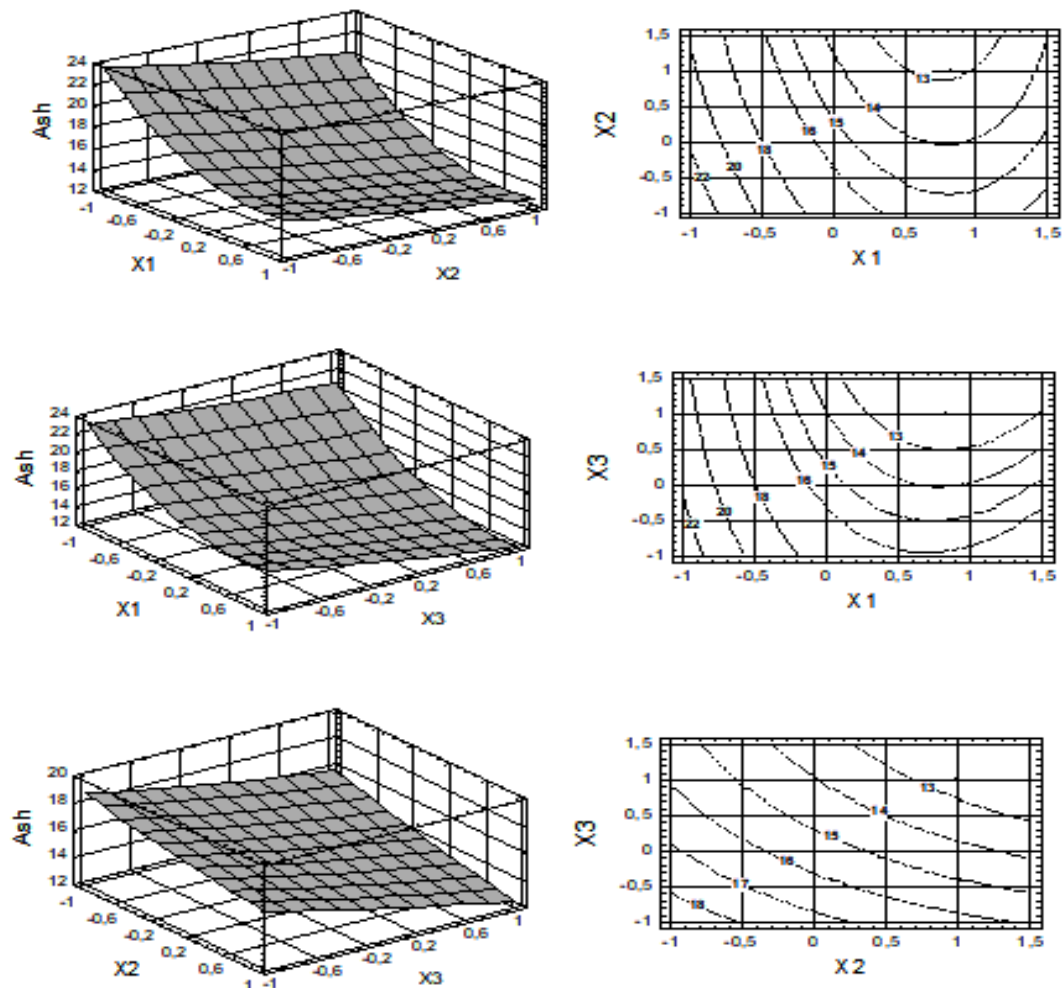


Рис.2 – Тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції та їх контурні криві

Значення факторів, що відповідають оптимуму ($A_k^d = 10,85\%$), у кодованому і натуральному вираженні подані в таблиці 2.

Таблиця 2.

Оптимальні значення факторів

Фактор	Low	High	Оптимальне значення	
			кодоване	натуральне
X_1	-1,0	1,0	0,843772	2,1 %
X_2	-1,0	1,0	1,0	5400 м
X_3	-1,0	1,0	0,999135	50 %

Зольність відходів селективної масляної агрегації складала 69-76 %.

Одержані результати дозволяють зробити такі **висновки**.

1. Суміщений процес “Селективна масляна агрегація – гідротранспорт вугілля” дозволяє ефективно збагачувати тонкодисперсні фракції шламів коксівного вугілля з одержанням відносно низькозольних концентратів, які можуть бути присаджені до шихти.

2. Мінімальне значення зольності концентрату одержують при витратах реагенту близько 2 %, дальності гідравлічного транспортування 5,5 км і концентрації гідросуміші 50 %.

Список джерел

1. Федоров В.И., Кучеренко И.П., Золотко А.А. Состояние и проблема развития углеобогащения Украины// Уголь Украины. – 1999. - № 8. – С. 13-17.
2. Білецький В.С., Сергєєв П.В., Папушин Ю.Л. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля. – Донецьк: Грань. – 1996. – 264 с.
3. Харада Т., Мацуо Т. Агломерація у рідинах// Ніхон Когьо Кайсі. - 1982. - № 1134, С. 714-722.
4. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента.- М.: Металлургия, 1981- 152 с.

6.2.14 Процес осадження твердої фази хвостів флотації рідкіснометалічних руд

Інтенсифікація процесу осадження твердої фази за рахунок застосування синтетичних високополімерних флокулянтів дозволяє не вдаючись до спорудження додаткових апаратів суттєво підвищити продуктивність згущувачів на існуючих збагачувальних фабриках та обмежитися меншою кількістю згущувачів на фабриках, що проектуються. При цьому з'являється можливість досягти значної економії на капітальних витратах та стійких параметрів згущеного продукту і зливу згущувачів [1,2].

Такий ефект досягається тим, що під дією флокулянтів змінюються поверхневі властивості твердої фази, що за сприятливих умов призводить до злипання часток твердої фази у великі агрегати, які, як відомо, осаджуються з більшою швидкістю [3]. В залежності від фізико-хімічних умов знаходження твердої фази в пульпі її поверхневі властивості можуть змінюватися. Інколи це призводить до зниження швидкості осадження твердої фази [4]. Науковою та практичною проблемою є вивчення цих умов та управління ними, що дозволить визначити раціональні режими процесу та оптимізувати витрати флокулянту, забезпечити найвищу швидкість осадження твердої фази.

Державною програмою розвитку кольорової металургії України на період до 2010 року передбачено створення вітчизняної сировинної бази рідкіснометалевої галузі за рахунок першочергового освоєння Мазурівського родовища цирконій-тантало-ніобієвих руд (маріуполітів) [5]. Рідкіснометалеві руди характеризуються низьким вмістом корисних компонентів та дуже дрібним зерном. Збагачення таких руд відбувається в середовищі, що вміщує до 80-94% води за об'ємом, вимагає більш тонкого подрібнення, більших об'ємів води та більших витрат на процеси зневоднення твердого матеріалу. Більшого значення сьогодні набувають також питання регенерації води, очистки водного середовища від шкідливих сполук та твердих речовин.

Інтенсифікація осадження твердої фази за рахунок застосування синтетичних флокулянтів дозволить обмежитися меншою кількістю згущувачів на збагачувальній фабриці, що проектується для Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча. При цьому з'являється можливість досягти стійких параметрів згущеного продукту та зливу згущувачів за мінімальних витрат досить дорогих флокулянтів [6].

Проблема оптимізації режиму осадження твердої фази та витрат флокулянту розглядалася та частково вирішена для окремих типів мінеральної сировини [7-10]. Разом з тим, сучасний рівень вивченості механізму флокуляції хоч і дає якісну характеристику процесу, та не дає кількісних залежностей, які для конкретного типу промислової пульпи характеризували б вплив основних технологічних її параметрів на швидкість осадження твердої фази, дозволяли визначити раціональні режими процесу і розрахувати оптимальні витрати флокулянту, що забезпечують найвищу швидкість осадження. При недостатньому дозуванні флокулянту злипання частинок не відбувається через малу товщину покриття частинок твердої фази; при передозуванні флокуляція не відбувається через стабілізацію пульпи. Звичайно оптимальні витрати флокулянту визначають в залежності від витрат твердої фази пульпи живлення згущувача. Але відомо, що ступінь флокуляції суттєво залежить від електрокінетичного потенціалу на поверхні частинок твердої фази, який визначається концентрацією іонів водню в рідкій фазі пульпи [11]. Тому вибір флокулянту та його витрат має бути узгодженим з мінералогічним та гранулометричним складом твердої фази, а також іонним складом рідкої фази пульпи. Цей вибір може бути обґрунтований лабораторними дослідженнями осадження пульп.

Метою даної роботи є дослідження впливу основних параметрів процесу осадження нефелін-польовошпатових (польовоскалинцевих?) хвостів основної флотажії цирконій-тантало-ніобієвої руди на швидкість осадження твердої фази та одержання математичної моделі у вигляді рівняння регресії, придатної для визначення раціональних режимів процесу і розробки системи автоматичного дозування флокулянту.

Аналіз відомих аналітичних залежностей [12] та експериментальних даних показав, що найбільш суттєвими параметрами процесу осадження є: питомі витрати флокулянту, концентрація іонів водню в рідкій фазі (рН середовища), дисперсність твердої фази пульпи та її концентрація у пульпі, а також температура пульпи, від якої залежить в'язкість і густина пульпи.

Завдання вирішували методом активного експерименту в лабораторних умовах хіміко-металургійної фабрики ММК ім. Ілліча. Лабораторні дослідження проводили за відомою методикою [13] в скляному циліндрі ємністю 500см³. Об'єктом дослідження були штучні пульпи, які готували з сухих порошків нефелін-польовошпатових хвостів колишньої збагачувальної фабрики, що переробляла руду Мазурівського родовища.

При плануванні експерименту за незалежні фактори приймали:

Q_{ϕ} – питомі витрати флокулянту, $\text{см}^3/\text{дм}^3$ пульпи;

pH – концентрація іонів водню, од.;

C – концентрація твердої фази в пульпі, %;

d – вміст класу мінус 0,063 мм в твердій фазі, %;

t – температура пульпи, $^{\circ}\text{C}$;

pH пульпи доводили до завданого значення розчином соди (Na_2CO_3).

Як флокулянт застосовували 0,1%-ий водний розчин поліакриламід (ПАА), який вводили в скляний циліндр піпеткою.

В якості цільової функції (Y , мм/с) прийнято швидкість осадження, яка визначалася згідно загальноприйнятих рекомендацій [13]. При проведенні експерименту слідкували за опусканням межі розподілу фаз в циліндрі. Час, за який межа розподілу фаз досягала контрольної позначки на шкалі циліндра, реєстрували за допомогою секундоміру. Швидкість осадження визначали за зміною часу проходження межею розподілу фаз контрольної позначки.

Експеримент поставлено за програмою центрального композиційного ротатабельного плану другого порядку Бокса-Хантера [14]. Ядро плану представлено напівреплікою 2^{5-1} ($1=X_1X_2X_3X_4X_5$). Реалізовані 16 дослідів на основних рівнях доповнені ще 10 дослідями в зіркових точках (величина зіркового плеча в цьому випадку дорівнює 2) та шістьма дослідями в центрі плану.

Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження вибрані за результатами попередніх експериментів і на основі апріорної інформації (табл.1).

Таблиця 1. – Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження

Параметр	Позначення	Код	Одиниця виміру	Інтервал	Основні рівні				
					+2	+1	0	-1	-2
Витрати флокулянту	Q_{ϕ}	X1	$\text{см}^3/\text{дм}^3$	0,05	0,20	0,15	0,10	0,05	0,00
Концентрація іонів водню	pH	X2	од.	0,80	10,0	9,20	8,40	7,60	6,80
Вміст класу мінус 0,063 мм в твердій фазі	d	X3	%	5,00	100,0	95,0	90,0	85,0	80,0
Концентрація твердої фази в пульпі	C	X4	%	5,00	30,0	25,0	20,0	15,0	10,0
Температура пульпи	t	X5	$^{\circ}\text{C}$	5,00	26,0	21,0	16,0	11,0	6,00

Область зміни незалежних факторів відповідає діапазону змін технологічних параметрів в промислових умовах згідно розробленого технологічного регламенту.

У табл.2 наведена матриця планування і результати її реалізації.

Таблиця 2

Матриця планування і результати її реалізації

№ дос- лід	X1	X2	X3	X4	X5	Y _{екс.}	Y _{розрах.}
1	+1	+1	+1	+1	+1	4,52	4,40
2	-1	+1	+1	+1	-1	2,50	2,18
3	+1	-1	+1	+1	-1	3,46	3,07
4	-1	-1	+1	+1	+1	4,41	4,18
5	+1	+1	-1	+1	-1	5,00	4,71
6	-1	+1	-1	+1	+1	4,62	4,48
7	+1	-1	-1	+1	+1	6,40	6,19
8	-1	-1	-1	+1	-1	4,88	4,47
9	+1	+1	+1	-1	-1	7,48	7,62
10	-1	+1	+1	-1	+1	7,91	8,20
11	+1	-1	+1	-1	+1	9,40	9,63
12	-1	-1	+1	-1	-1	7,44	7,46
13	+1	+1	-1	-1	+1	13,77	14,09
14	-1	+1	-1	-1	-1	8,70	8,82
15	+1	-1	-1	-1	-1	11,00	11,05
16	-1	-1	-1	-1	+1	13,70	13,91
17	-2	0	0	0	0	3,95	4,09
18	+2	0	0	0	0	5,80	5,85
19	0	-2	0	0	0	5,30	5,57
20	0	+2	0	0	0	4,30	4,21
21	0	0	-2	0	0	10,25	10,34
22	0	0	+2	0	0	5,00	4,71
23	0	0	0	-2	0	17,10	16,33
24	0	0	0	+2	0	3,60	4,56
25	0	0	0	0	-2	5,48	5,93
26	0	0	0	0	+2	10,13	9,86
27	0	0	0	0	0	7,30	7,30
28	0	0	0	0	0	7,55	7,30
29	0	0	0	0	0	7,10	7,30
30	0	0	0	0	0	6,93	7,30
31	0	0	0	0	0	7,49	7,30
32	0	0	0	0	0	7,60	7,30

Функція відгуків апроксимована поліномом другого порядку виду:

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i X_i + \sum_{1 \leq i, l \leq k} b_{il} X_i X_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} X_i^2,$$

де k – число незалежних змінних.

Обробка результатів експерименту та аналіз регресійної моделі здійснено за допомогою модуля „Планування експерименту” статистичної програми Statgraphics 3.0 Plus.

Значущість коефіцієнтів моделі визначалася за допомогою Р-рівня і наведено на стандартизованому Парето-графіку (рис.1). Вертикальна лінія на рис.1 відповідає 95% статистичній значущості коефіцієнтів.

Рівняння регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів отримало вигляд:

$$Y = 7,30 + 0,44 \cdot X_1 - 0,34 \cdot X_2 - 1,31 \cdot X_3 - 2,94 \cdot X_4 + 0,98 \cdot X_5 - 0,58 \cdot X_1^2 + 0,45 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,60 \cdot X_2^2 + 0,56 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,79 \cdot X_4^2 - 0,38 X_4 \cdot X_5$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому (кодованому) виді.

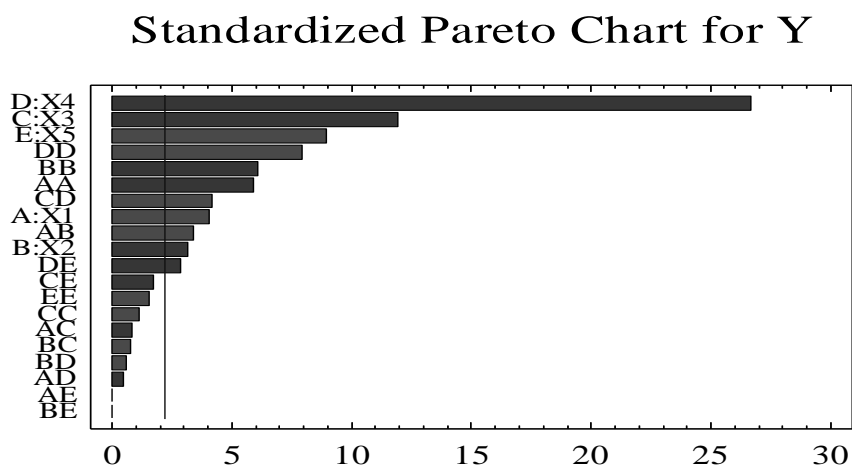


Рисунок 1 – Значущість коефіцієнтів моделі (Парето-графік)

Адекватність одержаної регресійної моделі підтверджується великим значенням коефіцієнту детермінації R-квадрат, який склав 99,044 %.

На рис.2-3 наведені найбільш характерні тривимірні перетини поверхні цільової функції та контурні криві цих поверхонь. Зупинимось на них докладніше.

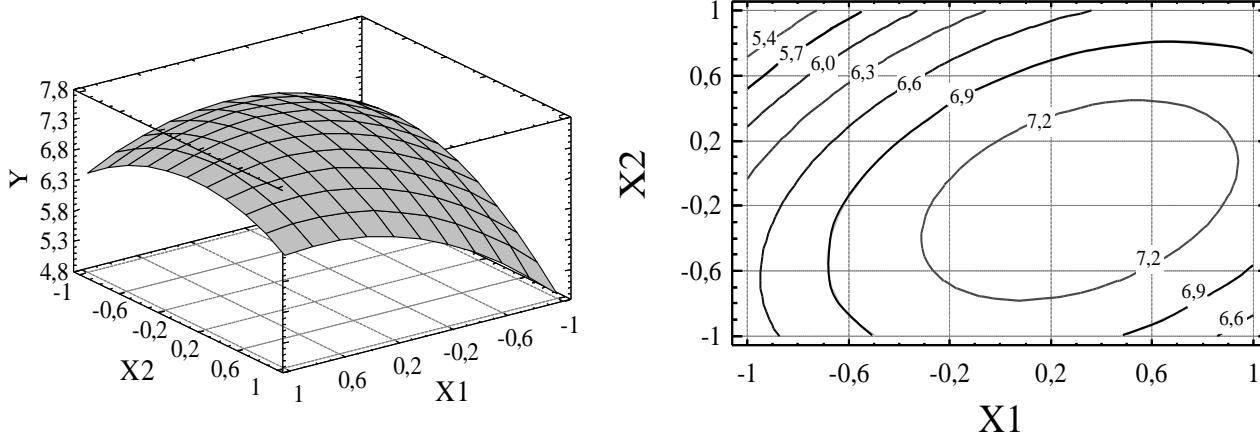


Рисунок 2 – Поверхня $Y = f(X_1, X_2)$ та її контурні криві.

Залежність $Y = f(X_1, X_2)$ має екстремальний характер з екстремумом-максимумом в області $X_1 = -0,2 \dots 0,9$; $X_2 = -0,8 \dots 0,5$ (в кодованому вигляді).

Екстремальна залежність швидкості осадження від витрат флокулянту може бути пояснена тим, що при недостатніх витратах флокулянту на поверхні частинок твердої фази утворюється плівка замалої товщини, а при передозуванні флокулянту настає стабілізація пульпи [3].

Екстремальний характер залежності швидкості осадження від величини рН середовища пов'язаний, на нашу думку, із загальновизнаним механізмом дії електроліту на подвійний електричний шар (ПЕШ) на поверхні частинок. Спочатку, зі збільшенням рН спостерігається стиснення дифузної частинки ПЕШ за рахунок переходу протиіонів у внутрішню обкладинку. Це, очевидно, полегшує закріплення і флокулюючу дію реагенту. Подальше збільшення рН

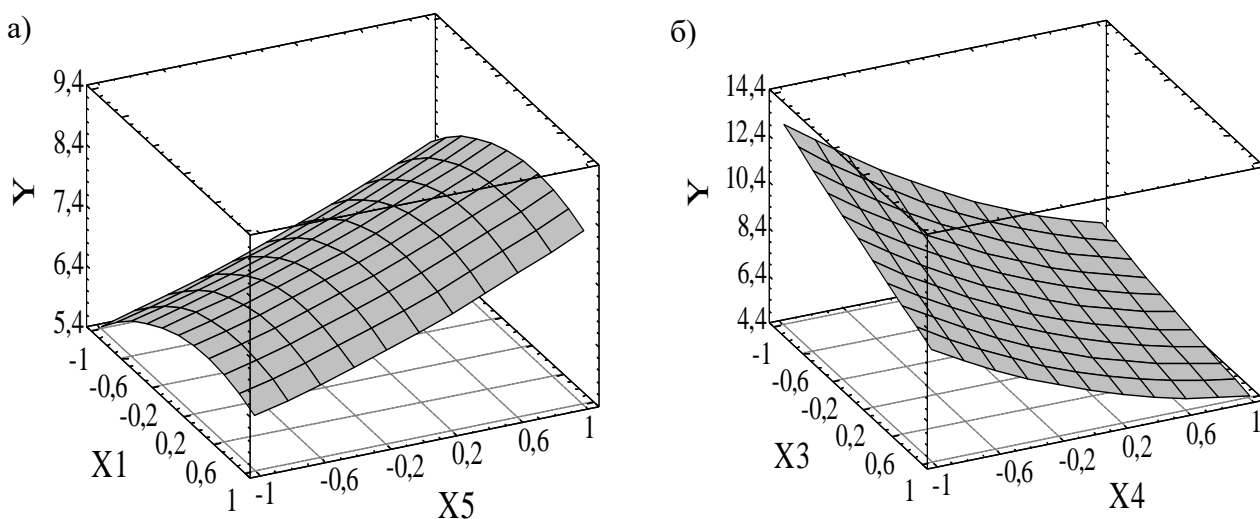


Рисунок 3 – Графіки поверхонь $Y = f(X_1, X_5)$ та $Y = f(X_3, X_4)$

супроводжується перезарядкою поверхні частинки. При цьому умови закріплення реагенту погіршуються і ефект флокуляції дещо знижується.

На рис.3а проілюстровано вплив температури пульпи на процес осадження. З підвищенням температури у всьому визначеному діапазоні факторного простору спостерігається збільшення швидкості осідання твердої фази, що обумовлено, на нашу думку, зниженням в'язкості суспензії та її густини.

Як видно з рис.3б зростання вмісту класу мінус 0,063мм у твердій фазі вихідного матеріалу та зростання концентрації твердої фази приводить до зниження швидкості осадження твердої фази.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 18

РОЗРАХУНОК ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАКТУ БУРОВОГО РОЗЧИНУ

Для проведення досліджень розрахуємо фізичну модель тракту бурового розчину що тече по трубопроводу у бак кондиційного розчину.

Поведінка потоку в даному випадку може бути описана рівнянням Нав'є-Стокса і рівнянням нерозривності. Розглянемо випадок одномірного руху:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \bar{X} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \mathcal{G} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0. \end{cases}$$

Перший член рівняння Нав'є-Стокса при сталому русі дорівнює нулю $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = 0$, рівняння нерозривності $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0$ також додаткових умов не вносить. Перепишемо перше рівняння у безрозмірній формі:

$$\frac{V_0^2}{l_0} \cdot \bar{u}' \frac{\partial \bar{u}'}{\partial \bar{x}'} = g_0 \bar{X}' - \frac{p_0}{\rho_0 l_0} \cdot \frac{1}{\bar{\rho}'} \cdot \frac{\partial \bar{p}'}{\partial \bar{x}'} + \frac{\mathcal{G}_0 u_0}{l_0^2} \cdot \bar{g}' \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial \bar{x}'^2}.$$

Після перетворення маємо:

$$\bar{u}' \frac{\partial \bar{u}'}{\partial \bar{x}'} = \frac{Ga}{Re^2} \cdot \bar{X}' - Eu \cdot \frac{1}{\bar{\rho}'} \cdot \frac{\partial \bar{p}'}{\partial \bar{x}'} + \frac{1}{Re} \cdot \bar{g}' \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial \bar{x}'^2}.$$

Таким чином, маємо три критерії подібності: Галілея $Ga = \frac{gl^3}{\mathcal{G}^2}$, Ейлера

$Eu = \frac{p}{\rho V^2}$ і Рейнольдса $Re = \frac{Vl}{\mathcal{G}}$. Отже швидкість потоку є функцією п'яти параметрів:

$$u = f(\rho, \mathcal{G}, p, V, l).$$

Перевіряємо, чи достатня кількість критеріїв подібності, для чого записуємо розмірності усіх величин, що входять у три критерії, що отримані: $[\rho] = [\text{кг}/\text{м}^3]$; $[\mathcal{G}] = [\text{м}^2/\text{с}]$; $[p] = [\text{Па}] = [\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2]$; $[V] = [\text{м}/\text{с}]$; $[l] = [\text{м}]$.

Основних розмірних величин $m = 3$ (кг, м, с); число критеріїв подібності повинно бути:

$$n = k + 1 - m,$$

де k – число параметрів, від яких залежить швидкість потоку u , у цьому прикладі $k = 5$, це ρ, ϑ, p, V, l , тоді $n = 5 + 1 - 3 = 3$. Тобто рішення правильне і кількість критеріїв подібності достатня для розрахунку моделі.

Величини показників тракту бурового розчину (натури) наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Величини показників тракту бурового розчину (натури)

Показник	Позначення	Од. вимір.	Величина
Густина бурового розчину	ρ_n	кг/м ³	1800
Кінематичний коефіцієнт в'язкості бурового розчину	ϑ_n	м ² /с	$1,15 \cdot 10^{-6}$
Лінійний розмір (діаметр трубопроводу)	l_n	м	0,15
Швидкість течії бурового розчину в трубопроводі	V_n	м/с	3,0
Тиск у трубопроводі	p_n	МПа	0,2

Розрахунок моделі виконується з урахуванням рівності критеріїв подібності натури і моделі. Як моделюючу рідину вибираємо, наприклад, гас з густиною $\rho_m = 800$ кг/м³ і кінематичною в'язкістю $\vartheta_m = 0,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Результати розрахунку масштабних коефіцієнтів для побудови моделі наведені в табл. 2.

Таблиця 2. – Результати розрахунку масштабних коефіцієнтів

Параметр, що моделюється	Позначення	Звідки отримано	Масштабний коефіцієнт	
			Формула	Величина
Фізичні властивості	ρ	Фізичні властивості натури і моделі	$m_\rho = \frac{\rho_n}{\rho_m}$	0,44
	ϑ		$m_\vartheta = \frac{\vartheta_n}{\vartheta_m}$	0,69
Лінійний розмір (діаметр трубо-	l	Із: Ga :	$m_l = m_\vartheta^{2/3}$	0,78

проводу)		$\left(\frac{gl^3}{\varrho^2}\right)_H = \left(\frac{gl^3}{\varrho^2}\right)_M$		
Швидкість течії	V	Із: $Re: \left(\frac{Vl}{\varrho}\right)_H = \left(\frac{Vl}{\varrho}\right)_M$	$m_V = m_\varrho \cdot m_l^{-1}$	0,88
Тиск у трубопроводі	p	Із: $Eu: \left(\frac{p}{\rho V^2}\right)_H = \left(\frac{p}{\rho V^2}\right)_M$	$m_p = m_\rho \cdot m_V^2$	0,62

З урахуванням масштабних коефіцієнтів виконується розрахунок параметрів моделі (табл. 3), її побудова і проведення для неї необхідного комплексу досліджень.

Таблиця 3 – Величини показників моделі

Показник	Позначення	Од. вимір.	Величина
Густина рідини	ρ_M	кг/м ³	800
Кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини	ϱ_M	м ² /с	$0,8 \cdot 10^{-6}$
Лінійний розмір (діаметр трубопроводу)	l_M	м	0,12
Швидкість течії рідини в трубопроводі	V_M	м/с	2,64
Тиск в трубопроводі	p_M	МПа	0,12

ПРАКТИЧНА РОБОТА 19

МЕТОД АНАЛІЗУ РОЗМІРНОСТЕЙ

Визначимо функціональну залежність для сили опору F ($\text{H} = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$), яку випробує пластина при обтіканні її рідиною у повздовжньому напрямку.

Функціональну залежність сили опору можна представити у вигляді функції від ряду незалежних змінних і визначити її в критеріях подібності:

$$F = f(V, S, \rho, \mu, g, p, \frac{a}{L}, \beta),$$

де V – швидкість обтікання, $\text{м}/\text{с}$; S – площа пластини, м^2 ; ρ – густина рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, $\text{Па} \cdot \text{с}$ ($[\text{Па} \cdot \text{с}] = \text{кг}/\text{м} \cdot \text{с}$);

g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; p – тиск, Па ($\text{Па} = \text{кг}/\text{м} \cdot \text{с}$); $\frac{a}{L}$ – відношення висоти пластини до її довжини; β – кут нахилу пластини до напрямку потоку.

Таким чином, величини $\frac{a}{L}$ і β – безрозмірні, інші шість – розмірні, три з них: V , S і ρ прийняті за основні. У відповідності до π -теореми тут можливі тільки три безрозмірних співвідношення, отже:

$$\pi = f(1, 1, 1, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \frac{a}{L}, \beta)$$

або

$$\frac{F}{V^x S^y \rho^z} = f\left(1, 1, 1, \frac{\mu}{V^{x_1} S^{y_1} \rho^{z_1}}, \frac{g}{V^{x_2} S^{y_2} \rho^{z_2}}, \frac{p}{V^{x_3} S^{y_3} \rho^{z_3}}, \frac{a}{L}, \beta\right).$$

Враховуючи рівність розмірностей для чисельника і знаменника, знайдемо показники степенів для сили опору:

$$[F] = [V^x S^y \rho^z]$$

або

$$\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2 = (\text{м}/\text{с})^x (\text{м}^2)^y (\text{кг}/\text{м}^3)^z,$$

звідки

$$1 = z \text{ (показники ліворуч і праворуч при } \text{кг});$$

$$-2 = -x \text{ (показники ліворуч і праворуч при } \text{с});$$

$$1 = x + 2y - 3z \text{ (показники ліворуч і праворуч при } \text{м}).$$

Рішення цих рівнянь дає: $x = 2$; $y = 1$; $z = 1$.

Функціональна залежність:

$$\pi = \frac{F}{V^2 S \rho} .$$

Аналогічно одержимо:

– для в'язкості:

$$[\mu] = [V^{x_1} S^{y_1} \rho^{z_1}]$$

маємо $x_1 = 1$; $y_1 = 0,5$; $z_1 = 1$.

Функціональна залежність:

$$\pi_4 = \frac{\mu}{V \rho \sqrt{S}} ;$$

– для прискорення вільного падіння:

$$[g] = [V^{x_2} S^{y_2} \rho^{z_2}]$$

маємо $x_2 = 2$; $y_2 = -0,5$; $z_2 = 0$.

Функціональна залежність:

$$\pi_5 = \frac{g \sqrt{S}}{V^2} ;$$

– для тиску:

$$[p] = [V^{x_3} S^{y_3} \rho^{z_3}]$$

маємо $x_3 = 2$; $y_3 = 0$; $z_3 = 1$.

Функціональна залежність:

$$\pi_6 = \frac{p}{V^2 \rho} .$$

Очевидно, що $\pi_4 = Re$, $\pi_5 = Fr$, $\pi_6 = Eu$. Тоді шукана функціональна залежність має вигляд:

$$\frac{F}{V^2 S \rho} = f(Re, Fr, Eu, \frac{a}{L}, \beta).$$

Звідси можна зробити висновок, що після дослідження даного процесу при деяких розмірах, швидкостях і т.п., можна встановити як він буде

протікати при інших розмірах і швидкостях у тому випадку, якщо безрозмірні відношення, складені з цих змінних, для обох випадків будуть однакові. Отже, висновки, отримані при експериментах з тілами даних розмірів, що рухаються з даною швидкістю і т.п., будуть, очевидно, справедливі і для будь-яких інших розмірів тіла, швидкості і т.д. за умови рівності безрозмірних відношень π з тими, що спостерігалися при експериментах.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 20

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІШАЛКИ

На основі попередніх досліджень на лабораторному пристрої визначимо функціональну залежність потужності N ($\text{Вт} = \text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3$) електродвигуна мішалки, яка необхідна для перемішування пульпи з реагентами у контактному чані.

Для подібності двох змішувальних систем потрібно:

– геометрична і гранична подібність, при якій відношення величин для систем, що розглядаються повинні бути рівні між собою;

– кінематична подібність, де швидкості у відповідних точках повинні бути у такому ж відношенні, як і швидкості у інших відповідних точках, тобто шляхи руху пульпи повинні бути подібними;

– динамічна подібність, яка вимагає, щоб відношення сил у відповідних точках було б рівним відношенню сил в інших відповідних точках.

Якщо граничні умови фіксовані, можна подати одну змінну величину через інші змінні, тобто функціональну залежність потужності електродвигуна мішалки можна представити у вигляді функції від ряду незалежних змінних величин і визначити її в критеріях подібності:

$$N = f(D, \rho, \omega, \mu, g),$$

де D – діаметр мішалки, м; ρ – густина пульпи, $\text{кг}/\text{м}^3$; ω – швидкість обертання мішалки, с^{-1} ; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, $\text{Па} \cdot \text{с}$ ($\text{Па} \cdot \text{с} = \text{кг}/\text{м} \cdot \text{с}$); g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$ кут нахилу пластини до напрямку потоку.

Таким чином, маємо п'ять розмірних величин, три з них: D , ρ і ω прийняті за основні. У відповідності до π -теореми тут можливі тільки два безрозмірних співвідношення, отже:

$$\pi = f(1, 1, 1, \pi_4, \pi_5)$$

або

$$\frac{N}{D^x \rho^y \omega^z} = f\left(1, 1, 1, \frac{\mu}{D^{x_1} \rho^{y_1} \omega^{z_1}}, \frac{g}{D^{x_2} \rho^{y_2} \omega^{z_2}}\right).$$

Враховуючи рівність розмірностей для чисельника і знаменника, знайдемо показники степені для потужності електродвигуна мішалки :

$$[N] = [D^x \rho^y \omega^z]$$

або

$$kz \cdot m^2 / c^3 = (m)^x (kz / m^3)^y (1/c)^z,$$

звідки

$$3 = z \text{ (показники ліворуч і праворуч при } c);$$

$$1 = y \text{ (показники ліворуч і праворуч при } kz);$$

$$2 = x - 3y \text{ (показники ліворуч і праворуч при } m).$$

Рішення цих рівнянь дає: $x = 5$; $y = 1$; $z = 3$.

Функціональна залежність:

$$\pi = \frac{N}{D^5 \rho \omega^3}.$$

Аналогічно одержимо:

– для в'язкості:

$$[\mu] = [D^{x_1} \rho^{y_1} \omega^{z_1}]$$

маємо $x_1 = 2$; $y_1 = 1$; $z_1 = 1$.

Функціональна залежність:

$$\pi_4 = \frac{\mu}{D^2 \rho \omega};$$

– для прискорення вільного падіння:

$$[g] = [D^{x_2} \rho^{y_2} \omega^{z_2}]$$

маємо $x_2 = 1$; $y_2 = 0$; $z_2 = 1$.

Функціональна залежність:

$$\pi_5 = \frac{g}{D \omega^2};$$

Очевидно, що $\pi_4 = D^2 \cdot \text{Re}$, $\pi_5 = Fr$. Тоді шукана функціональна залежність має вигляд:

$$\frac{N}{D^5 \rho \omega} = f(D^2 \text{Re}, Fr).$$

Звідси можна зробити висновок, що після знаходження функціональної залежності потужності електродвигуна мішалки при деяких її пара-

метрах, можна встановити якою вона буде й при інших розмірах і швидкостях і т.п. у тому випадку, якщо безрозмірні відношення для обох випадків будуть однакові. Отже, висновки, отримані на експериментальному пристрої будуть справедливими і для будь-яких інших при умові рівності безрозмірних відношень π з тими, що спостерігалися при експериментах.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 21

Гідравлічний розрахунок як основа аналітичної моделі трубопровідного транспорту²

Формули для гідравлічного розрахунку процесу трубопровідного транспорту гідросуміші (бурові і тампонажні розчини):

$$\text{Об'ємна концентрація гідросуміші } S = \frac{V_S}{V_S + V_0} = \frac{\frac{G_S}{\rho_S}}{\frac{G_S}{\rho_S} + q_0} = \frac{\rho_{cm} - \rho_0}{\rho_S - \rho_0} \quad (5.4)$$

$$\text{Масова концентрація гідросуміші } C = \frac{G_S}{G_S + G_0} = \frac{\rho_{cm} - \rho_0}{\rho_S - \rho_0} \cdot \frac{\rho_S}{\rho_{cm}} \quad (5.5)$$

$$\text{Густина гідросуміші } \rho_{cm} = \rho_0 + S(\rho_S - \rho_0)$$

Продуктивність гідротранспортної системи (ГТС):

$$Q_{cm} = V_S + V_0 \quad (5.6)$$

Гідравлічна крупність (для бурового і тампонажного розчинів) – кінцева швидкість вільного падіння окремої зернини під дією сили тяжіння у практично незбуреному (спокійному) середовищі.

При турбулентному падінні у рідині великих кулеподібних частинок діаметром більше 2,5 мм при $Re > 240$ гідравлічну крупність розраховують за формулою Рітгінгера:

$$w = \sqrt{\frac{2gd_{cp}(\rho_S - \rho_0)}{1,75\rho_0}} = 0,105\sqrt{d_{cp}(\rho_S - \rho_0)} \quad (5.7)$$

Для великих частинок будь-якої форми рекомендують формулу П.Е.Смолдирєва:

$$w = \sqrt{\frac{2gd_{cp}(\rho_S - \rho_0)}{3\rho_0\psi}} \quad (5.8)$$

Ефективна в'язкість несучого середовища.

При $d < 0,15$ мм і $S = 0,1-0,2$ загальна ефективна в'язкість несучого середовища:

$$\begin{aligned} \mu_c &= \mu_n + \mu_{ст}; \mu_n = \mu_0(1 + 2,5S) \\ \text{при } S > 0,1 \quad \mu_n &= \mu_0(1 + 2,5S + 10,05S^2 + 0,0027e^{16,6S}) \quad e = 2,718 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Нормальна в'язкість несучих середовищ, схильних до структуроутворення:

$$\mu_n = \mu_0 \frac{1}{(1 - 1,35S)^{2,5}} \quad (5.10)$$

² Нумерація формул збережена за посібником Білецький В.С. Моделювання у нафтогазовій інженерії (Навчальний посібник) – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 328 с.

Питомий гідравлічний опір при транспортуванні води, флюїду, пульпи:

$$i_o = \lambda_0 \frac{u^2}{2gD} \quad (5.11)$$

Коефіцієнт опору для гідравлічно гладких труб:

$$\lambda_0 = \frac{1,1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2} \cdot \quad (5.12)$$

Коефіцієнт опору для шорстких труб:

$$\lambda_0 = 0,24 \left(\frac{1,9 \cdot 10^6}{D} + \frac{1}{Re} \right)^{0,226} \quad (5.13)$$

При наявності зазорів у стиках та недостатній відшліфованості (експлуатація менше 100-150 годин):

$$\lambda_0 = \frac{1}{\left(1,8 \lg \frac{Re}{10}\right)^2} = \frac{0,309}{(\lg Re - 1)^2} \cdot \quad (5.14)$$

Згідно узагальнених експериментальних даних поверхня труб після транспортування гідросумішей протягом 100-150 годин набуває гідравлічно гладкого стану.

Для нових шорстких та дуже кородованих труб (формула Ф.А. Шевельова):

$$\lambda_0 = \frac{0,0159}{D^{0,226}} \left(1 + \frac{0,684}{u} \right)^{0,226} \quad (5.15)$$

У транспортних трубопроводах, армованих базальтовими вкладками, гідравлічні опори приймають як мінімум на 50 % вище ніж у гідравлічно гладких трубах того ж діаметра.

Коефіцієнт гідравлічного опору для будь-якого стану внутрішньої поверхні труб можна визначити за допомогою формули А.Д. Альтшуля:

$$\lambda_0 = 0,11 \left(\frac{K_e}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,28} \quad (5.16)$$

де K_e – еквівалентна рівнозначна шорсткість – висота виступів шорсткості складена з піщинок однакового розміру, яка відповідає однаконому з заданою шорсткістю значенню коефіцієнта гідравлічного опору тертя λ_0 (табл.16 у Додатках).

Число Рейнольдса – міра відношення сили інерції до сили внутрішнього в'язкого тертя в потоці (сили в'язкості):

$$Re = \frac{\rho l^2 u^2}{\mu \nu l} = \frac{\rho l u}{\mu} \text{ або } Re = \frac{u D}{\nu} \cdot \quad (5.17)$$

де ρ – густина рідини, кг/м³; l – характерний лінійний розмір впоперек потоку, м; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини (газу), Па·с; u – середня швидкість потоку, м/с; d – внутрішній діаметр труби, м; ν – кінемати-

чний коефіцієнт в'язкості рідини (газу), м²/с. Кінематична в'язкість води при температурі t = 20 °С: $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Для в'язко-пластичних рідин число Рейнольдса є мірою відношення сил інерції до сил пластичності:

$$Re' = \frac{\rho l^2 v^2}{\tau_0 l^2} = \frac{\rho v^2}{\tau_0} \quad \text{або} \quad Re = \frac{Re}{1 + \frac{\tau_0 d}{6\mu v}} \quad (5.18)$$

де τ_0 – динамічна напруга зсуву, Н/м².

Критичне число Рейнольдса – границя стійких режимів руху ньютонівських рідин, абсолютне визначення якої залежить від ступеня деформації русла, а саме: а) для круглих циліндричних труб $Re_{кр} = 2300-2320$; б) чим більший ступінь деформації русла, тим менша абсолютна значина критичного числа Рейнольдса $Re_{кр}$.

*Теоретичні викладки для гідравлічного розрахунку процесу трубопровідного транспорту нафти, газу та комплексних сумішей, які складають основу відповідних **аналітичних моделей** подані в спеціальній літературі*

ПРАКТИЧНА РОБОТА 22

АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАФТОПРОВОДУ

Мета: Розробка моделі визначення пропускної здатності ділянки нафтопроводу.

Умови: Для реалізації заданого режиму роботи потрібно знайти різницю між загальними втрати напору в трубопроводі та напору, що розвивають насоси нафтоперекачувальної станції (НПС). Якщо загальні втрати напору в трубопроводі перевищують напір, що розвивається насосами НПС, то реалізація заданого режиму перекачування є неможливою. Якщо загальні втрати напору в трубопроводі перевищують максимально припустимий напір, то реалізувати заданий режим перекачування також неможливо. Якщо різниця напору НПС і загальних втрат напору перевищує напір одного насоса H_0 , то зменшуємо необхідне число послідовно працюючих насосів і повторюємо розрахунки.

Моделювання: Надлишок напору НПС, що підлягає регулюванню дорівнює:

$$H_{\text{перег}} = H_{\text{НСі}} - H_{\text{обі}} \quad (\text{П1})$$

де, $H_{\text{НСі}}$ - напір нафти на виході останнього насоса, м (в групі послідовно працюючих);

$H_{\text{обі}}$ - загальні втрати напору на досліджуваній ділянці нафтопроводу, м.

Знаходимо напір нафти на виході останнього, в групі послідовно працюючих, насосів НПВ 3600-90 по формулі³ $H_n = 129 - 40 Q^2$:

$$H_{\text{НСі}} = (129 + 3 \times 310) - (40 + 3 \times 78) \times 0,58333^2 = 965 \text{ м.}$$

Визначаємо загальні втрати напору на досліджуваній ділянці нафтопроводу:

$$H_{\text{обі}} = 1,02 H_{\text{Ті}} + \Delta z + H_{\text{К}}, \quad (\text{П2})$$

де, Δz - різниця геодезичних оцінок кінця і початку трубопроводу, 111м;

$H_{\text{К}}$ - прийнятий напір наприкінці ділянки трубопроводу, 40м;

$H_{\text{Ті}}$ - формула Дарсі-Вейсбаха, втрати напору на тертя, м.

За формулою Дарсі-Вейсбаха знаходимо втрати напору на тертя:

$$H_{\text{Ті}} = \lambda_i \frac{L}{D} \frac{W^2}{2g}, \quad (\text{П3})$$

де, λ_i - коефіцієнт гідравлічного опору;

L – довжина ділянки нафтопроводу, 70000м;

D – внутрішній діаметр ділянки нафтопроводу, 0,759м;

W – середня швидкість руху нафти в трубопроводі, м/с;

g – прискорення вільного падіння, 9,81м/с².

Коефіцієнт гідравлічного опору розраховують за формулою Блазіуса:

$$\lambda_i = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (\text{П4})$$

де, Re – число Рейнольдса.

Значення числа Рейнольдса в нафтопроводі дорівнює:

$$Re = \frac{WD}{\nu_i}. \quad (\text{П5})$$

де, ν_i – розрахункова в'язкість, 13,9 сСт.

Розрахункову в'язкість визначаємо за формулою Рейнольдса – Філонова:

³ На основі рівняння напірної характеристики насоса

$$v_i = v_1 e^{-u(t_2 - t_1)}, \quad (\text{П6})$$

де, t_1, t_2 – температура нафти в точці; U – коефіцієнт крутості віскограми, 1/град.
Обчислимо коефіцієнт крутості віскограми за формулою:

$$U = \frac{1}{t_1 - t_2} \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad (\text{П7})$$

де, t_1, t_2 - значення температур, при яких відома в'язкість нафти;
 v_1, v_2 - відповідні значення кінематичної в'язкості нафти, 13,9 сСт; 40,9 сСт.
Визначаємо середню швидкість руху нафти в трубопроводі:

$$W = \frac{4Q}{\pi D^2}, \quad (\text{П8})$$

де, Q - секундна продуктивність ділянки нафтопроводу, 0,58333 м³/с.

Розрахунок по розробленій моделі визначення пропускної здатності ділянки нафтопроводу

Для реалізації наведеного вище алгоритму розроблена стандартизована програма мовою **BASIC**. Це циклічна розгалужена програма, що забезпечує виконання всіх необхідних обчислень.

Отже, можемо розрахувати надлишок напору НПС.

Обчислимо коефіцієнт крутості віскограми за формулою П7:

$$U = \frac{1}{20 - 5,8} \ln \frac{40,9}{13,9} = 0,07600 \frac{1}{град}$$

Визначимо середню швидкість руху нафти в трубопроводі за формулою П8:

$$W = \frac{4 \times 0,58333}{\pi \times 0,759^2} = 1,28993 \text{ м/с.}$$

Розрахункову в'язкість визначаємо по формулі Рейнольдса-Філонова (П6):

$$v_i = 13,9 e^{-0,076(2,2 - 20)} = 53,76856 \text{ сСт}$$

Знаходимо значення числа Рейнольдса в нафтопроводі за формулою П5:

$$Re_i = \frac{1,28993 \times 0,759}{53,76856 \times 10^{-6}} = 18218.$$

Коефіцієнт гідравлічного опору визначений за формулою Блазіуса (П4):

$$\lambda_i = \frac{0,3164}{18218^{0,25}} = 0,02724$$

За формулою Дарсі-Вейсбаха знаходимо втрати напору на тертя (П3):

$$H_{Ti} = 0,02724 \times \frac{70000 \times 1,28993^2}{0,759 \times 2 \times 9,81} = 213 \text{ м.}$$

За формулою (П2) визначаємо загальні втрати на досліджуваній ділянці нафтопроводу:

$$H_{обі} = 1,02 \times 213 + 111 + 40 = 368 \text{ м.}$$

У нашому випадку різниця напору НПС $H_{НСі} = 965$ м і загальних втрат напору $H_{обі} = 368$ м перевищує напір одного насоса $H_0 = 283$ м, тому зменшуємо необхідне число послідовно працюючих насосів: $r_i = 3 - 1 = 2$

Знаходимо напір нафти на виході останнього з групи послідовно працюючих насосів:

$$H_{НСі} = (129 + 2 \times 310) - (40 + 2 \times 78) \times 0,583332 = 682 \text{ м.}$$

У нашому випадку різниця напору НПС $H_{НСі} = 682$ м і загальних втрат напору $H_{обі} = 368$ м перевищує напір одного насоса $H_0 = 283$ м, тому ще раз зменшуємо необхідне число послідовно працюючих насосів: $r_i = 2 - 1 = 1$

Знаходимо напір нафти на виході останнього в групі послідовно працюючих насосів:

$$H_{НСі} = (129 + 1 \times 310) - (40 + 1 \times 78) \times 0,583332 = 399 \text{ м.}$$

Після визначення необхідного числа послідовно працюючих насосів знаходимо надлишок напору НПС, що підлягає регулюванню (формула П1):

$$H_{регі} = 399 - 368 = 31 \text{ м.}$$

Аналіз результатів розрахунку пропускної здатності ділянки нафтопроводу з урахуванням сезонних змін параметрів перекачки нафти

У результаті розрахунків з'ясувалося, що загальні втрати напору в трубопроводі не перевищують напір, що розвивають насоси НПС, тобто

$H_{обі} < H_{НСі}$ ($368 \text{ м} < 399 \text{ м}$), і реалізація заданого режиму перекачування є можливою, також загальні втрати напору в трубопроводі не перевищують максимально припустимий напір, тобто $H_{обі} < H_{допі}$ ($368 \text{ м} < 591 \text{ м}$).

Оскільки розрахунок вівся в найгірших умовах перекачування з найнижчою температурою для січня, то в результаті розрахунків з'ясовано, що для перекачування заданої витрати $Q_г = 2100 \text{ м}^3/\text{г}$ досить тільки одного магістрального насоса і для всіх наступних місяців.

Використовуючи програму **fpons11**, виконуємо гідравлічні розрахунки ділянки нафтопроводу „Кременчук-Пролетарська” при витраті нафти $Q_г = 2100 \text{ м}^3/\text{г}$. Отримані результати оформляємо у вигляді технологічних карт режимів роботи досліджуваної ділянки нафтопроводу (Таблиця П1).

Таблиця П1. Технологічні карти режимів роботи досліджуваної ділянки нафтопроводу

Місяць	Розрахункова в'язкість нафти, ν , сСт	Число послідовно працюючих насосів, r	Напір на виході насосів НПС, $H_{НС}$, м	Загальні втрати напору $H_{об}$, м	Тиск після регулятора $P_{ГР}$, МПа	Надлишок напору насосів НПС, $H_{рег}$, м
Січень	53,77	1	399	368	3,17	31
Лютий	49,08	1	399	363	3,12	36

Березень	37,90	1	399	350	3,00	49
Квітень	36,21	1	399	348	2,98	51
Травень	34,08	1	399	345	2,95	54
Червень	26,72	1	399	333	2,85	66
Липень	23,30	1	399	327	2,79	72
Серпень	21,93	1	399	325	2,77	74
Вересень	35,67	1	399	347	2,97	52
Жовтень	40,90	1	399	354	3,04	45
Листопад	46,18	1	399	360	3,10	39
Грудень	52,16	1	399	366	3,15	32

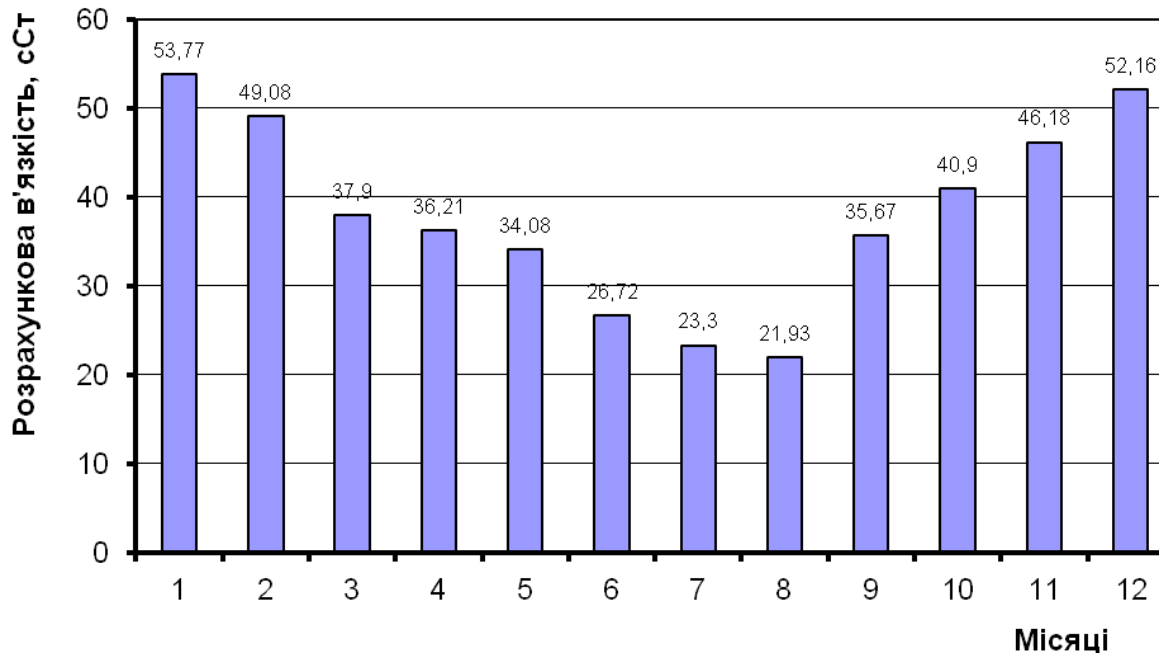


Рисунок ПІ - Зміна розрахункової в'язкості нафти протягом року

ПРАКТИЧНА РОБОТА 23

МОДЕЛЮВАННЯ ГВИНТОВОГО ВИБІЙНОГО ДВИГУНА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МОДУЛЯ FLOW SIMULATION РЕСУРСУ SOLIDWORKS⁴

У розглядуваному прикладі для моделювання взято вибійний гвинтовий двигун виробництва компанії Wenzel Downhole Tools (Канада) діаметром 171 мм, який застосований, зокрема, при бурінні Гнідинцівського нафтового родовища (Глинсько-Солохівське газонафтоносний район Східного нафтогазоносного регіону України).

При дослідженні ГВД прийняті такі характеристики бурового розчину: густина – 1100 кг/м^3 , динамічна в'язкість – $0,02 \text{ Па}\cdot\text{с}$., питома теплоємність $4,2 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, теплопровідність суспензії $0,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Режимні параметри роботи гвинтового двигуна: початкова температура бурового розчину 30°C , тиск на вході у робочу пару ГВД 24 МПа , об'ємна витрата бурового розчину 27 л/с .

Одержані результати.

Для отримання моделей параметричних полів швидкостей робочої рідини, поля тисків, дотичних напружень і температури вздовж поверхні ротора ГВД використано модуль Flow Simulation програмного середовища SolidWorks.

Одержані модельні *поля швидкостей робочої рідини в силовій секції ГВД* показані на рис. 5.22. і 5.23. На рис. 5.22.а показано одержані моделі поля швидкості в площині осьового перерізу робочої пари «ротор-статор», на рис. 5.22.б і 5.22.в – в площинах паралельних осьовому перерізу робочої пари, які проходять через характерні точки максимуму і мінімуму швидкості суспензії.

На рис. 5.23 показано локалізацію характерних точок мінімуму та максимуму швидкості руху бурового розчину та епюри швидкостей в площинах перпендикулярних осьовому перерізу робочої пари, які проходять через точки максимуму і мінімуму швидкості суспензії. Під тиском промивної рідини ротор обкочується по внутрішній поверхні

⁴ Нумерація формул збережена за посібником Білецький В.С. Моделювання у нафтогазовій інженерії (Навчальний посібник) – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 328 с.

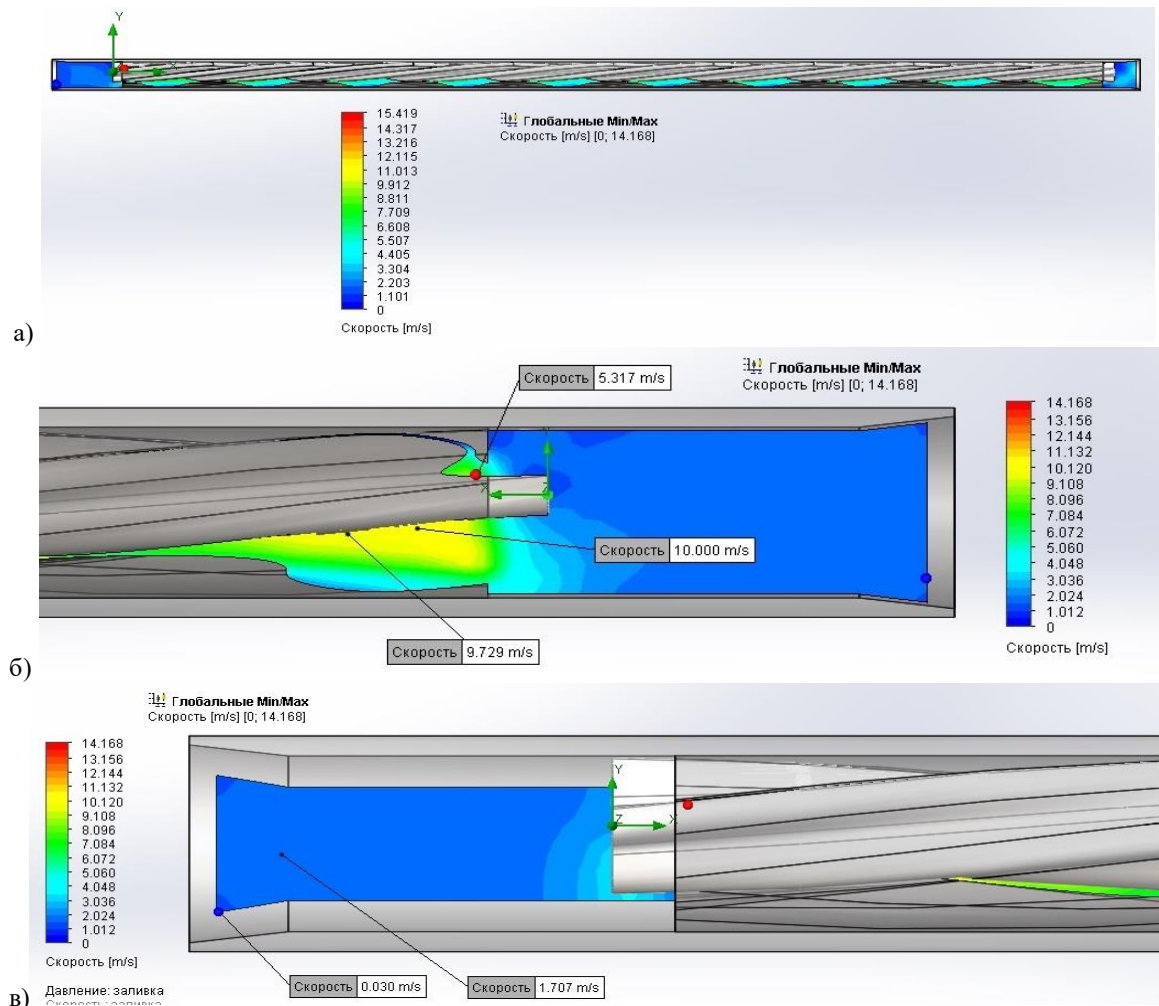


Рисунок 5.22. Модель поля швидкостей бурового розчину в площинах перерізу робочої пари «ротор – статор»: а – переріз в осьовій площині ГВД; б і в – перерізи в площинах паралельних осьовому перерізу робочої пари, які проходять через характерні точки максимуму і мінімуму швидкості суспензії

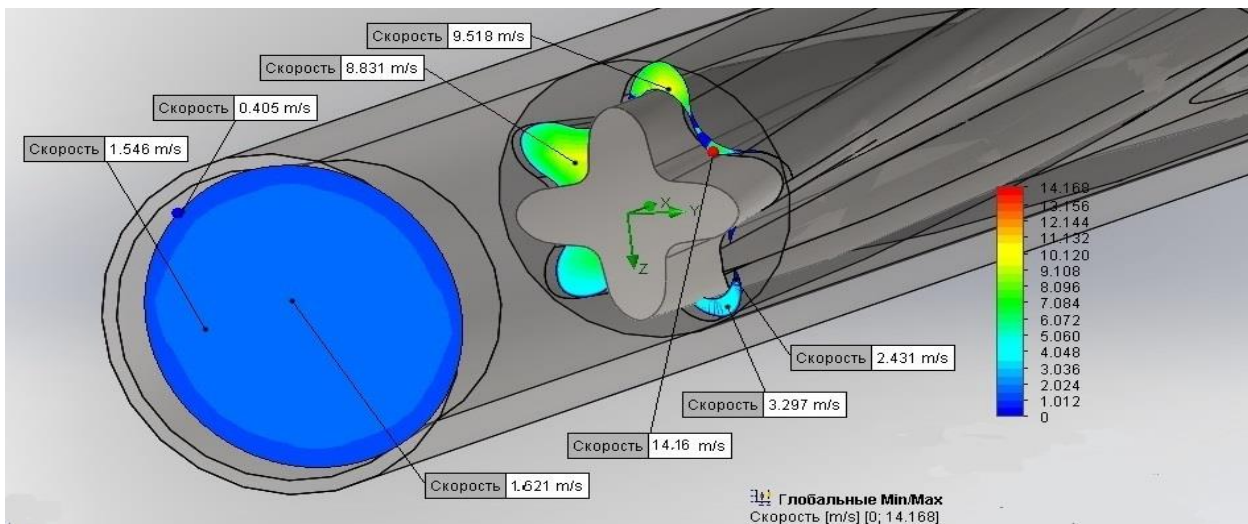


Рисунок 5.23. Модель поля швидкостей в площинах перерізу робочої пари «ротор – статор» в характерних точках максимуму та мінімуму швидкості. статора, здійснює планетарний рух, який через універсальні шарніри передається валу шпинделя, що обертає породоруйнуючий інструмент.

При цьому, як видно з епюр рис. 5.22. і 5.23., в порожнинах між ротором та статором спостерігається зміна швидкості робочої рідини від максимуму (14, 16 м/с) до мінімуму (2, 431 м/с). Найменша швидкість бурового розчину спостерігається в області входу в робочу секцію – по центру потоку 1,621 м/с, в пристінній зоні корпусу 0,405 м/с.

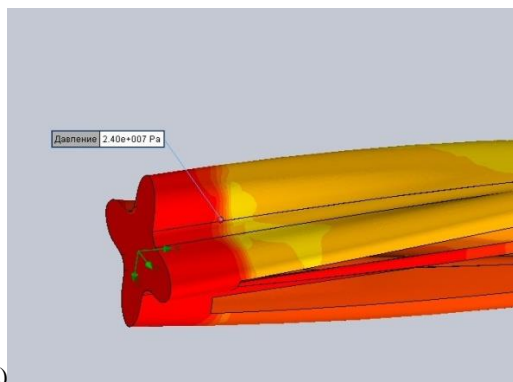
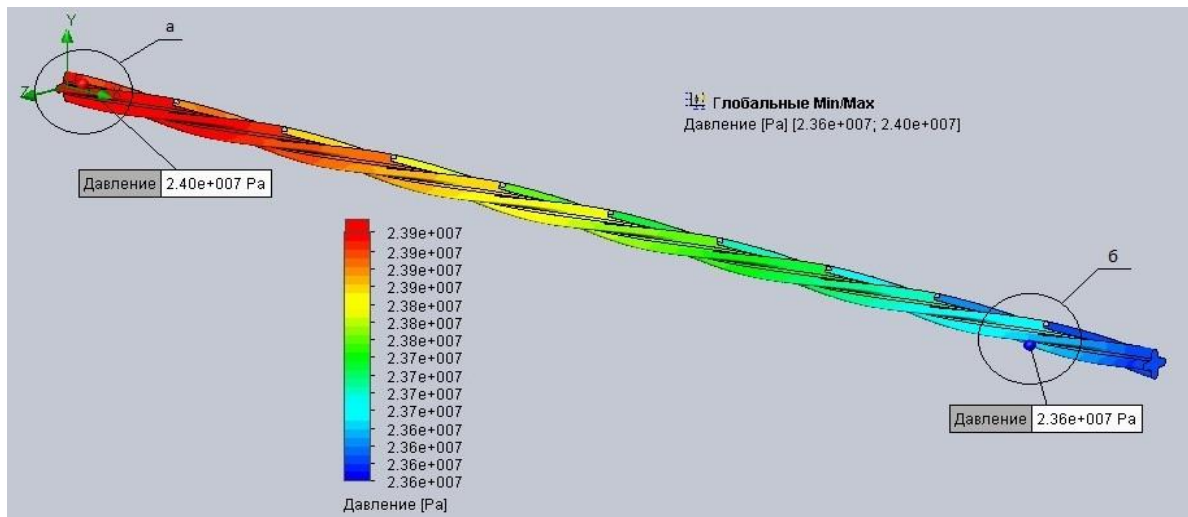
Таким чином, найбільший знос робочих поверхонь статора і ротора ГВД від твердих частинок слід очікувати в зонах максимальної швидкості потоку, яка визначає кінетичну енергію твердих зерен.

Поля тисків робочої рідини в силовій секції ГВД. На рис. 5.24. показано одержані моделі поля тисків бурового розчину на поверхні ротора – на верхньому рисунку по довжині силовій секції ГВД, Рис. 5.24. а, б – в зонах максимального (24 МПа) та мінімального тиску (23,6 МПа). Різниця обумовлена втратою напору рідини по довжині силовій секції.

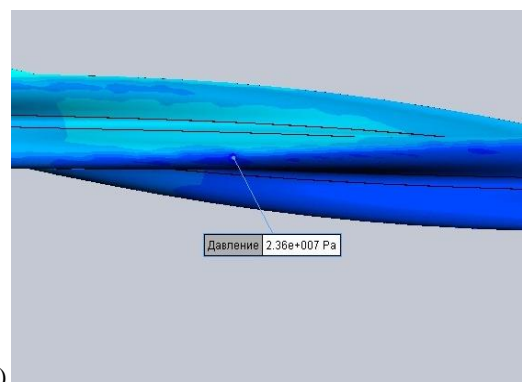
На рис. 5.25. подано одержані моделі поля тисків бурового розчину в поперечних площинах перерізу робочої пари «ротор – статор». Як і слід було очікувати, поля тисків корелюють з полями швидкостей (Рис. 5.22). Чітко простежуються порожнини високого і низького тиску, які утворюються між зубцями ротора і статора. При цьому максимальний тиск (24 МПа) спостерігається в зоні протилежній напрямку обертання ротора. Тобто, за рахунок градієнту тиску на тилу і фронтальну частину зуба ротора останній здійснює планетарний рух щодо осі статора, обкочуючись по зубам гумової обкладки. Зафіксована різниця тисків створює на роторі і статорі моменти сили, рівні за величиною і протилежні за напрямом – активний і реактивний моменти. Активний момент використовується на обертання долота, реактивний момент сприймається колоною бурильних труб і гаситься на стінках свердловин і в приводних механізмах, розміщених на поверхні.

Поля температури бурового розчину в силовій секції ГВД.

На рис. 5.26.а показано одержані моделі поля температури бурового розчину на поверхні ротора ГВД. На рис. 5.26б і 5.26в – температури бурового розчину в площинах паралельних осьовому перерізу робочої пари, які проходять відповідно через характерні точки максимуму і мінімуму температури суспензії. Як бачимо, діапазон температур бурового розчину в силовій секції ГВД досить великий – від 30°C до 144,58°C. Причини нагрівання бурового розчину потребують додаткового вивчення, але свою роль відіграє зафіксоване у дослідженнях (Андоскин В.Н. та ін., 2014) явище гістерезису, в результаті якого при кожному циклі відбувається виділення тепла і саморозігрів гумової обкладки, а також нагрівання бурового робочого елемента і, очевидно, перетворення частини тиску в тепло в парі «ротор – статор».



а)



б)

Рисунок 5.24. – Модель поля тиску на поверхні ротора ГВД: а – зона максимальних значень тиску; б – зона мінімальних значень тиску

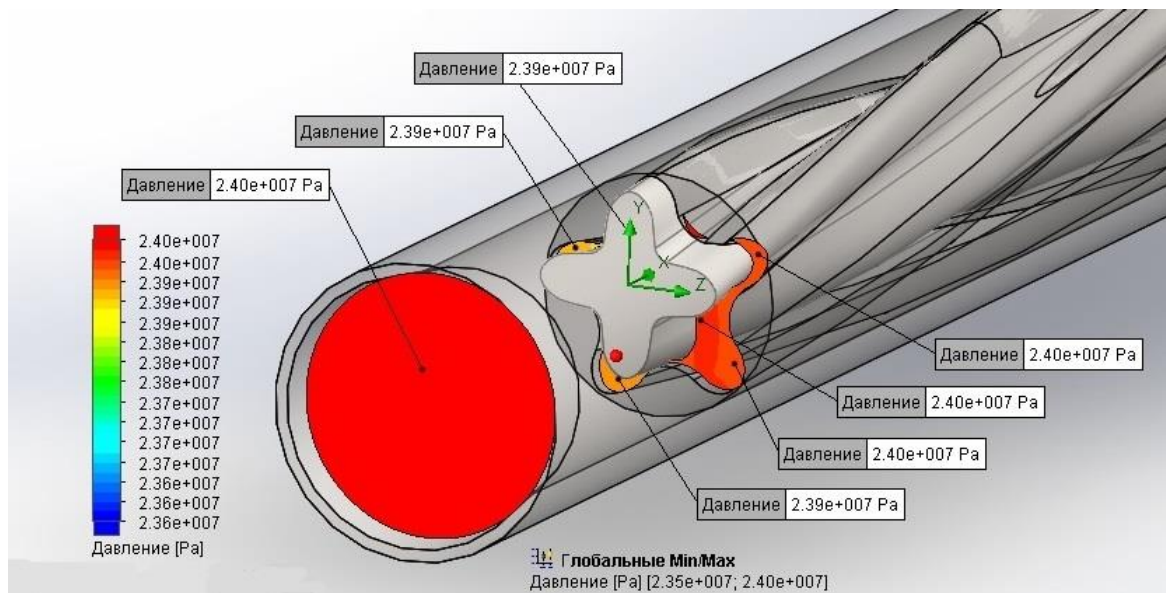


Рисунок 5.25. – Моделі поля тисків бурового розчину в поперечних площинах перерізу робочої пари «ротор – статор».

Максимальна температура нагрівання бурового розчину спостерігається на виході з силової секції (Рис. 5.26.б), мінімальна – на її вході (Рис. 5.26.в).

На рис. 5.27. показано графік зміни температури бурового розчину вичислений SolidWorks на ребрі зуба ротора по довжині силової секції. Ці дані дають уявлення про кількісну оцінку температури бурового розчину. «Піки» – «провали» співпадають з точками дотику ребра ротора до статора.

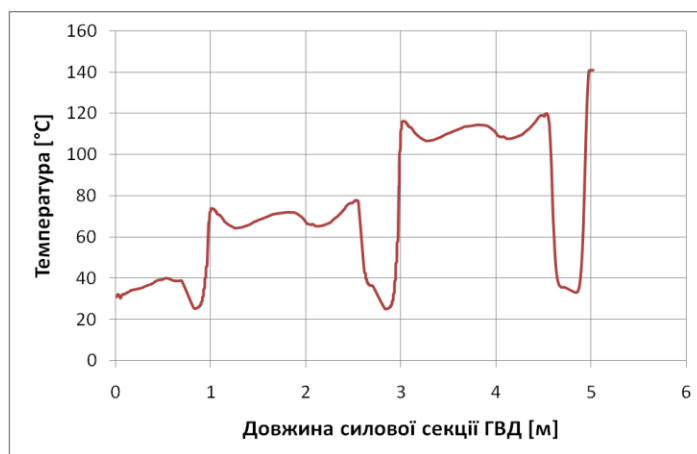


Рисунок 5.27. – Графік зміни температури бурового розчину вичислений на ребрі зуба ротора по довжині силової секції.

Висновки по моделюванню ГВД.

Одержаний матеріал моделей ГВД може бути використаний при гідравлічних і термодинамічних розрахунках вибійного гвинтового двигуна, вибору раціонального режиму його експлуатації.

ПРАКТИЧНА РАБОТА 24

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОЦИКЛОНА СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ БУРОВОГО РОЗЧИНУ⁵⁶

Об'єкт моделювання

Гідроциклон – апарат для розділення суспензій, емульсій, аерозолей, зерен мінералів, що відрізняються масою у полі відцентрових сил. Застосовується в ряді галузей промисловості: як збагачувальні апарати і класифікатори – у вугільній і рудній промисловості, в хімічній, паперово-целюлозній, цукровій, скляно-керамічній промисловості тощо. Гідроциклони широко використовують при бурінні свердловин у циркуляційній системі бурового розчину для його очищення від піску і частинок вибуреної породи, що виносяться на денну поверхню.

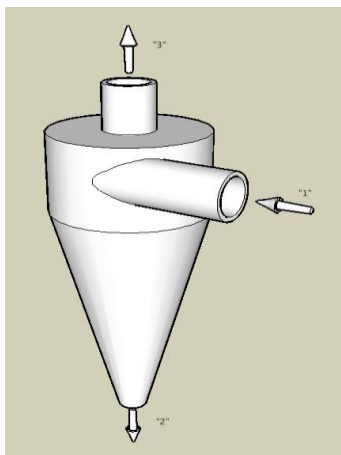


Рисунок 5.28. – Принципова схема гідроциклонувальника: «1» — введення в апарат суспензії; «2» — вихід твердої фази; «3» — вихід проясненої рідини.

Гідроциклон (рис. 5.28) складається з короткої циліндричної (верхньої) частини з патрубком для тангенціального введення пульпи (по дотичній до поверхні циліндра) і конічної (нижньої) частини з отвором біля вершини конуса для розвантаження пісків (грубозернистої, згущеної або важкої фракції пульпи). Кут конусності для класифікації і згущення 10-20°, прояснення — 10-20°, збагачення у важких суспензіях — 30—45°, збагачення у воді — 90—120°. Верхня частина циліндра закривається кришкою, в центрі якої встановлено зливний патрубок, що слугує для розвантаження тонкозернистої, розрідженої пульпи.

⁵ На основі досліджень: Застосування гідроциклонів у циркуляційній системі бурового розчину / В. С. Білецький, П. О. Молчанов, В. М. Савик // Збагачення корисних копалин. – 2017. – Вип. 66 (107). – С. 96–100.

⁶ Нумерація елементів тексту збережена за посібником Білецький В.С. Моделювання у нафтогазовій інженерії (Навчальний посібник) – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 328 с.

5.2.5.1. Приклад моделювання гідроциклона із застосуванням модуля Flow Simulation ресурсу SolidWorks

На рисунках 5.29.-5.34. наведено результати моделювання гідроциклона-аналога і модернізованого гідроциклона у модулі Flow Simulation програмного середовища SolidWorks.

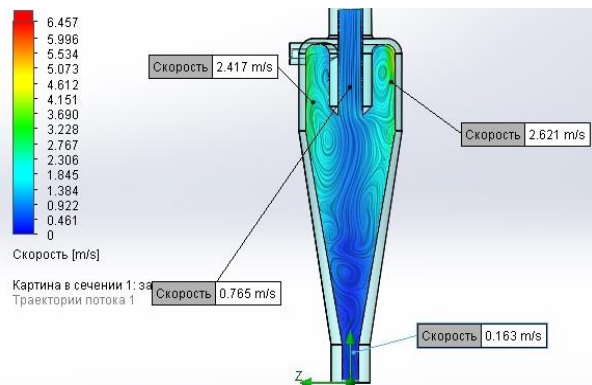


Рисунок 5.29. – Моделювання поля швидкостей гідроциклона-аналога (м/с), при витраті 1 л/с.

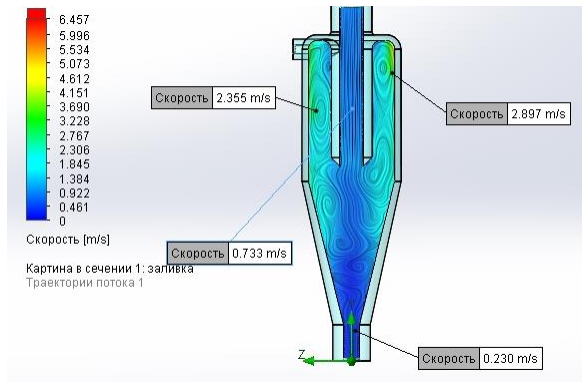


Рисунок 5.30. – Моделювання поля швидкостей гідроциклона-модернізованого (м/с), при витраті 1 л/с.

В аналізі одержаних результатів та визначення раціональних або оптимальних конструктивних та експлуатаційних рішень наведено моделювання гідроциклона по різним полям значень, а саме: поля швидкостей гідроциклона-аналога і модернізованого (м/с), при витраті 1 л/с та поля завихрення гідроциклона-аналога і модернізованого (1/с), при витраті 1 та 2 л/с.

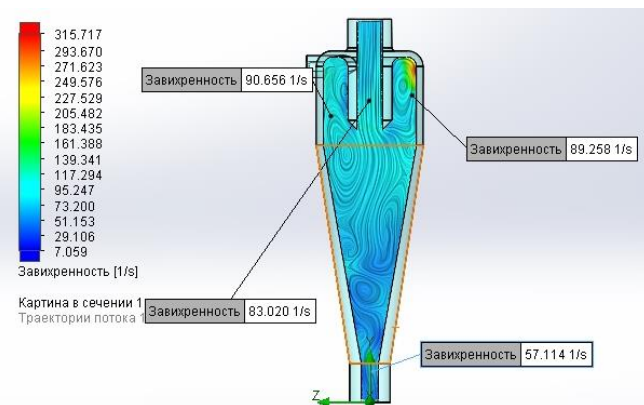


Рисунок 5-31. – Моделювання поля завихрення гідроциклона-аналога (1/с), при витраті 1 л/с.

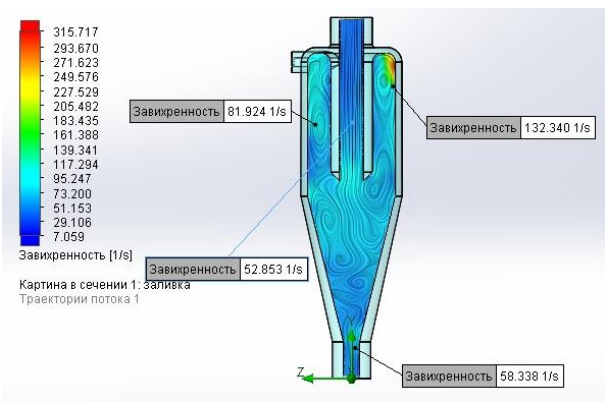


Рисунок 5.32. – Моделювання поля завихрення гідроциклона-модернізованого (1/с), при витраті 1 л/с.

Дослідження показало, що поле швидкостей гідроциклона-аналога і модернізованого практично ідентичні (рис. 5.29. – 5.30.).

При дослідженні полів швидкостей спостерігається збільшення швидкості пульпи в пристінній циліндричній зоні модернізованого

циклона з 0,163 до 0,230 м/с. Відповідно збільшується і відцентрова сила, що позитивно впливає на технічні характеристики гідроциклона.

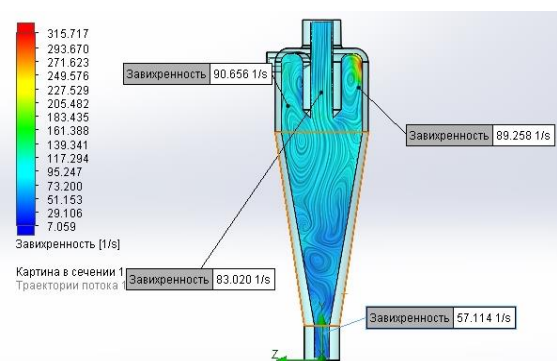


Рисунок 5.33. – Моделювання поля завихрення гідроциклона-аналога (1/с), при витраті 2 л/с.

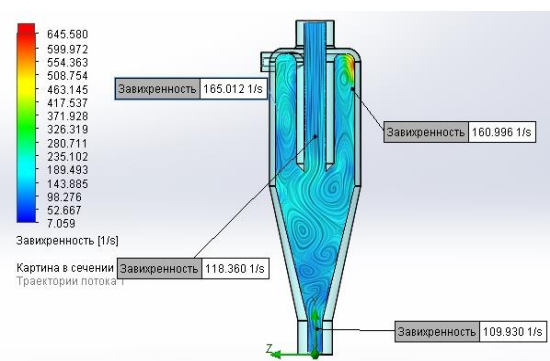


Рисунок 5.34. – Моделювання поля завихрення гідроциклона-модернізованого (1/с), при витраті 2 л/с.

При дослідженні на завихрення спостерігаються різні тенденції в залежності від витрат вихідної пульпи. При витратах 1 л/с завихреність в робочій зоні модернізованого гідроциклона менше ніж у гідроциклона-аналога. При витратах 2 л/с спостерігається зворотня картина, а саме – завихрення 89,225 зростає до 160,996 (1/с), що дає змогу стверджувати про негативну динаміку при дослідженні при витраті рідини при витратах 2 л/с.

Висновки по моделюванню гідроциклона

Моделювання гідроциклона із застосуванням модуля Flow Simulation ресурсу SolidWorks дає можливість отримати параметричні поля робочої зони апарата, зокрема, поле швидкостей і завихреностей пульпи бурового розчину в апараті. Отримана інформація є основою для вибору раціонального режиму роботи, а також модернізації конструкції гідроциклона.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 25

Методика побудови 3D-моделі з використанням графічного редактора КОМПАС-3D

Розглянемо методику побудови 3D-моделі з використанням графічного редактора КОМПАС-3D (в більшості програм принцип побудови досить схожий). В першу чергу варто ознайомитися з інтерфейсом системи. Варто почати з створення документа креслення (Файл-Створити-Креслення). Відкриється головне вікно системи, в якому будуть відображені наступні елементи (рис. 4.49, табл.. 4.1):

- головне меню;
- панель інструментів (стандартна, вид, поточний стан);
- компактна панель;
- рядок повідомлень;
- панель властивостей;
- вікно документа;
- шаблон креслення формату А4 у вікні документа.

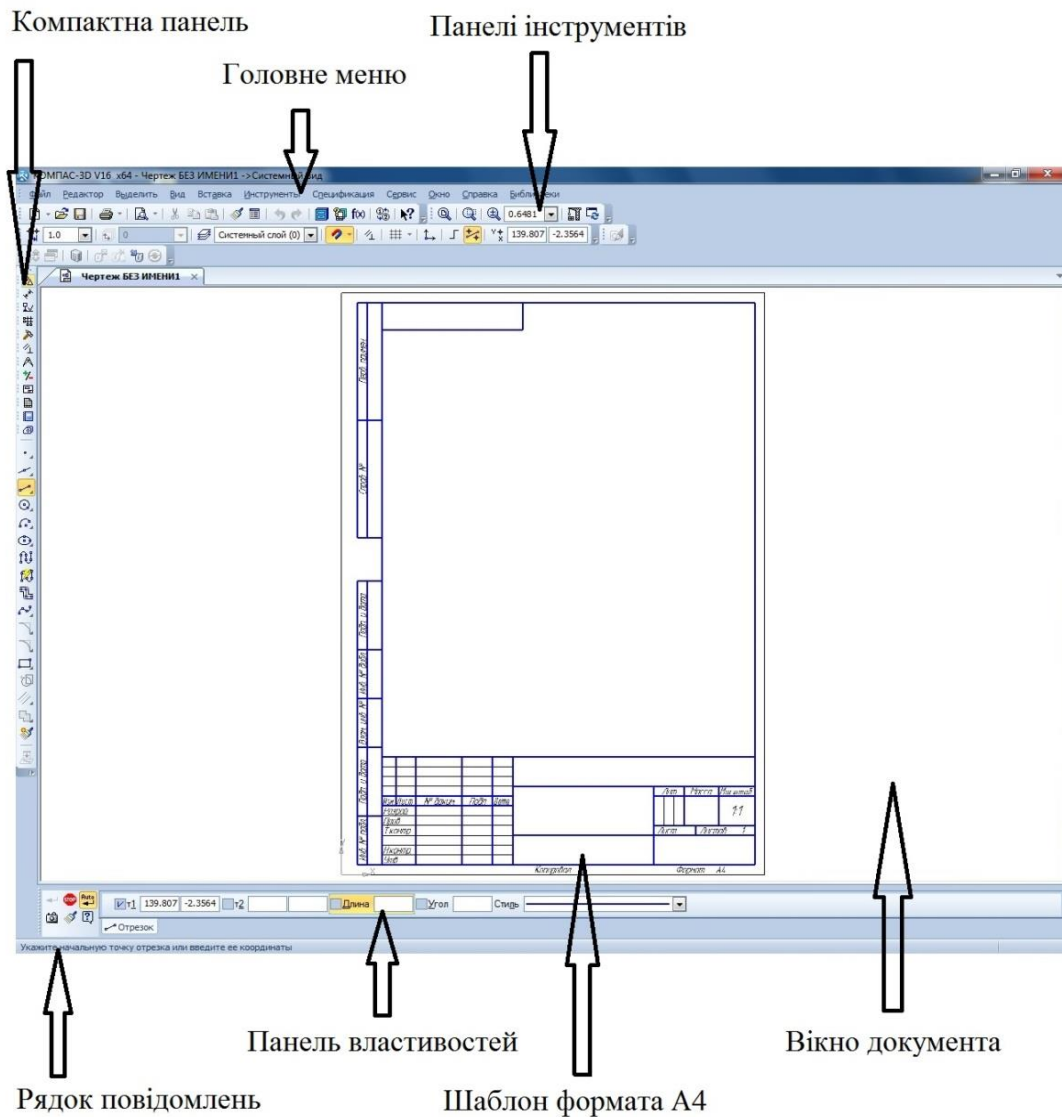


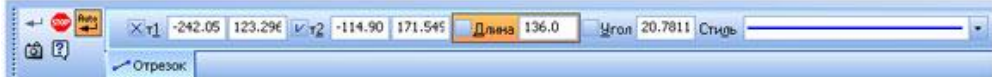


Рисунок 4.50 – Елементи інтерфейсу програми Компас-3D

Таблиця 4.1. – Елементи інтерфейсу ПЗ Компас-3D та їх призначення


Головне меню (2D, 3D)	<p>Містить в собі основні меню програми. З його допомогою можна створити новий файл, зберегти, відправити його на друк, налаштувати інтерфейс, створити і відредагувати креслення, підключити бібліотеки і багато іншого</p>
Стандартна панель	<p>Розташована в верхній частині екрану. Тут продубльовані найбільш часто використовувані команди: «Створити документ», «Відкрити», «Зберегти», «Відправити на друк»</p>
Панель «Вид»	<p>Містить команди для керування зображенням. Можна змінювати масштаб, наближати, видаляти креслення</p>


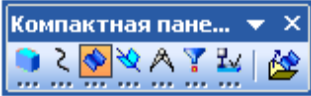
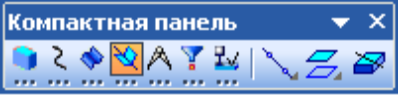



Панель поточного стану	 <p>Розташовані кнопки для управління курсором, його координати. Також тут можна встановити/заборонити прив'язки курсору, включити/вимкнути сітку (як в AutoCAD), режим ортогонального креслення</p>
Панель «Компактна» (2D, 3D)	 <p>Найпопулярніша панель у користувача Компаса. Тут є все, що потрібно для створення і редагування креслення: геометричні фігури, розміри, позначення. Панель «Компактна» складається з панелі перемикавання та інструментальних панелей. На рис. активізована інструментальна панель «Геометрія» (точки, допоміжні лінії, відрізки, окружності).</p>
Панель властивостей	 <p>Спочатку її на екрані немає, вона з'являється при створенні будь-якого елемента креслення і служить для управління процесом створення цього елемента. Наприклад, при створенні відрізка, як показано на малюнку, можна задати координати двох його точок, кут, довжину, стиль лінії</p>

Панель «Компактна» для 3D документів радикально відрізняється, панелі інструментів тут зовсім інші:

- редагування деталі;
- просторові криві;
- поверхні;
- допоміжна геометрія;
- виміри (3D);
- фільтри;
- елементи оформлення.

Таблиця 4.2 – Панелі інструментів для 3D документів

Назва панель	Зображення панелі та її команди
Редагування деталі	 <p>Команди для побудови елементів деталі шляхом додавання матеріалу (операції видавлювання, обертання, кінематична операція і операція по перетинах) і шляхом видалення матеріалу (вирізати видавлюванням, обертанням, кінематично, по перетинах). Інші команди: деталь-заготовка, фаска, отвір, ребро жорсткості, ухил, оболонка, перетин поверхнею, масив по концентричній сітці, дзеркальний масив, булева операція</p>

Просторові криві	 <p>Команди точка, спіраль циліндрична, спіраль конічна, ламана, сплайн</p>
Поверхні	 <p>Доступна тільки одна команда: імпорт поверхні з файлу формату ACIS (розширення .sat)</p>
Допоміжна геометрія	 <p>Доступні вже відомі нам команди: вісь через дві вершини, зміщена площину, лінія роз'єму</p>
Виміри (3D)	 <p>Команди для різних обчислень: відстань і кут, довжина ребра, площа, МЦХ моделі, інформація про об'єкт</p>
Фільтри	 <p>Команди використовуються в тому випадку, коли конструктору важко виділити якийсь об'єкт моделі. Наприклад потрібно виділити ребро, а так як поруч з ребром грань помилково може виділитися вона. Для того, щоб цього не відбувалося можна фільтрувати межі, ребра, вершини, конструктивні площини, конструктивні осі. Спочатку активна команда «Фільтрувати все», яка означає, що може бути виділений будь-який елемент</p>
Елементи оформлення	 <p>Команди дозволяють проставити на 3D моделі деталі лінійний розмір, кутовий, радіальний, діаметральний, шорсткість, базу, лінію-виноску, допуск форми</p>

Кнопки миші працюють наступним чином:

- ліва – дозволяє обирати елементи меню, об'єкти в графічній області, а також об'єкти в «дереві конструювання» FeatureManager;
- права – дозволяє відобразити контекстне меню;
- середня – дозволяє обертати, переміщувати, а також змінювати масштаб деталі або збірної моделі.

Перед початком побудови 3D моделі необхідно провести аналіз креслення деталі, а саме визначити які операції будуть при проектуванні основними, яка буде послідовність побудови моделі деталі. Спочатку слід використовувати основні формотворчі операції (видавлювання, обертання), а останніми операціями, природно, будуть - побудова фасок, заокруг-

лень, оболонки і т.д. Розглянемо, наприклад, різні способи побудови 3D моделі деталі "Фланець".

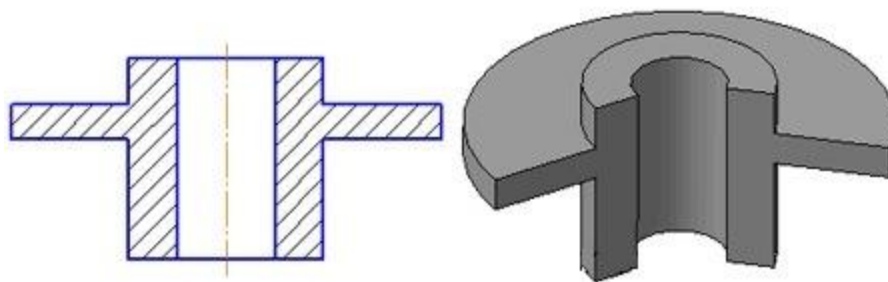
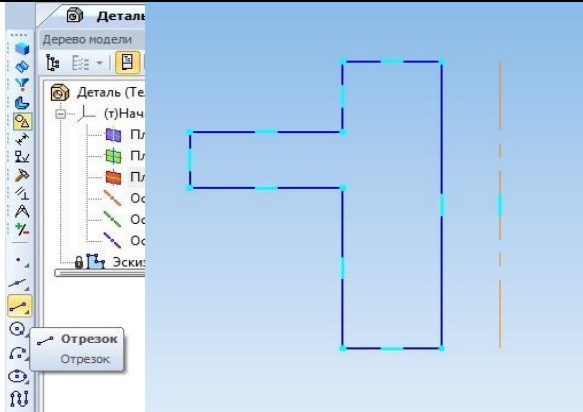
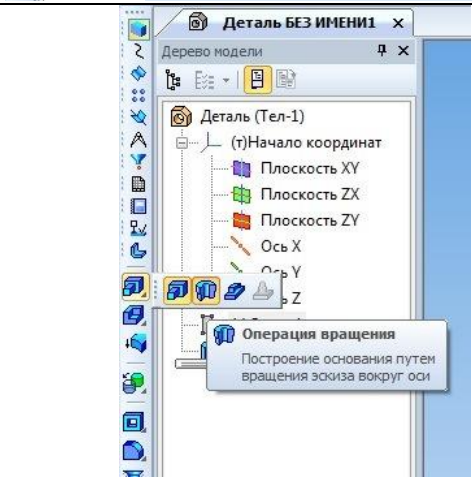
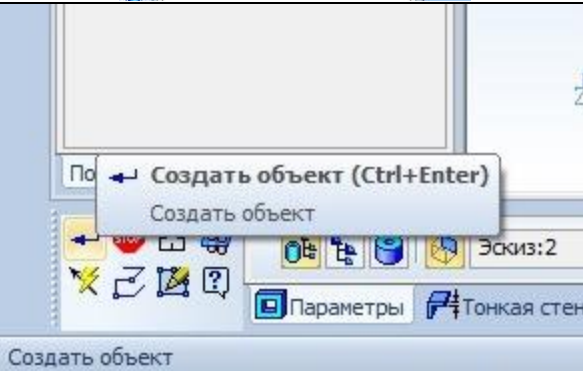
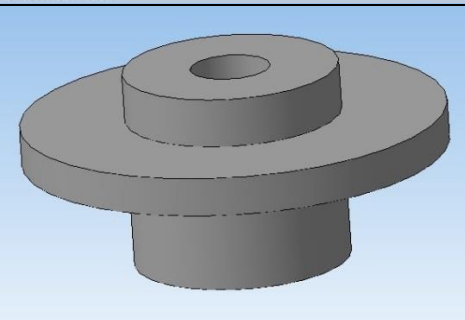


Рисунок 4.51. – Креслення та 3D-модель деталі "Фланець"

Перший спосіб передбачає створення деталі за 1 операцію обертання. Це найбільш раціональний варіант. Приклад покрокової побудови деталі наведена в табл. 4.3.

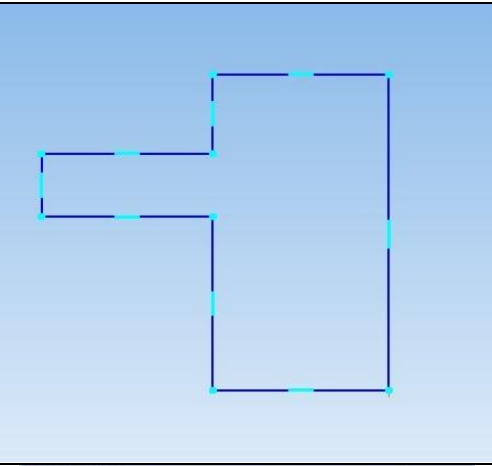
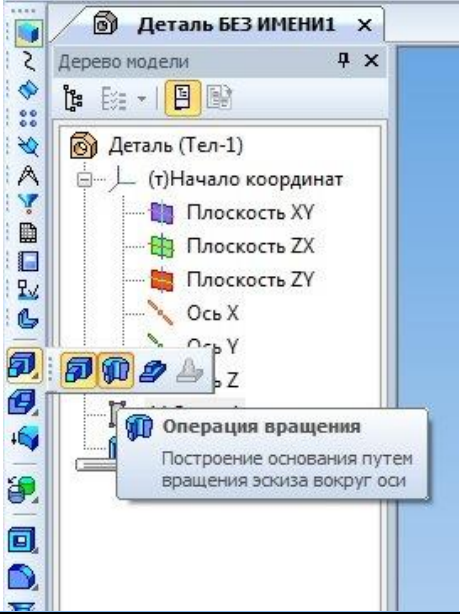
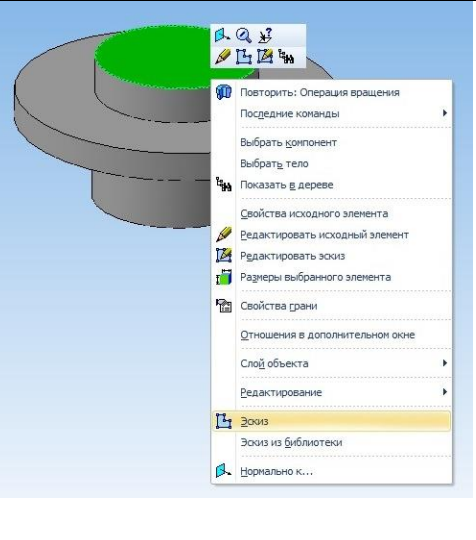
Таблиця 4.3 – Приклад покрокової побудови 3D-моделі деталі «Фланець» за одну операцію

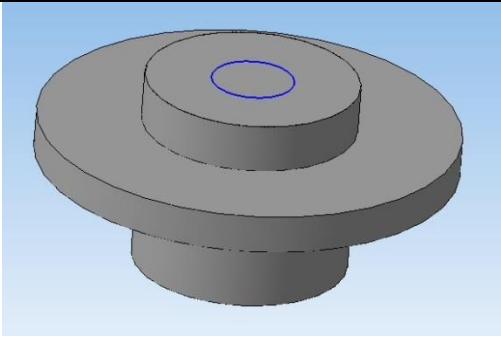
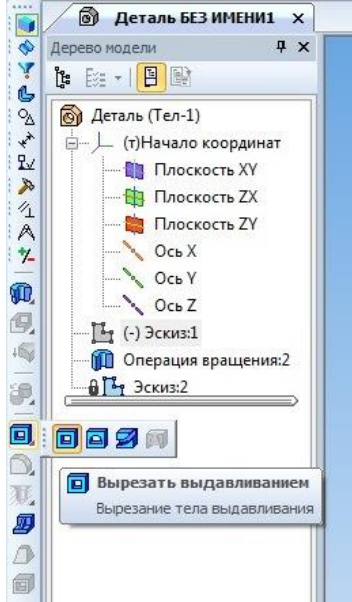
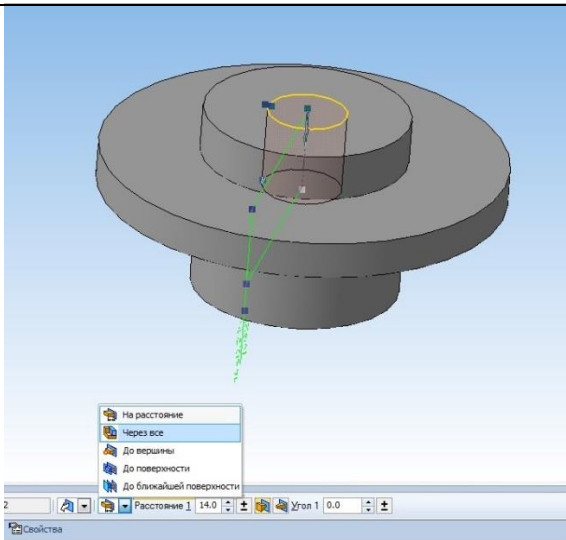
Опис дій	Зображення
Створюємо новий документ. Вибираємо деталь.	
Вибираємо площину для побудови ескізу	

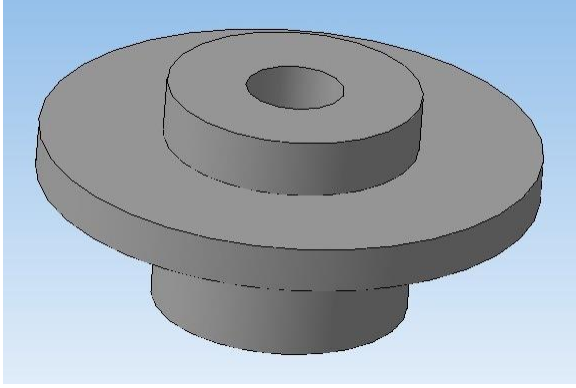
<p>За допомогою інструменту «відрізок» креслимо ескіз деталі</p>	
<p>В меню операцій, попередньо виділивши ескіз, обираємо «обертання»</p>	
<p>Для підтвердження операції на панелі властивостей натискаємо «створити об'єкт»</p>	
<p>Після підтвердження з'являється 3D-модель деталі</p>	

Другий спосіб побудови цієї ж деталі більш трудомісткий, та й такий файл важить на 20% більше (але теж дуже мало – всього до 100 Кб). Він передбачає дві операції: перша – обертання, друга – видавлювання отворів. Приклад покрокової побудови деталі за цим способом наведена в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Приклад покрокової побудови 3D-моделі деталі «Фланець» за дві операції

Опис дій	Зображення
<p>За допомогою інструменту «відрізок» креслимо ескіз деталі, так як і в першому способі</p>	
<p>В меню операцій, попередньо виділивши ескіз, обираємо «обертання»</p>	
<p>Виділимо площину на тілі деталі, натискаючи по ній правою кнопкою миші, та обираємо «ескіз»</p>	

<p>Будуємо ескіз у вигляді кола для прорізання отвору</p>	
<p>В меню операцій, попередньо виділивши ескіз, обираємо «вирізати видавлюванням»</p>	
<p>На панелі властивостей обираємо відстань на яку необхідно зробити виріз, в даному випадку обираємо «наскрізь»</p>	

Підтверджуємо операцію та отримуємо 3D-модель деталі	
--	--

Можна, звичайно, побудувати цю деталь за допомогою інших операцій (1 - видавлювання, 2 - приклеювання обертанням). Але варто обирати найпростіший спосіб.

Таким чином, розглянувши приклади побудови фланцю, можна бачити що навіть найпростішу деталь мена побудувати різними способами. Тому ще на етапі аналізу креслення рекомендується вибрати найбільш доцільний варіант побудови 3D-моделі деталі, особливо під час побудови більш складних деталей, адже всі операції відображаються в «дереві побудови» і виникає більше складностей у пошуках необхідного ескізу у разі потреби виправлень.

Для моделювання збірних конструкцій (наприклад, редуктора, рис. 4.51) необхідно спочатку підготувати всі окремі деталі. Коли всі елементи побудовані, створюється файл збірної моделі з розширенням `-.a3d` (Новий документ – Збірка – Ок).

Збірну модель також мена створювати різними варіантами. Наприклад, спосіб побудови "від низу до верху" передбачає проектування 3D-збірки, куди послідовно вставляють раніше створені компоненти. Потім між ними створюються сполучення.

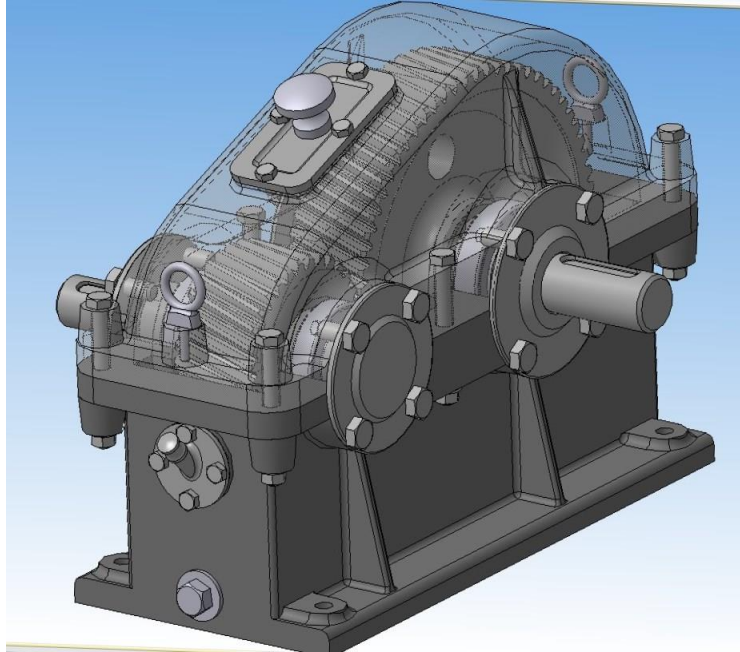


Рисунок 4.52. – Тривимірна модель редуктора

Таким чином, для фіксації в редукторі кришки підшипника між нею і корпусом необхідно створити 2 сполучення: «Співвісність» самої кришки та валу редуктора і «Співпадіння об'єктів».

ПРАКТИЧНА РОБОТА 26

МОДЕЛЮВАННЯ ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ У БУРИЛЬНИХ ТРУБАХ ПІД ЧАС СПУСКО-ПІДІЙМАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ⁷⁸

Об'єкт моделювання

На сьогодні в Україні і в світовій практиці при бурінні свердловин на нафту і природний газ застосовуються бурильні труби із звичайними бурильними муфтами під елеватор, що не дозволяють виключити знакозмінні навантаження, які часто виникають у верхній частині труб при проведенні спуско-підіймальних операцій (СПО). Такі знакозмінні навантаження виникають у бурильних трубах навіть при незначних перекосах в стропах елеватора або в столі ротора під час спуско-підіймальних операцій і нарощуванні бурильної колони і є причиною утворення мікротріщин та зрештою обриву бурильної колони і значно обмежують термін експлуатації бурильних труб.

Моделювання в системі Simulation програмного середовища SolidWorks дозволяє виконати порівняльне дослідження різних конструкцій муфти замків бурильних труб і елеватора для зменшення (унікнення) знакозмінних навантажень на бурильні труби під час спуско-підіймальних операцій і нарощування інструменту.

Традиційно застосовуваний елеватор для спуско-підіймальних операцій під час буріння свердловин складається з (рис. 5.35.): корпусу 1, в якому встановлені замок 2 з рукояткою 3, замком штропа 4 і заціпки 5. На верхньому торці корпусу виконаний упор 6, який забезпечує раціональний розподіл навантаження по поверхні корпусу елеватора.

⁷ На основі досліджень: Хорошун Д. А. Дослідження знакозмінних навантажень у бурильних трубах під час спуско-підіймальних операцій / Д. А. Хорошун, В. М. Орловський, В. С. Білецький // Збірник факультету нафти і газу та природокористування Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПНТУ, 2016. – Вип. 9. – С. 4–7.

⁸ Нумерація елементів тексту збережена за посібником Білецький В.С. Моделювання у нафтогазовій інженерії (Навчальний посібник) – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 328 с.

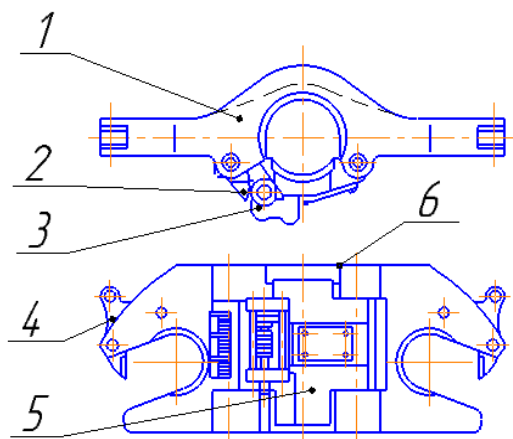


Рисунок 5.35. – Базова конструкція елеватора: 1 – корпус; 2 – замок; 3 – рукоятка; 4 – замок штропа; 5 – защіпка, 6 – упор для бурової труби.

У верхній частині корпус має запобіжне розточування, що виключає можливість виходу труби з елеватора, який знаходиться під навантаженням при спуско-підйомних операціях.

5.2.6.1. Приклад моделювання елеватора і бурильної колони із застосуванням програми КОМПАС та модуля Simulation ресурсу SolidWorks

Етап 1. Отримання 3D-моделі елеватора та бурильної колони з муфтою із застосуванням програми КОМПАС (згідно п. 4.3.1.).

На рис. 5.36. показано 3D модель компоновки дослідного зразка елеватора, бурильної колони і муфти.

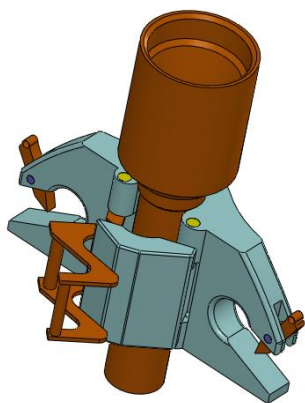


Рисунок 5.35. – 3D модель компоновки дослідного зразка елеватора, бурильної колони і муфти.

Етап 2. Отримання 3D-моделі елеватора та бурильної колони з муфтою із застосуванням програми КОМПАС у 2-х варіантах: а) до модернізації; б) після модернізації (рис. 5.36.). Запропонована модернізація полягає у зміні поверхонь упору елеватора та муфти які мають пологі краї що, як очікується, забезпечить зниження знакозмінних навантажень і, отже, збільшить термін експлуатації бурильних труб.

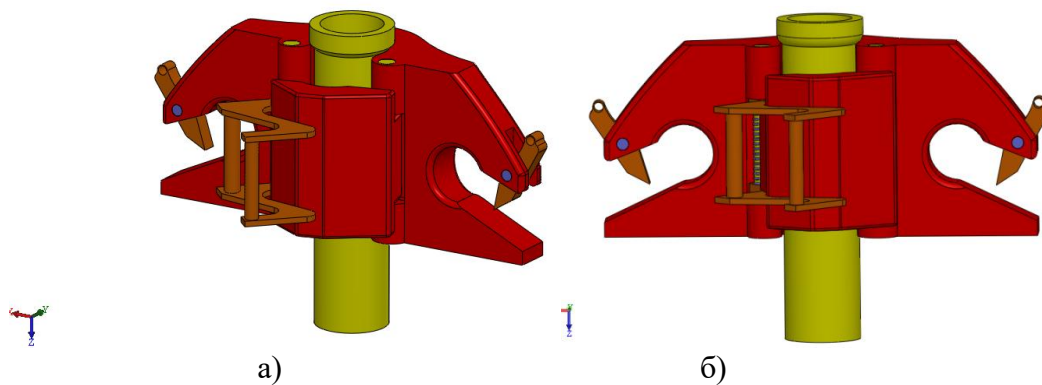


Рисунок 5.36. – 3D модель дослідного зразка елеватора без муфти:
а) до модернізації; б) після модернізації

Моделювання виконано за допомогою комп'ютерної системи Simulation програмного середовища SolidWorks. При дослідженні елеватора до бурильної колони прикладено навантаження 2500 кН, 3000 кН.

Отримані в результаті проведених досліджень значення напружень показані на рис. 5.37. і 5.38.

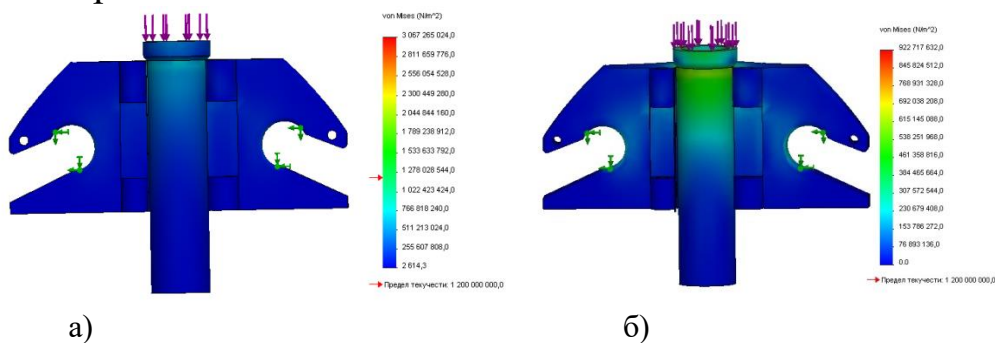


Рисунок 5.37. – Параметричне поле напружень елеватора бурильної колони при навантаженні 2500 кН = 250 т: а) до модернізації; б) після модернізації.

На рисунках показано шкалу напружень які виникають у обладнанні під дією навантаження.

При навантаженні 2500 кН = 250 т у варіанті елеватора до модернізації (прототип) у сполученні «елеватор-бурильна труба» (на рис. 5.37.а) виникають максимальні напруження 3 067 Н/мм², що суттєво перевищує границю плинності 1200 Н/мм² і, отже, викликає руйнування обладнання.

При навантаженні 2500 кН = 250 т у варіанті елеватора після модернізації картина напружень у сполученні «елеватор-бурильна труба» (на рис. 5.37.б) зовсім інша – максимальні напруження не перевищують 922,717 Н/мм², що нижче за границю плинності 1 200 Н/мм².

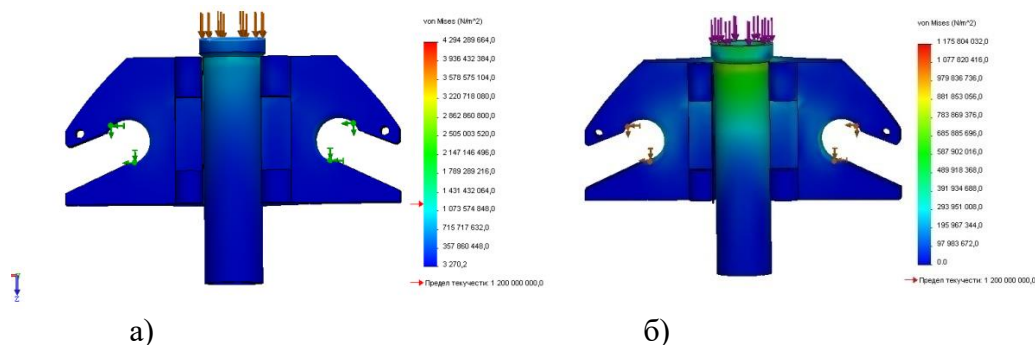


Рисунок 5.38 – Параметричне поле напружень елеватора бурильної колони при навантаженні 3000 кН = 300т: а) до модернізації; б) після модернізації.

При навантаженні 3000 кН = 300 т у варіанті елеватора до модернізації (прототип) у сполученні «елеватор-бурильна труба» (на рис. 5.38.а) виникають максимальні напруження $4\,294\text{ Н/мм}^2$, що суттєво перевищує границю плинності $1\,200\text{ Н/мм}^2$ і, отже, викликає руйнування обладнання.

При навантаженні 3000 кН = 300 т у варіанті елеватора після модернізації картина напружень у сполученні «елеватор-бурильна труба» (на рис. 5.38.б) інша – максимальні напруження не перевищують $1\,175\text{ Н/мм}^2$, що дещо нижче за границю плинності $1\,200\text{ Н/мм}^2$.

Висновки по моделюванню сполучення «елеватор-бурильна труба»

Таким чином, як показують модельні дослідження зразка елеватора, бурильної колони і муфти, проблема зменшення (уникнення) знакозмінних навантажень на бурильні труби під час спуско-піднімальних операцій може бути вирішена шляхом зміни геометрії упору корпусу елеватора та муфти.

Результати моделювання з використанням комп'ютерної прикладної програми Simulation, що є прикладним модулем SolidWorks, показують, що до модернізації елеватора у пристрої виникають напруження які перевищують границю плинності тим самим показуючи, що обладнання буде деформуватися і руйнуватися. Модернізація обладнання забезпечує суттєве зменшення максимальних напружень у сполученні «елеватор-бурильна труба», які не перевищують границю плинності.

Отже, моделювання знакозмінних навантажень у бурильних трубах під час спуско-піднімальних операцій з використанням комп'ютерної прикладної програми Simulation, що є прикладним модулем SolidWorks дає раціональний розв'язок технічної задачі модернізації геометрії сполучення «елеватор-бурильна труба».

ПРАКТИЧНА РОБОТА 27

Моделювання статичного змішувача системи приготування бурового розчину⁹¹⁰

Об'єкт моделювання

Статичний міксер (змішувач) — статичний (нерухомий) змішувач середовищ, який конструктивно являє собою вставку різної конструкції у трубі, по якій подається середовище (рідина, газ, пульпа).

Міксери відрізняються один від одного за конфігурацією, довжиною, діаметром і набором інших показників, і в цілому дозволяють змішувати великий спектр дво- і багатокомпонентних матеріалів різної в'язкості, густини, хімічної природи і практичного призначення.

Задача статичного міксера — гомогенізувати матеріал, вирівняти градієнт в'язкості і складу, суттєво підвищити турбулентність потоку.

В останній час статичні змішувачі все ширше використовуються в ряді галузей промисловості, що обумовлено їх перевагами, зокрема, великою кількістю можливих варіантів конструктивного рішення, відсутністю рухомих елементів, привода, енергоспоживання, можливістю суміщення з гідро- та пневмо-транспортними мережами, а також різноманітністю технологічних функцій, які вони здатні виконувати: змішування газоподібних, рідких і сипучих твердофазних компонентів, диспергування твердофазних компонентів в рідких і незмішуваних рідинах, флокуляція твердої фази в рідинних потоках, інтенсифікація розчинення реагентів у рідинах тощо. Перспектива застосування статичного змішувача у нафтогазовій галузі – гомогенізація бурових та тампонажних розчинів, кондиціонування рідин реагентами тощо.

5.2.7.1. Приклад моделювання статичного змішувача із застосуванням програми КОМПАС та модуля Simulation ресурсу SolidWorks

У даному прикладі показане моделювання трьох конструкцій статичного змішувача враховуючи параметри бурового розчину (табл. 5.2). Мета – отримати параметричні поля гідросуміші у робочій зоні труби (поле швидкостей, поле завихреності, поле інтенсивності турбулентності, поле

⁹ На основі досліджень: [Дослідження роботи статичного змішувача в циркуляційних системах промивальної рідини бурових установок. / В. С. Білецький, Ю. С. Міщук, Ю. І. Кузнєцова // Збірник наукових праць ПолтНТУ. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2018. – Вип. 1 \(50\). – С. 197–207.](#)

¹⁰ Нумерація елементів тексту збережена за посібником Білецький В.С. Моделювання у нафтогазовій інженерії (Навчальний посібник) – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 328 с.

масштабу турбулентностей по довжині шляху перемішування) і виконати їх порівняльний аналіз.

Характеристики бурового розчину: густина – 1250 кг/м³, динамічна в'язкість – 0.02 Па·с.

Розташування статичного змішувача в трубі показано на 3D моделі (рис. 5.39.), одержаній в програмі КОМПАС.

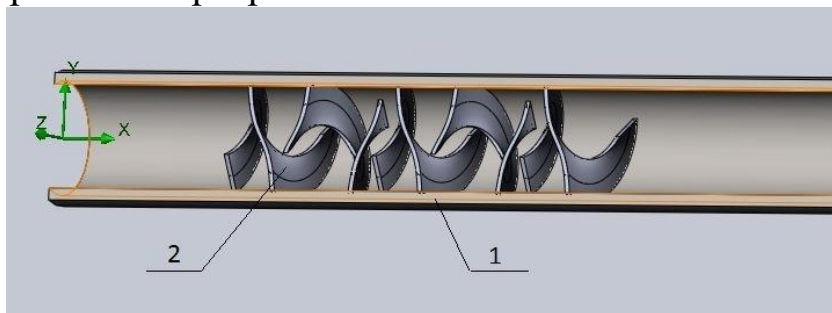


Рисунок 5.39. – 3D-модель конструкції статичного змішувача:
1 – труба; 2 – статичний змішувач.

Розрахуємо такі параметричні поля гідросуміші у робочій зоні труби, яка охоплює власне змішувач і відтинки труби за ним довжиною до 20 діаметрів труби:

- поле швидкостей гідросуміші v (м/с);
- поле завихреності n (с⁻¹) (середня колова швидкість рідини у вихорі потоку);
- поле інтенсивності турбулентності I (%):

$$I \equiv \frac{u'}{U}, \quad (5.22)$$

де середньоквадратична швидкість турбулентних пульсацій u' :

$$u' \equiv \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (5.23)$$

Середня швидкість турбулентного потоку:

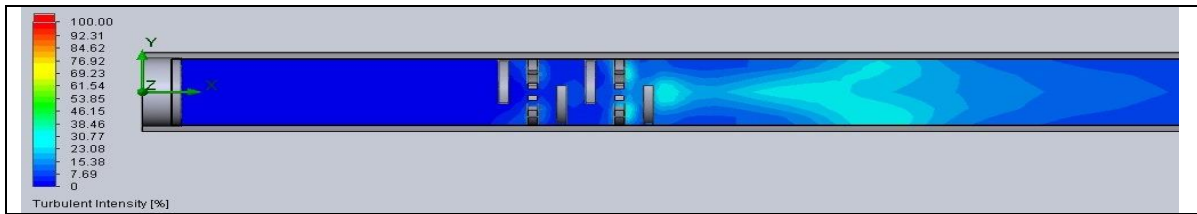
$$U \equiv \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (5.24)$$

- поле масштабу турбулентностей по довжині шляху перемішування l_m (м).

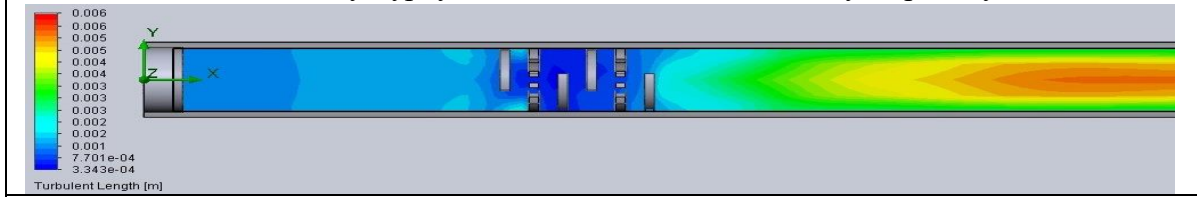
Для отримання моделей зазначених параметричних полів вико ристано модуль Flow Simulation програмного середовища SolidWorks. Результати досліджень представлені в табл.5.2. Графіки зміни швидкості потоку бурового розчину по довжині трубопроводу (криві $v(L)$) представлені на рис. 5.40. Графіки зміни завихреності n (с⁻¹) відносно осі труби L (м), (криві $n(L)$) представлені на рис. 5.41. Графіки зміни інтенсивності турбулентності I (%) відносно осі труби L (м), (криві $I(L)$) представлені на рис. 5.42. Графіки зміни масштабу турбулентностей l_m (м) відносно осі труби L (м), (криві $l_m(L)$) представлені на рис. 5.43.

Таблиця 5.2 – Результати моделювання статичного змішувача за допомогою модуля Flow Simulation ресурсу SolidWorks

Номер дослідження та опис конструкції	
Дослід 1 – Труба $\varnothing 114 \times 9$ мм, без додатково встановленого статичного змішувача	
Модель поля швидкості	
Модель поля завихреності	
Модель інтенсивності турбулентності	
Модель масштабу турбулентностей по довжині шляху перемішування	
Дослід 2	
Труба $\varnothing 114 \times 9$ мм, з додатково встановленим статичним змішувачем №1	
Модель поля швидкості	
Модель поля завихреності	
Модель інтенсивності турбулентності	

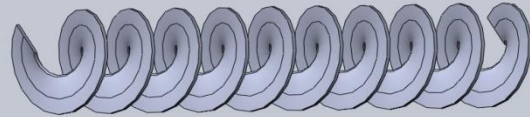


Модель масштабу турбулентностей по довжині шляху перемішування

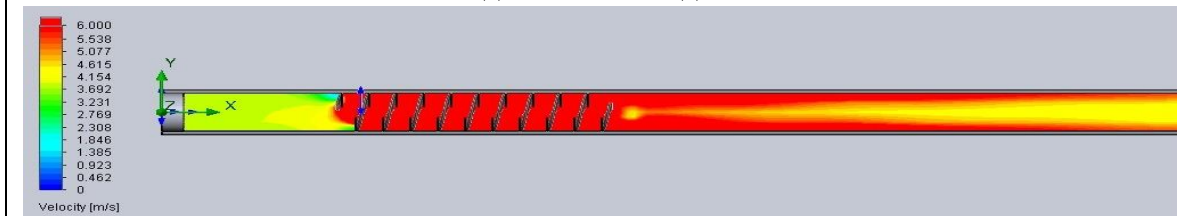


Дослід 3

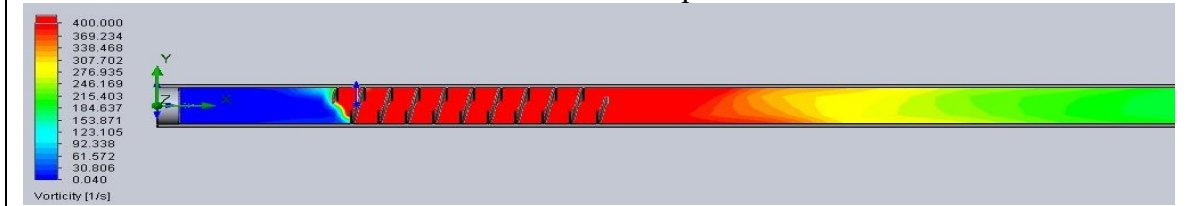
Труба Ø114x9 мм, з додатково встановленим статичним змішувачем № 2



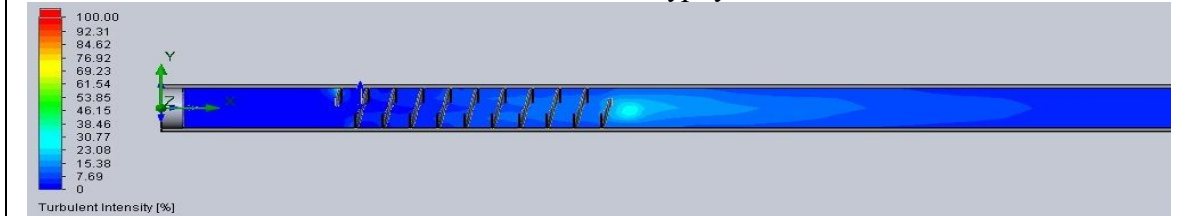
Модель поля швидкості



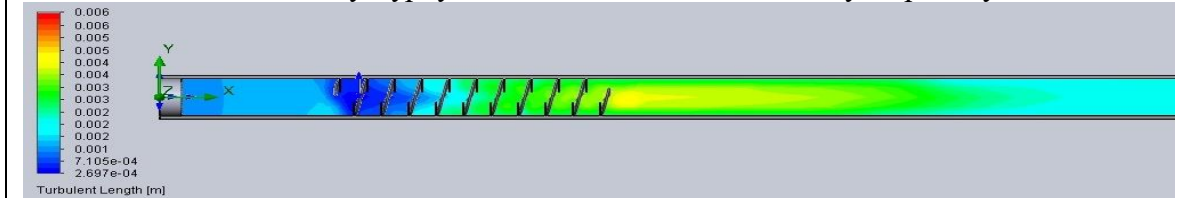
Модель поля завихреності



Модель інтенсивності турбулентності

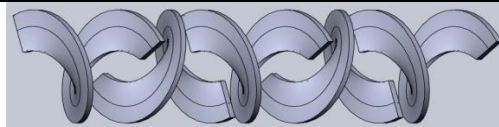


Модель масштабу турбулентностей по довжині шляху перемішування

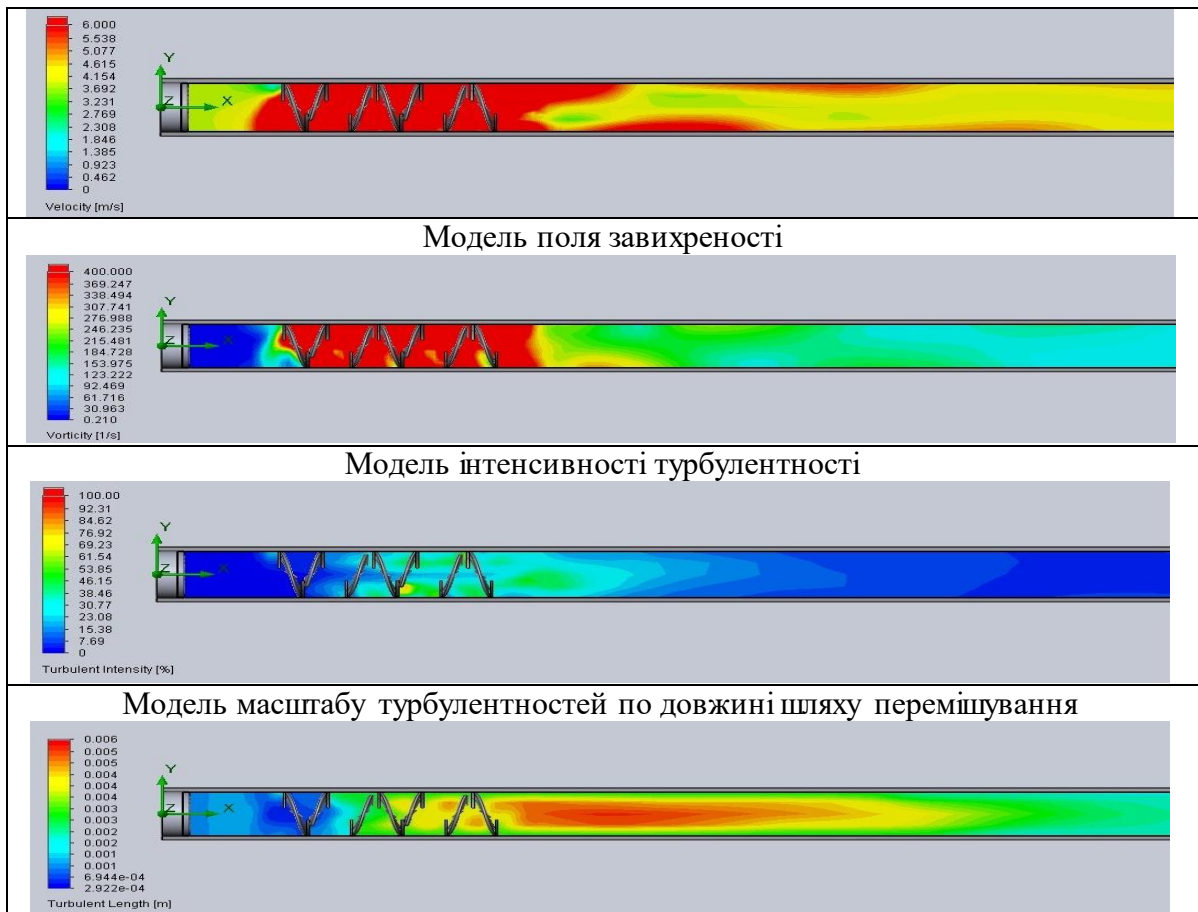


Дослід 4

Труба Ø114x9 мм, з додатково встановленим статичним змішувачем № 3

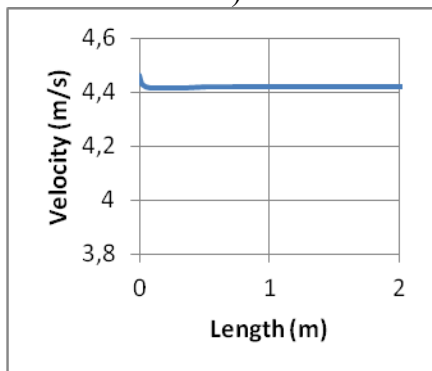


Модель поля швидкості

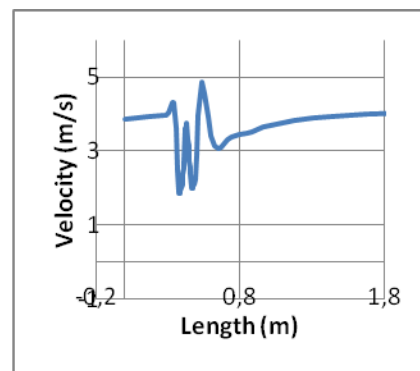


Одержані результати характеризують картину зміни турбулентності бурового розчину вздовж трубопроводу в місці установки статичного змішувача і в зоні трубопроводу за ним. Як бачимо, оцінки турбулентності, представлені кривими $n(L)$, $I(L)$ та $l_m(L)$ кореспондуються між собою (рис. 5.40-5.45). Середня колова швидкість рідини у вихорі потоку n , інтенсивність турбулентності I та масштаб турбулентностей l_m набувають максимальних значень в місці установки статичного змішувача, а далі зменшуються по довжині труби на відстані до 10 діаметрів труби (10D). Разом з тим, кожен з досліджених різновидів статичного змішувача по-різному впливає на окремі характеристики турбулентності.

Дослід 1 (труба без статичного змішувача)



Дослід 2 (змішувач №1)



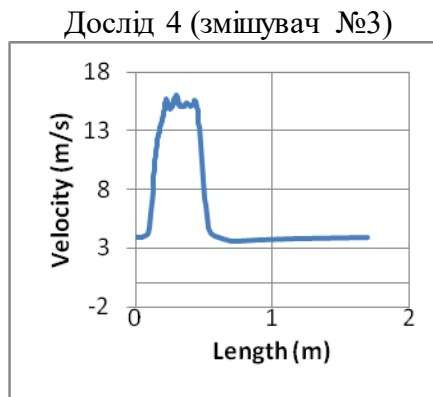
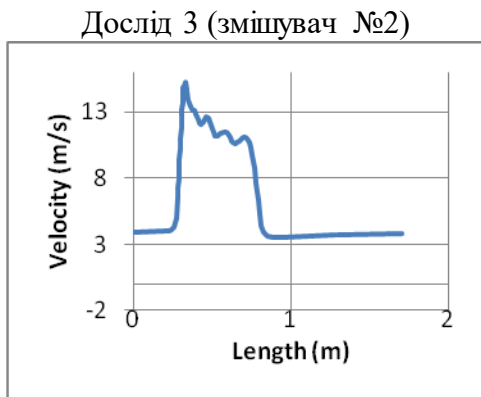
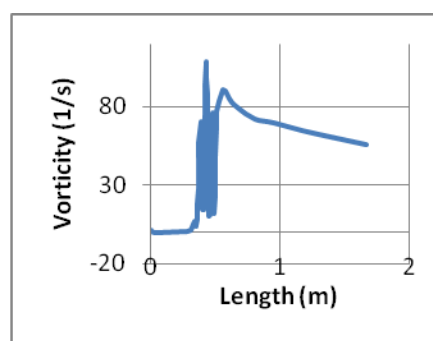
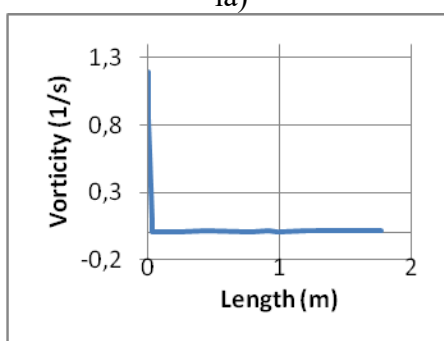


Рисунок 5.40. – Графіки зміни швидкостей v (м/с) відносно осі труби L (м), (криві $v(L)$)

Дослід 1 (труба без статичного змішувача)

Дослід 2 (змішувач №1)



Дослід 3 (змішувач №2)

Дослід 4 (змішувач №3)

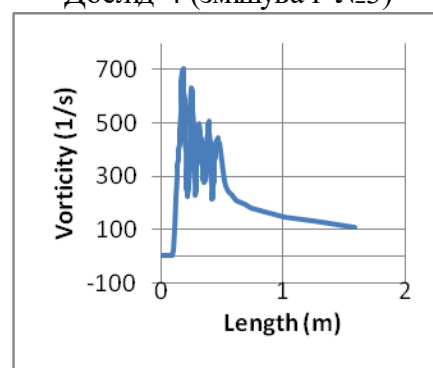
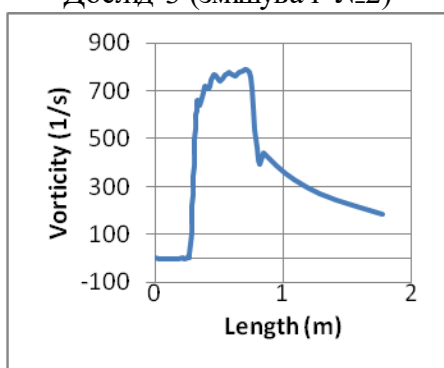
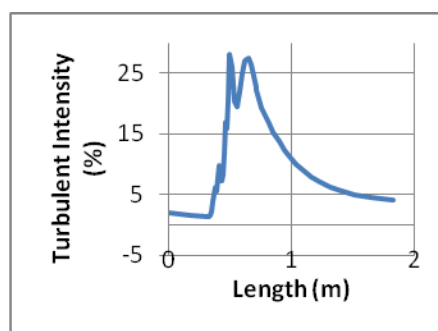
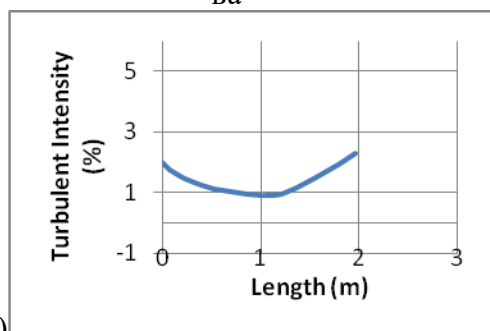


Рисунок 5.41. – Графіки зміни завихреності n (c^{-1}) відносно осі труби L (м), (криві $n(L)$)

Дослід 1 (труба без статичного змішувача)

Дослід 2 (змішувач №1)



ча)

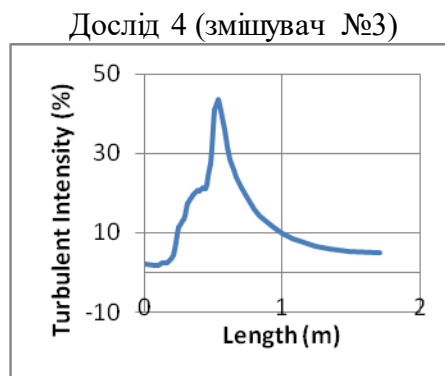
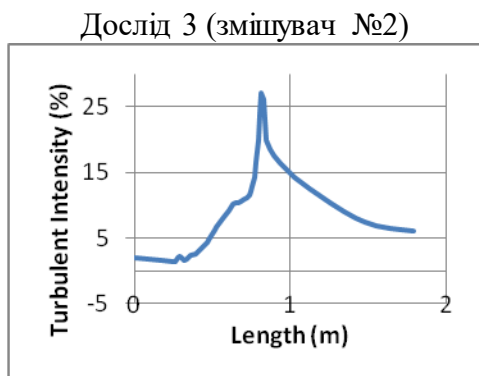
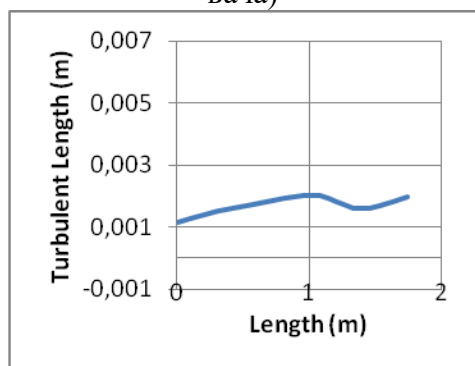
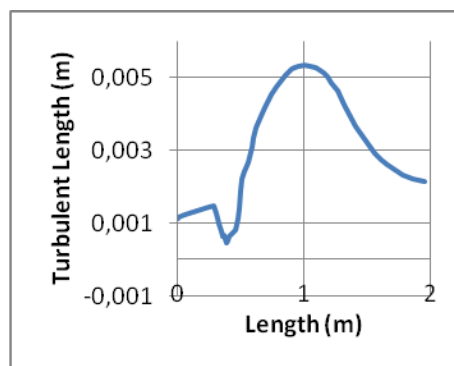


Рисунок 5.42 – Графіки зміни інтенсивності турбулентності I (%) відносно осі труби L (м), (криві $I(L)$)

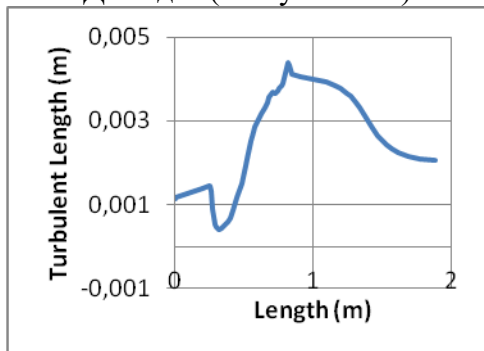
Дослід 1 (труба без статичного змішувача)



Дослід 2 (змішувач №1)



Дослід 3 (змішувач №2)



Дослід 4 (змішувач №3)

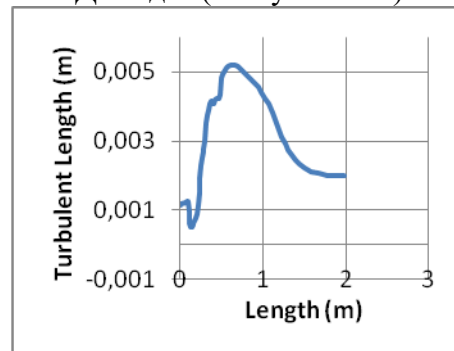


Рисунок 5.43. – Графіки зміни масштабу турбулентностей l_m (м) відносно осі труби L (м), (криві $l_m(L)$)

Таблиця 5.3. – Максимальні та мінімальні значення параметрів

Параметр	№ досліду	Опис конструкції	Мах значення	Мін значення
Швидкість, v (м/с)	1	Труба, без статичного змішувача	4,43	4,41
	2	Зі змішувачем №1	4,88	1,83
	3	Зі змішувачем №2	15,19	3,53
	4	Зі змішувачем №3	15,99	3,59
Завихреність, n , c^{-1}	1	Труба, без статичного змішувача	1,19	0,01

	2	Зі змішувачем №1	108,5	0,01
	3	Зі змішувачем №2	786,5	0,01
	4	Зі змішувачем №3	706,4	0,97
Інтенсивність турбулентності I (%)	1	Труба, без статичного змішувача	2,27	0,89
	2	Зі змішувачем №1	28,13	1,28
	3	Зі змішувачем №2	27,01	1,41
	4	Зі змішувачем №3	43,53	1,73
Масштаб турбулентностей l_m , м	1	Труба, без статичного змішувача	0,0020	0,0011
	2	Зі змішувачем №1	0,0053	0,0005
	3	Зі змішувачем №2	0,0044	0,0004
	4	Зі змішувачем №3	0,0052	0,0005

Максимальні та мінімальні значення параметрів швидкості v , завихреності n , інтенсивності турбулентності I та масштабу турбулентності l_m наведені в таблиці 5.3.

Порівняльний аналіз кривих швидкості $v(L)$ показує, що змішувачі №2 і №3 вигідно відрізняються від змішувача №1, дають близькі значення характеристик поля швидкості потоку в трубі. Максимальна швидкість потоку для них знаходиться на рівні 15-16 м/с, мінімальна 3,5-3,6 м/с, що суттєво більше показників для змішувача №1 (відповідно 4,9 м/с та 1,8 м/с), а також у 3,5 рази переважає максимальну швидкість потоку без змішувача.

Аналіз кривих завихреності $n(L)$ показує, що найкращі дані демонструє змішувач №2 (максимально 786,5 с⁻¹), дещо гірші – змішувач №3 (706,4), на порядок нижчі характеристики маємо для змішувача №1 (108,5). При цьому змішувач №2 забезпечує стабільно високу завихреність у трубопроводі на ділянці довжиною 0,5 м. Для інших змішувачів крива $n(L)$ має нестабільний пульсуючий характер.

Порівняльний аналіз кривих зміни інтенсивності турбулентності $I(L)$ показує суттєву перевагу змішувача №3 (максимально 43,53%) і практичну паритетність результатів для змішувачів №1 і №2 (відповідно 28,13% і 27,01%).

Аналіз кривих зміни масштабів турбулентних завихрень вздовж трубопровода $l_m(L)$ показує практично однакову картину для всіх трьох змішувачів – діаметр вихорів у турбулентних потоках закономірно зменшується на ділянці після змішувача. Темп цих змін масштабу турбулентності ідентичний для конструкцій №1, №2 і №3.

Висновки по моделюванню статичних змішувачів

1. Статичні змішувачі є ефективними пристроями, які дозволяють збільшити турбулентність гідросуміші і при цьому мають ряд переваг: зокрема, велику кількість можливих варіантів конструктивного рішення, від-

сутність рухомих елементів, привода, енергоспоживання, можливість суміщення з гідро- та пневмо-транспортними мережами.

2. Виконані дослідження роботи трьох конструкцій статичного змішувача неньютонівської рідини з параметрами бурового розчину: густина – 1250 кг/м^3 , динамічна в'язкість – $0.02 \text{ Па}\cdot\text{с}$. із застосуванням модуля Flow Simulation програмного середовища SolidWorks дозволили одержати параметричні поля гідросуміші у робочій зоні труби, яка охоплює власне змішувач і відтинок труби за ним довжиною до 20 діаметрів труби: поле швидкостей гідросуміші v (м/с); поле завихреності n (с^{-1}); поле інтенсивності турбулентності I (%), поле масштабу турбулентностей по довжині шляху перемішування l_m (м).

3. За одержаними даними кращі технологічні характеристики перемішування бурового розчину забезпечують змішувачі № 2 і № 3, які рекомендовані для впровадження в системі приготування бурового розчину на ділянці змішування його з реагентами. Для них максимальна швидкість пульпи складає 15,2-16 м/с, завихреність 786-706 с^{-1} , інтенсивність турбулентності 27-43,5%, масштаб турбулентностей $(4,4-5,2) \cdot 10^{-3}$ м.

МОДЕЛЮВАННЯ ІМПЕЛЕРНОГО ПЕРЕМІШУВАЧА СИСТЕМИ ПРИГОТУВАННЯ БУРОВОГО РОЗЧИНУ¹¹¹²

Об'єкт моделювання

Перемішувач механічний бурового розчину ПБР-7,5 призначений для гомогенізації бурового розчину в ємності з метою запобігання відстою. Технічна характеристика перемішувача: діаметр лопаті 900 мм, редуктор черв'ячний універсальний, передавальне число 25, електродвигун потужністю 7,5 кВт, напруга 380 В, частота обертання вала двигуна 1500 хв^{-1} , частота обертання лопаті $60 \pm 5 \text{ хв}^{-1}$. Передбачалася можливість регулювання частоти обертання імпелера мішалки.

Проблема зашламування резервуарів бурового розчину, що пов'язано з недостатньо ефективною його гомогенізацією – типова для сучасних циркуляційних систем при бурінні. Шламкові осади в практиці регенерації бурового розчину ліквідують розмивом гідромоніторами, застосуванням байпасів та іноді вручну – механічним руйнуванням спресованого осаду в застійних зонах

5.2.8.1. Приклад моделювання імпелерного перемішувача із застосуванням програми SolidWorks

Мета моделювання одноімпелерної мішалки – її модернізація шляхом підбору імпелера, який забезпечує найбільш рівномірне поле швидкостей пульпи по всьому робочому простору резервуара.

Моделювання традиційної¹³ для циркуляційної системи бурового розчину конструкції одноімпелерної мішалки виконувалося за допомогою комп'ютерної системи Flow Simulation програмного середовища SolidWorks, що дає можливість моделювання процесів ламінарного та турбулентного протікання рідин. Моделювання виконувалося в два етапи – спершу одержання статичної 3D моделі мішалки з турбінним імпелером з

¹¹ На основі досліджень: Модернізація змішувача ПБР-7,5 циркуляційної системи бурового розчину / В. С. Білецький, І. В. Олефір // Збірник факультету нафти і газу та природокористування Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПНТУ, 2016. – Вип. 9. – С. 50–55.

¹² Нумерація елементів тексту збережена за посібником Білецький В.С. Моделювання у нафтогазовій інженерії (Навчальний посібник) – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 328 с.

¹³ Моделювання «нетрадиційних» - багатоімпелерних мішалок виконано в нашій роботі: Білецький В.С., Мішук Ю.С. Застосування модуля Flow Simulation програмного середовища SolidWorks для дослідження і проектування гідро- та аеромеханічних пристроїв (на прикладі перемішувача «Турботрон») // Збагачення корисних копалин : Наук.-техн. зб. – 2016. – Вип. № 65 (105).

використанням для досліду різних конструкцій лопатей, а потім одержання динамічної картини поля швидкостей пульпи для різних конструкцій мішалок.

Задаємо розрахункову область по всьому об'єму резервуара, який дорівнює 20 м^3 . Вихідними фізичними характеристиками вказуємо типи потоку – ламінарний і турбулентний, адіабатичний процес.

Для лопатей вказуємо область обертання з кутовою швидкістю 75 хв^{-1} . Робоче середовище в резервуарі – буровий розчин густиною 1250 кг/м^3 . На рис. 1 показана одержана статична 3D-модель змішувача ПБР-7,5.

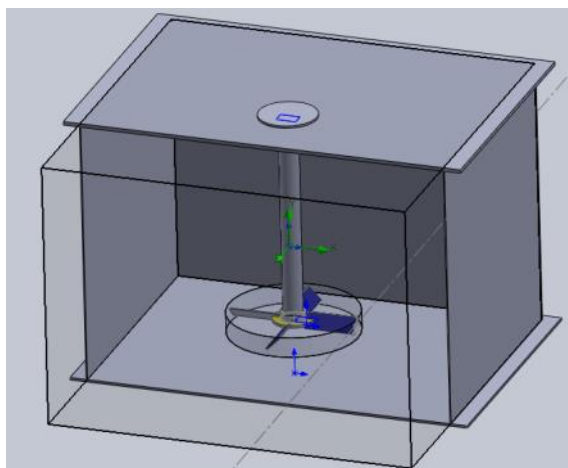


Рисунок 5.44.– Статична 3D-модель змішувача ПБР-7,5 в резервуарі 20 м^3

Для отримання об'єктивних результатів всі досліди проводилися в однакових термодинамічних умовах, габаритні розміри крильчатки і вала дорівнюють 900 мм і 1740 мм відповідно. Розміри перетину робочої ємності резервуара $3000 \times 3000 \text{ мм}$. Для дослідів було обрано напівзакриті турбіни, які зарекомендували себе в нафтохімічній промисловості.

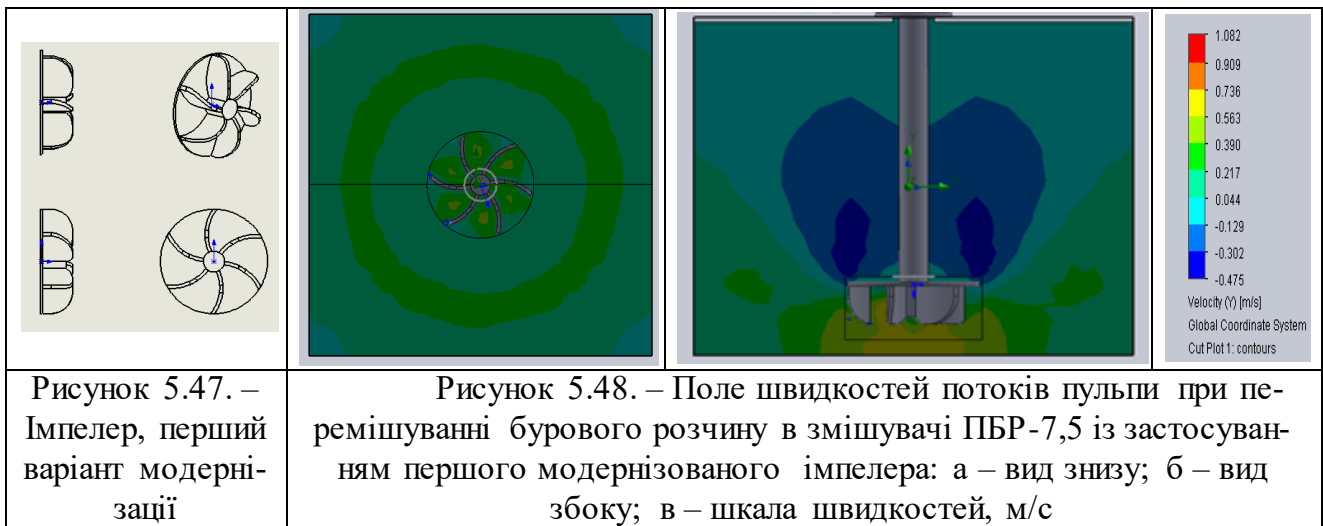
Дослід 1. Об'єкт досліджень – пристрій-прототип. Обладнаний, стандартним відкритим чотирилопатевим імпелером з лопатями розташованими під кутом 45° (рис. 5.45).

Найбільша швидкість потоку бурового розчину спостерігається безпосередньо в зоні робочих лопатей імпелера – 1 м/с . Але об'єм цієї зони обмежений розмірами самого імпелера. Обширна зона підвищеної турбулентності зі швидкостями потоку пульпи $0,4\text{-}0,7 \text{ м/с}$ спостерігається між імпелером і дном резервуара. Але вона не досягає стінок резервуара. Безпосередньо біля стінок резервуара швидкість пульпи відносно мала – від $0,077 \text{ м/с}$ до 0 , що свідчить про підвищену імовірність накопичення в цій зоні осадів твердої фази бурового розчину.

На рис. 5.46 показано поле швидкостей потоків пульпи при перемішуванні бурового розчину в змішувачі ПБР-7,5 і застосуванні імпелера-прототипа.



Дослід 2. Об'єкт досліджень – перший варіант модернізації. Напівзакритий турбінний імпелер з заокругленими лопатями розміщеними дугою до основи (рис. 5.47., 5.48.).

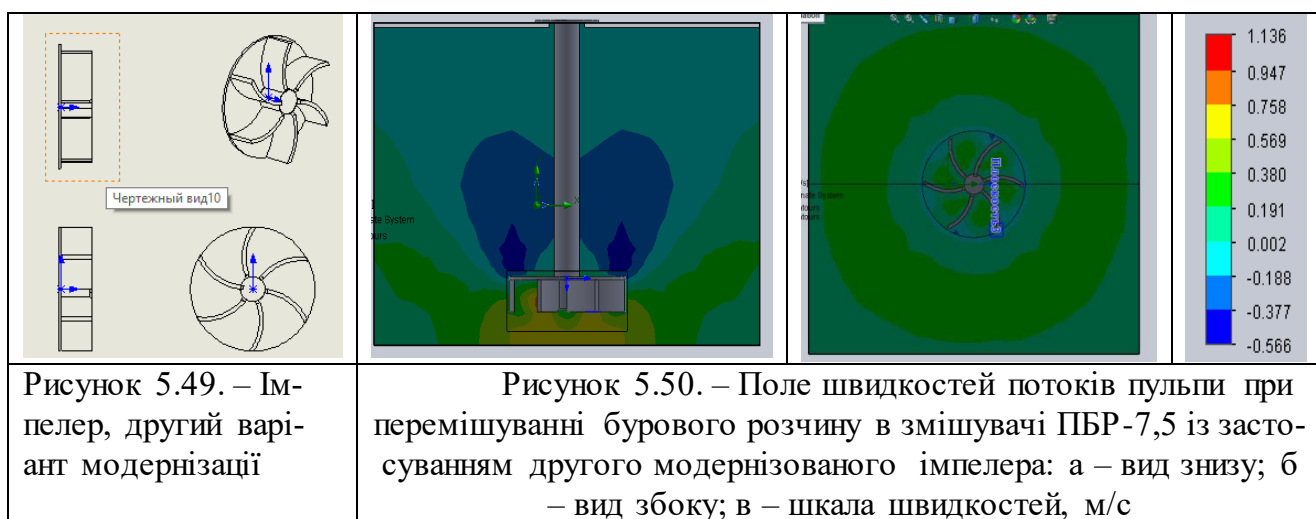


Найбільша швидкість потоку бурового розчину спостерігається робочій зоні імпелера і під ним $-0,563$ м/с до $0,736$ м/с. Обширна зона підвищеної турбулентності зі швидкостями потоку пульпи $0,396-0,563$ м/с спостерігається між імпелером і стінками резервуара, яка розширяється до стінок. При цьому швидкість падає в кутах резервуару до $0,044$ м/с, що створює можливість осадів твердої фази бурового розчину в цій області.

Ці показники значно кращі ніж у прототипу, хоча не є оптимальними. На рисунку 5.48. показано поле швидкостей потоків пульпи при перемішуванні бурового розчину в змішувачі ПБР-7,5 і застосуванні першого модернізованого імпелера.

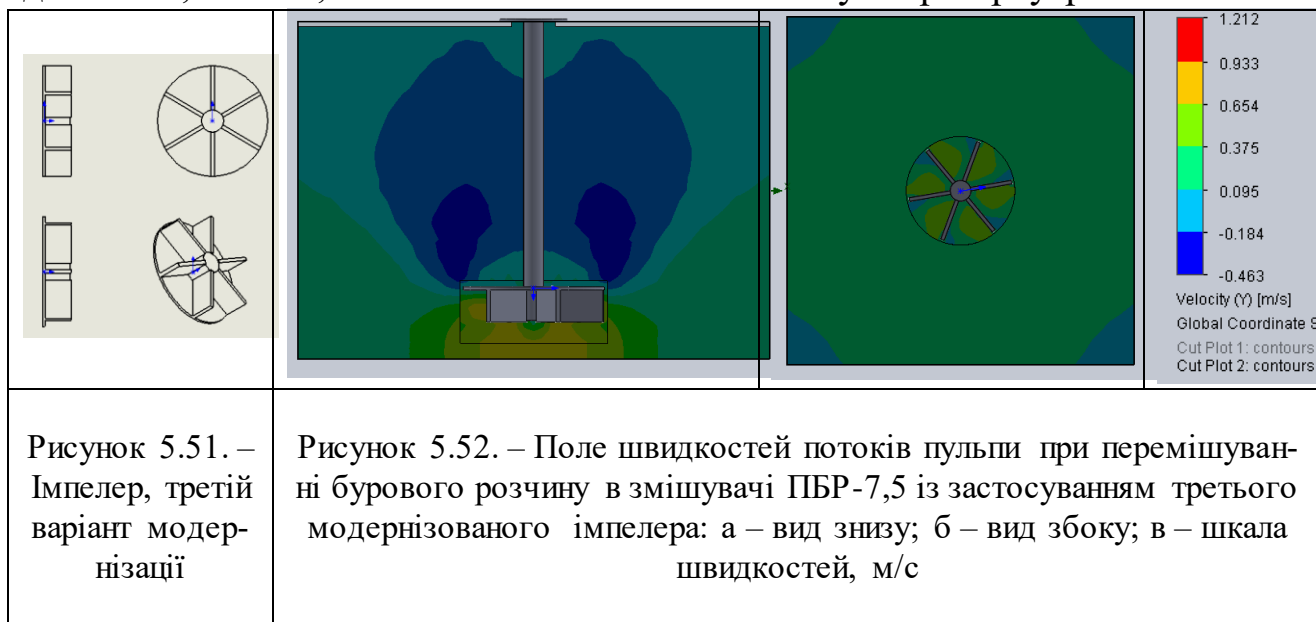
Дослід 3. Другий варіант модернізації. Напівзакритий турбінний імпелер з прямими лопатями розміщеними дугою до основи (рис. 5.49., 5.50.).

Найбільша швидкість потоку бурового розчину спостерігається в робочій зоні імпелера і під ним – 0,569 м/с до 0,758 м/с. Значно більша зона турбулентності спостерігається, ніж у перших дослідях. В цій зоні швидкості потоку пульпи досягають 0,380-0,569 м/с. Швидкість біля стінок резервуару становить від 0,191 м/с до 0,380 м/с, при цьому в кутах зменшиться можливість осаду. Одержані модельні дані показують, що заокруглення на вершині лопаті турбіни зменшує швидкість, що призводить до збільшення осадження крупних класів твердої фази пульпи.



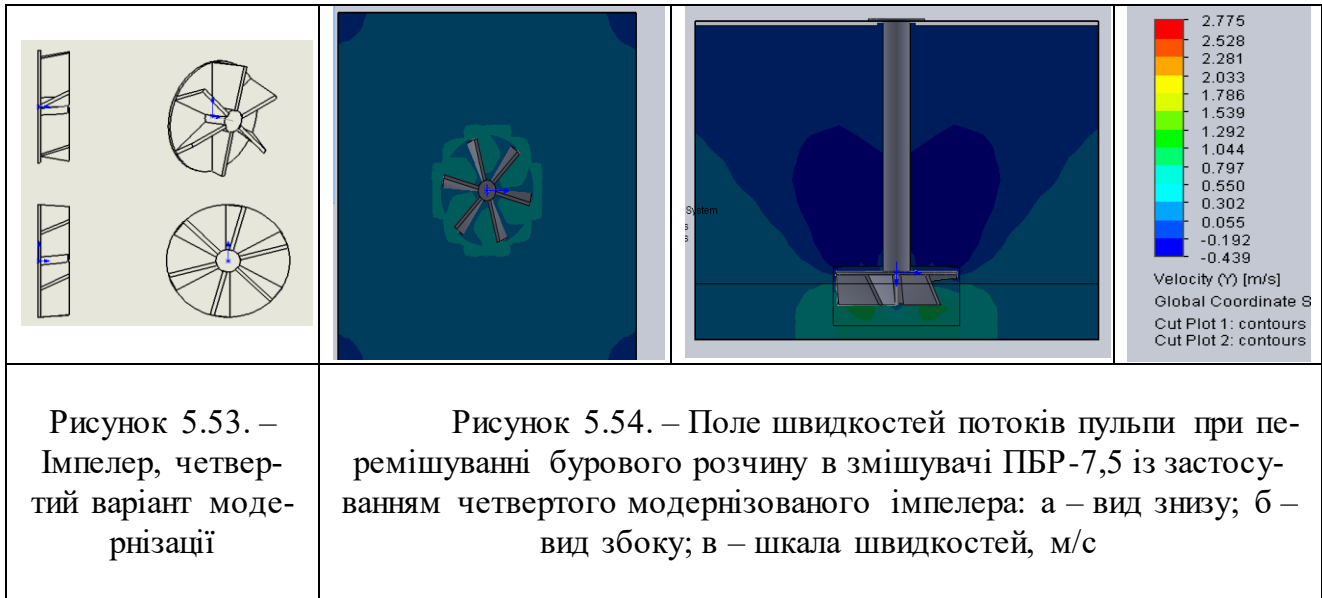
Дослід 4. Третій варіант модернізації. Напівзакрита турбіна з прямими лопатями розміщеними перпендикулярно до осі вала (рис. 5.51., 5.52.).

Найбільша швидкість потоку пульпи варіює від 0,654 м/с до 0,933 м/с, вона спостерігається в робочій зоні імпелера, і довкола неї на відстані від центру 1,6 м, і під ними. Хоча поле турбулентності значно більше ніж в попередніх дослідях і швидкість потоків пульпи в робочій зоні мішалки досягає 0,375 м/с, з'являються застійні зони в кутах резервуара.



Дослід 5. Четвертий варіант модернізації. Напівзакрита турбіна з прямими лопатями вершини яких відносно одна одної розташовані під кутом 15°. (рис. 5.53., 5.54.).

Найбільша швидкість потоку в робочій зоні імелера і довкола неї 0,550 м/с до 0,797 м/с. Спостерігається велика зона підвищеної турбулентності, яка простягається до стінок резервуару. Швидкість в ній становить до 0,302 м/с, але з'являються застійні зони в кутах резервуару, хоча і менші ніж в досліді 4.



Аналіз одержаних результатів та раціональних конструктивних та експлуатаційних рішень.

Для аналізу одержаних результатів розрахуємо критичну швидкість бурового розчину, при якій втрачається його седиментаційна стійкість і зерна твердої фази починають осідати на дно резервуара. Ця швидкість є важливим критеріальним параметром мішалок, так як саме вона детермінує утворення зон можливого зашламування. У нашому випадку, так як крупність твердої фази бурового розчину після його очистки на вібростатах, у циклонах і осадовій центрифугі складає не більше перших десятків мкм, критична швидкість пульпи дорівнює швидкості седиментації часток у дисперсійному середовищі¹⁴:

$$V_c = \frac{2r^2}{9\delta} (\rho - \rho_0)g \quad (5.25)$$

Підставляючи відповідні значення маємо:

$$V_c = \frac{2 \cdot (40 \cdot 10^{-6})^2}{9 \cdot 30 \cdot 10^{-4}} \cdot (2600 - 1250) \cdot 9,8 = 1,568 \cdot 10^{-3} \frac{M}{C}$$

¹⁴ Ходаков Г.С., Юдкин Ю.П., Седиментационный анализ высокодисперсных систем, М., 1981. – 192 с.

Після одержання і аналізу результатів було проведено порівняння прототипу і можливих модернізацій (табл. 5.4.).

Таблиця 5.4.. Порівняльна характеристика досліджених варіантів конструкції мішалки

Варіант конструкції	Швидкість в робочій зоні імелера, м/с	Швидкість в пристінній зоні, м/с	Імовірність виникнення «мертвих зон»	Критична швидкість осадження твердої фази, м/с
Базовий	0,502- 0,749	0,070- 0	Висока	$1,568 \cdot 10^{-3} \frac{M}{c}$
Перший варіант модернізації	0,563- 0,736	0,217- 0	Мала	
Друга модернізація	0,569- 0,758	0,191- 0,380	Мінімальна	
Третя модернізація	0,468- 0,654	0,095- 0	Середня	
Четверта модернізація	0,550- 0,797	0,055- 0	Висока	

Базова конструкція і всі варіанти модернізації, як це витікає зі значень швидкості пульпи в робочій зоні імелера, що лежить в межах 0,468-797 м/с, забезпечують ефективно перемішування бурового розчину у робочій зоні.

Швидкість пульпи в пристінній зоні для базової конструкції і четвертого варіанта модернізації найменша і складає, відповідно, 0,07- 0 м/с і 0,055- 0 м/с. В результаті, імовірність виникнення в пристінній зоні і особливо в кутках резервуара «мертвих зон» велика. Другий варіант модернізації забезпечує суттєво більшу ніж критична швидкість пульпи по всьому робочому простору мішалки, зокрема, у пристінних зонах - 0,191-0,380 м/с. Перший і третій варіант модернізації, хоч і кращі від базового, але не виключають випадіння твердої фази бурового розчину в кутках і пристінній зоні резервуара (швидкість пульпи в цих зонах відповідно по варіантах: 0,217- 0 м/с і 0,095-0 м/с).

Висновки по моделюванню імелерного перемішувача

Виконані дослідження методом комп'ютерного моделювання, а саме SolidWorks з модулем FlowSimulation, показали, що найкращим є другий варіант модернізації одноімелерної мішалки з прямокутним профілем резервуара, - турбіна з прямими лопатями розміщеними дугою до основи, - оскільки при її експлуатації відсутні застійні зони. Водночас, цей варіант забезпечує інтенсивне перемішування бурового розчину робочій зоні при швидкостях 0,569- 0,758 м/с.

Висновки:

1. В результаті проведених досліджень розроблено регресійну математичну модель, яка адекватна процесу осадження нефелін-польовошатових хвостів збагачення рідкіснометалевих руд Мазурівського родовища.
2. Встановлено, що залежність швидкості осадження твердої фази в згущувачі від питомих витрат флокулянту – поліакриламід, - та концентрації іонів водню (рН) в пульпі носить екстремальний характер.
3. Одержана модель дозволяє визначити раціональні параметри найбільш значущих факторів процесу – витрат флокулянту та рН середовища.
4. Модель може бути застосована при розробці промислової технології та засобів управління процесом осадження пульпи у радіальному згущувачі.

Список джерел

1. Пашков А. А., Лаврентьев К. Н. Интенсификация процесса сгущения // Горный журнал. – 2002. – Специальный выпуск. – С. 116-117.
2. Thickener polymer control system// Mining J/ - 1998. - 330. №8476 – с.305
3. Небера В. П. Флокуляция минеральных суспензий. - М.: Недра, 1983. – 288 с.
4. Опыт применения флокуляров в обогащении / Кравцова Т.Н., Рогачева В.Б., Охрименко В.Е.// 2 всес. Науч. Техн. Конф. " Св-ва и применение водораств. Полимеров ",1991.-с. 161-162
5. Бойко В.С., Нечепуренко Е.С., Климанчук В.В., Крамаренко С.А., Шпилевой Л.В. Мазуровское месторождение в стратеги развития Мариупольского металлургического комбината им. Ильича // Горный журнал. – 2002, №11-12. – с.33 - 36
6. Елизаров А.Г. Теоретические основы и практические методы экономии флокулянтов при обогащении руд. III конгр. обогатителей стран СНГ. – М 20-23 марта 2001 г. Тезисы докладов. М. Альтекс, 2001 г. с. 218
7. Білецький В.С., Шпильовий Л.В. Оптимізація режиму осадження твердої фази у згущувачі // Складні системи і процеси. – 2002, №2. – с. 78 – 82
8. Sworovska A. Flocculation of the syncrude fine tailings // Int. J. Miner. Process. - 2000. - 60, №2. – с. 143-152
9. Купеева Р. Д. Исследование процессов обезвоживания продуктов обогащения свинцово-цинковых руд / Сев.-Кавк. технол. ун-т. – Владикавказ, 1998. – 7 с – Деп.в ВИНТИ 25.08.98, № 2657-В98.
10. Интенсификация сгущения шламов железных и медно-никелевых руд с использованием модифицированных флокулянтов / Барский Л. А. и др. // Комплексное освоение минеральных ресурсов Севера и Сев. Зап. СССР (европ. часть).: Матер. Всес. Совещ., Петрозаводск, 1-4 июля, 1989. – Петрозаводск, 1990. – С. 183-187.
11. Барбин М.Б. О влиянии ПАВ и рН среды на отстаивание и фильтрование // Изв. ВУЗ. - Цветные металлы. - 1993, № 3-4. – с. 2 - 4
12. 12. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы. Под ред. О.С.Богданова, Ю.Ф.Ненарокова, 2-е изд. Перераб. и доп. М.: Недра, 1984, 358 с.
13. Митрофанов С.И. Исследование руд на обогатимость. М., Металлургиздат, 1954, 494 с.
14. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 327с.

15. Математичне моделювання процесу осадження рідкіснометалічних руд / Л. В. Шпильовий, В. С. Білецький, П. В. Сергєєв // Вісн. Криворіз. техн.. ун-ту : зб. наук. пр. – 2004. – Вип. 3. – С. 131–135.

Загальна література до Практикуму

Білецький В.С., Смирнов В.О. Моделювання процесів збагачення корисних копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. – 304 с.

Пілов П.І., Анісімов М.Т., Анісімов В.М. Математичне моделювання процесів збагачення корисних копалин: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 104 с.

Козин В.З. Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 112 с.

Білецький В.С., Смирнов В.О. Технологія збагачення корисних копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2007. – 272 с.

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

Папушин Ю.Л., Смирнов В.О., Білецький В.С. Дослідження корисних копалин на збагачуваність. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2006. – 344 с.

Барский Л.А., Рубинштейн Ю.Б. Кибернетические методы в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1970. – 312 с.

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

Младецький І.К. Моделювання процесу магнітної сепарації руд. Дніпропетровськ. 1986.

Пілов П.И., Мильцын А.М., Олевский В.И. Математическое моделирование и структурно-экстраполяционный анализ в задачах обогащения: монографія – 2-е изд., испр. и доп. – Д., Национальный горный университет, 2011. – 187 с.

Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – Киев: Техника, 1975. – 168 с.

Сергєєв П. В., Білецький В. С. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин (практикум) — Маріуполь: Східний видавничий дім, 2016. — 119 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки
до практичних занять з дисципліни
«Моделювання технологічних процесів в нафтогазовій галузі»
для студентів спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології»

Укладач:
БІЛЕЦЬКИЙ Володимир Стефанович

Відповідальний за випуск проф. Фик І.М.
Роботу рекомендував до друку проф. Циганков О.В.
В авторській редакції

План 2021 р., поз. 307

Підп. до друку 07.10.2021 р..
Гарнітура Times New Roman.

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
