

## ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ВАКУУМНИМ ГАЗОТЕРМОЦИКЛІЧНИМ ІОННО-ПЛАЗМОВИМ АЗОТУВАННЯМ

<sup>1</sup>Б.О. Чернов, <sup>2</sup>В.І. Мірненко, <sup>2</sup>М.Я. Ткач

<sup>1</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 48090;  
e-mail: public@nimg.edu.ua

<sup>2</sup> Національний університет оборони України ім. Івана Черняхівського;  
03149, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 28, тел. (044) 2710596, 2710600

На основі аналізу промислових даних показано, що в процесі буріння свердловин відбувається значне число аварій, які пов'язані із корозійно-втомним руйнуванням елементів бурильної колони. Наведено удосконалений технологічний процес зміцнення елементів бурильної колони вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням в імпульсному режимі. Наведено результати дослідження корозійної стійкості зразків із сталі 40XH після зміцнення даним методом. Побудована математична модель залежності корозійної стійкості від технологічних факторів і одержано поверхні відгуку. Отримана залежність перевірена на адекватність, відтворюваність і інформативність результатів за критеріями математичної статистики. Встановлено, що внаслідок впливу удосконаленого технологічного процесу на властивості зміцнених поверхневих шарів відбувається підвищення корозійної стійкості у 1,7÷3.1 разів. Застосування удосконаленої технології зміцнення підвищує довговічність елементів бурильної колони.

Ключові слова: бурильна колона, свердловина, напруження, промивальна рідина.

На основе анализа промышленных данных показано, что в процессе бурения скважин происходит значительное число аварий, связанных с коррозионно-усталостным разрушением элементов бурильной колонны. Приведено усовершенствованный технологический процесс укрепления элементов бурильной колонны вакуумным газотермоциклічним ионно-плазменным азотированием в импульсном режиме. Приведены результаты исследования коррозионной стойкости образцов из стали 40XH после укрепления данным методом. Построена математическая модель зависимости коррозионной стойкости от технологических факторов и получены поверхности отклика. Полученная зависимость проверена на адекватность, воспроизводимость и информативность результатов по критериям математической статистики. Установлено, что в результате воздействия усовершенствованного технологического процесса на свойства упрочненных поверхностных слоев происходит повышение коррозионной стойкости в 1,7 ÷ 3.1 раз. Применение усовершенствованной технологии упрочнения повышает долговечность элементов бурильной колонны.

Ключевые слова: бурильная колонна, скважина, напряжение, промывочная жидкость.

Based on the analysis of industrial data it has been shown that in the process of wells' drilling there occurred a significant number of accidents caused by corrosion-fatigue failure of the drilling string elements. Hereby we give an example of improved technological process of the drilling string elements strengthening by means of vacuum gas-and-thermal-cycle and ion-plasma nitration in the pulse mode. There were also presented the research results regarding the rust resistance of 40XH steel samples after strengthening by means of this method. A mathematical model of dependence of rust resistance on the technological factors was developed, and surface response was received. The obtained dependence was checked for adequacy, reproducibility and information value of results according to the mathematical statistics criteria. It has been established that strengthened layers properties in a result of influence of the improved technological process the rust resistance was increased by 1,7 ÷ 3.1 times. Application of the improved strengthening technology increases the lifetime of the drilling string elements.

Key words: drill string, well, stress, flush liquid.

**Актуальність роботи.** Елементи бурильної колони у ході експлуатації підлягають впливові агресивних реагентів, які викликають їх корозійне ураження. До найбільш агресивних відносяться соляна і плавикова кислоти, які застосовуються для боротьби з прихопленням бурильної колони і обробленням привибійної зони свердловини; сірковуглеводень, розчинений в промивальній рідині кисень, а також деякі реагенти для регулювання реологічних властивостей промивальної рідини [1].

Внаслідок цього, наявність корозійних пошкоджень елементів бурильної колони стає причиною їх посиленого зношування, та знижує їх несучу здатність і призводить до перед-

часного виходу з ладу та раптових руйнувань через ураження значної частини поверхні або в результаті великої концентрації напружень, обумовленою формою і місцем ураження. Крім цього, у закордонній і вітчизняній практиці спостерігаються випадки корозійно-втомного ураження елементів бурильної колони по тілу або по зварних з'єднаннях [2].

Одним із напрямків забезпечення надійності елементів бурильної колони шляхом підвищення їх корозійної стійкості є застосування досягнень у галузі формування захисних зміцнюючих поверхневих шарів, які забезпечуються високоякісними технологіями і дозволяють із науковою обґрунтованістю та техніко-

економічною цілеспрямованістю вирішувати питання на етапах їх проектування, виготовлення і експлуатації.

Перспективним для підвищення корозійної стійкості елементів бурильної колони є метод вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування. Низькотемпературне вакуумне іонне азотування елементів бурильної колони здійснюється у плазмі тліючого розряду, що горить у середовищі азоту, іноді з додаванням аргону [3], особливо його вдосконалений варіант – вакуумне газотермоциклічне іонно-плазмове азотування в пульсуючому режимі (ВГТЦПА) [4]. У разі використання цього способу внаслідок пульсуючого струму розряду і газотермічних циклів насичення приповерхневих шарів значно скорочуються тривалість оброблення, знижуються витрати електроенергії і реакційних газів, поліпшуються експлуатаційні характеристики деталей, що зміцнюються

**Метою статті** є підвищення корозійної стійкості сталевих елементів бурильної колони методом ВГТЦПА.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Технологічний процес ВГТЦПА у плазмі пульсуючого тліючого розряду для зміцнення поверхневих шарів елементів бурильної колони розроблений в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України та реалізований на установці ВПА-1, загальний вигляд якої наведено на рис. 1.



**Рисунок 1 – Загальний вигляд установки ВПА-1**

Установка складається з вакуумної камери; системи відкачування повітря та газів (вакуумування); системи забезпечення газом; системи вимірювання та регулювання температури; системи електроживлення; автоматизованої системи контролю та управління технологічним процесом.

Суть удосконаленого технологічного процесу ВГТЦПА полягає у тому, що деталь поміщають у контейнері відкачують з нього повітря до тиску 133 Па. Контейнер продувають робочим газом за тиску 1330 Па за допомогою системи газопостачання. Створюють тиск робочого газу до 250 Па і, утримуючи його незмінним, подають напругу 1100...1400 В на деталь та стінки контейнера за допомогою системи електричного живлення та управління. Далі

збуджують тліючий розряд, здійснюють катодне розпилення протягом 5...60 хв., при якому деталь нагрівають до 400 °С, відтак понижують напругу до робочої за допомогою системи електричного живлення та управління. Підвищують тиск робочого газу до 25...1330 Па за допомогою системи газопостачання, здійснюють дифузійне насичення, при якому подають пульсуючу напругу 1000 – 1200 В з тривалістю імпульсу 10 – 20 мс та величиною періоду подавання імпульсів 40 мс на деталь та стінки контейнера за допомогою системи електричного живлення та управління. При цьому припиняють циклічно подавання робочого газу у контейнер з тривалістю напівциклу 15...30 хв. та змінюють температуру циклів насичення азотом і деазотації вище температури евтектоїдного перетворення або нижче температури евтектоїдного перетворення, не припиняючи електроживлення, надаючи можливість деталі при охолодженні знаходитися у плазмі тліючого розряду до температури 400 °С. Далі деталь охолоджують до кімнатної температури в середовищі робочого газу і виймають із контейнера.

Таке технологія дозволяє отримати азотований шар товщиною не більше 360 мкм та уникнути окрихчування. При температурі нижче 400 °С процес азотування не здійснюється, а при температурі вище 600 °С утворюється азотований шар зі зниженими механічними властивостями у зв'язку з можливим перегрівом поверхні у плазмі тліючого розряду, що має підвищену енергоємність. Після вказаних температур нагрівання здійснюється охолодження деталі в плазмі тліючого розряду до 400 °С протягом 0,5 – 1 години, що дає змогу підвищити концентрацію нітридних фаз для формування більш рівномірного і однорідного зміцненого шару.

Алгоритм технологічного процесу ВГТЦПА відображений на рис. 2.

Імпульсний режим ГТЦПА (рис. 3) реалізується наступним чином: змінний струм через понижуючий трансформатор 6 (рис. 4) поступає на вхід електронного блоку управління 7, далі – на два комутуючі тиристори 1. Блок управління за допомогою змінного опору 8 дозволяє змінювати тривалість імпульсів подавання напруги на тиристори. Комутуючі тиристори регулюють амплітуду струму та тривалість його проходження по первинній обмотці підвищувача трансформатора 2. Із вторинної обмотки трансформатора 2 підвищена до 1000...1200 В напруга подається на випрямляючий діодний місток 3, на виході з якого отримується однополярна пульсуюча напруга, яка, у свою чергу, подається на катод – деталь 4 та анод – стінки вакуумної установки 5.

Для визначення оптимальних технологічних режимів ВГТЦПА проведено оптимізацію процесу насичення приповерхневого шару. Оцінку корозійної стійкості проводили за критерієм оптимізації, а саме, за питомим збільшенням маси зразків у залежності від часу випробувань.

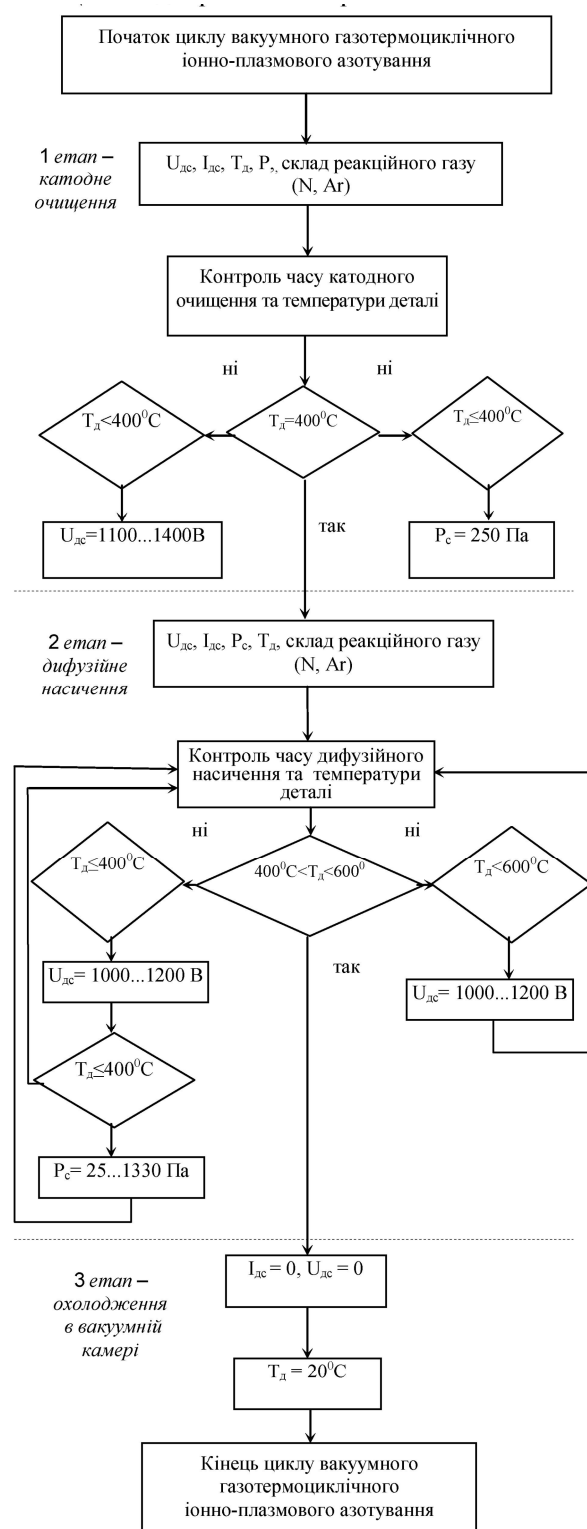
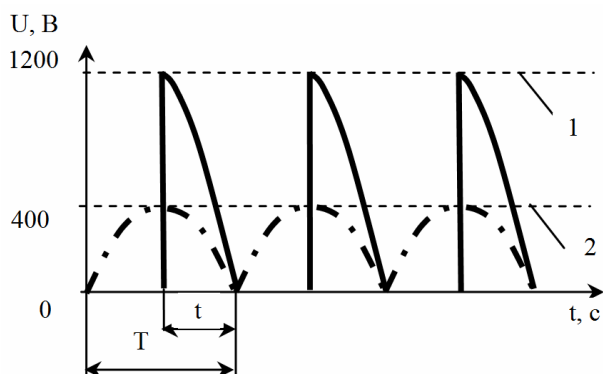
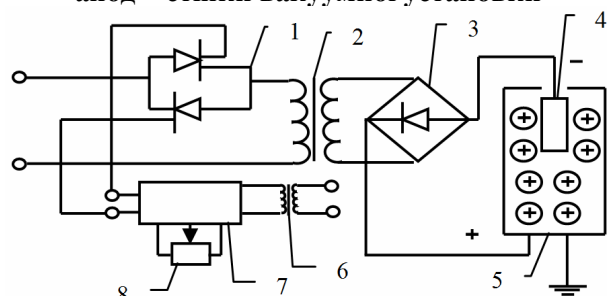


Рисунок 2 – Алгоритм технологічного процесу ВГТЦПА

Для оцінки корозійної стійкості проводили 10-годинні досліді плоских зразків зі сталі 40ХН (рис. 5), в алундових тиглях на спокійному повітрі при 973К. Перед початком дослідів та кожні 2 години витримування на поверхню зразків, наносили сольову обмазку, яка складалася з  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  та  $\text{NaCl}$  (у співвідношенні 3:1). Результати усереднювали за трьома значеннями.



1 – режим із пульсуючою напругою; 2 – режим із постійною напругою  
Рисунок 3 – Параметри струму, що подається на катод – деталь та анод – стінки вакуумної установки



1 – комутуючі тиристоры; 2 – підвищуючий трансформатор; 3 – діодний місток; 4 – катод-деталь; 5 – анод-стінка вакуумної камери; 6 – понижуючий трансформатор; 7 – блок управління; 8 – змінний опір  
Рисунок 4 – Схема установки для реалізації імпульсного режиму ВГТЦПА

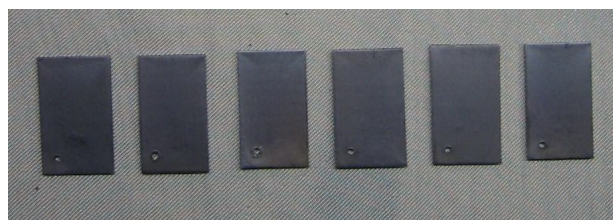


Рисунок 5 – Зразки для випробування на корозійну стійкість

Для визначення керованих факторів було розглянуто всі існуючі групи факторів, що можуть здійснювати вплив на технологічний процес. При виборі керованих факторів до вивчення процесу підходили комплексно, тобто враховувався вплив конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Використовуючи методи експертної оцінки і, провівши серію відсіюючих експериментів, було отримано середній апріорний ранжований ряд факторів, які впливають на технологічний процес, а саме, враховувався вплив конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Фактори та рівні їх варіювання зведені до таблиці 3.

Для вибраного числа факторів та рівнів варіювання побудовано план експерименту на основі ЛП<sub>r</sub>-чисел. Він подається у вигляді робочої матриці в натуральних координатах (табл. 4).

Таблиця 3 – Фактори та рівні їх варіювання

№	Фактори	Позначення	Рівні варіювання		
1	Час дифузійного насичення, хв	X <sub>1</sub>	90...240		
2	Тиск реакційного газу, Па	X <sub>2</sub>	25...250		
3	Склад реакційного газу	X <sub>3</sub>	60%Ar + 40% N <sub>2</sub>	75%Ar + 25% N <sub>2</sub>	90%Ar + 10% N <sub>2</sub>
4	Температура газу, °К	X <sub>4</sub>	673	773	873
5	Величина температурного циклу, °К	X <sub>5</sub>	25...125		

Таблиця 4 – План експерименту в натуральних координатах

№ з/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>
1	170	140	75%Ar+25%N <sub>2</sub>	773	75	14
2	130	190	60%Ar+40%N <sub>2</sub>	873	50	20
3	200	80	90%Ar+10%N <sub>2</sub>	673	100	8
4	110	170	90%Ar+10%N <sub>2</sub>	873	90	5
5	190	50	75%Ar+25%N <sub>2</sub>	773	40	16
6	150	100	75%Ar+25%N <sub>2</sub>	673	110	22
7	220	220	60%Ar+40%N <sub>2</sub>	773	60	11
8	100	230	90%Ar+10%N <sub>2</sub>	673	44	3
9	180	120	60%Ar+40%N <sub>2</sub>	873	95	15
10	140	70	90%Ar+10%N <sub>2</sub>	773	65	20
11	210	180	75%Ar+25%N <sub>2</sub>	673	120	9
12	120	90	60%Ar+40%N <sub>2</sub>	873	80	7
13	190	200	90%Ar+10%N <sub>2</sub>	673	30	18
14	160	130	60%Ar+40%N <sub>2</sub>	773	106	24
15	230	40	75%Ar+25%N <sub>2</sub>	873	56	12
16	90	150	75%Ar+25%N <sub>2</sub>	673	70	8

Таблиця 5 – Результати дослідження корозійної стійкості азотованих зразків

№ режиму обробки	Питоме збільшення маси зразка Δ m/m після 10 годин випробувань	
	Y <sub>1.1</sub>	Y <sub>1.2</sub>
Без обробки	0,52	0,48
1	0,42	0,40
2	0,17	0,23
3	0,27	0,29
4	0,23	0,21
5	0,19	0,24
6	0,24	0,27
7	0,25	0,24
8	0,26	0,29
9	0,17	0,19
10	0,22	0,18
11	0,23	0,28
12	0,26	0,23
13	0,18	0,26
14	0,24	0,26
15	0,25	0,23
16	0,25	0,28

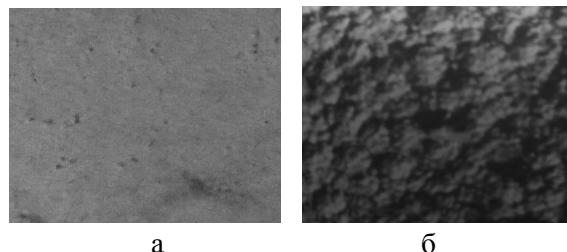
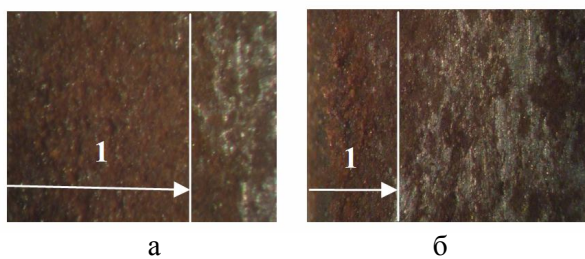


Рисунок 7 – Мікроструктура поверхні зразка а) до та б) після випробувань, х 500

В результаті проведення досліджень антикорозійної стійкості сталевих зразків після ВГТЦПА встановлено [5], що завдяки впливу удосконаленого технологічного процесу на властивості зміцнених поверхневих шарів відбувається підвищення корозійної стійкості у 1,7...3,1 разів (залежно від технологічних режимів обробки) (табл. 5). Зовнішній вигляд зразків до та після випробувань наведено на рис. 7 та 8, а характер зміни питомого збільшення маси зразка від часу на рис. 9. З рис. 8 чітко видно, що корозійне ураження термооброблених без зміцнення ВГТЦПА зразків відбувається на значно більшу глибину, ніж у зміцнених.

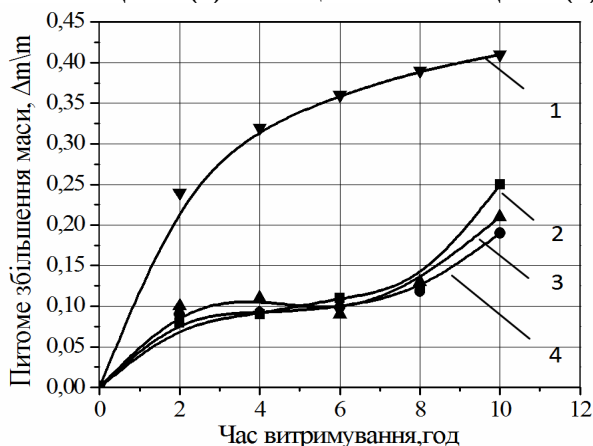
За результатами експерименту проведено статистичний аналіз та побудовано регресійну модель залежності критерію оптимізації, який характеризує межу витривалості сталі 40XH зі зміцненим поверхневим покриттям від конст-





1 – зона корозійного ураження

**Рисунок 8 – Мікроструктури перпендикулярного поверхні шліфа зразків без ВГТЦПА (а) та зміцненого ВГТЦПА (б)**



1 – без зміцнення; 2 – ВГТЦПА (90%Ar+10%N<sub>2</sub>); 3 – ВГТЦПА (75%Ar+20%N<sub>2</sub>); 4 – ВГТЦПА (60%Ar+40%N<sub>2</sub>)  
**Рисунок 9 – Залежність питомого збільшення маси зразка від часу випробувань**

руктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Розрахунок моделі здійснювався за допомогою пакету прикладних програм ПРІАМ. За початкові дані використовували матрицю планування експерименту та результати експериментальних досліджень.

Після обробки результатів експерименту отримано математичну модель, що описує залежність питомого збільшення маси зразка від технологічних та експлуатаційних факторів.

$$Y = 0,252985 + 0,0232932 x_2^2 x_4^2 - 0,01990961 x_3^2 - 0,02081 x_5^2 - 0,0212151 x_1 x_5 - 0,0921139 x_3^2 x_4^2 x_5^2 - 0,0908706 x_1^2 x_3^2 x_4^2;$$

де Y – математична модель у кодованих значеннях для питомого збільшення маси зразка Δ m/m.

Формули переходу від кодованих значень до натуральних:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,0142815(X_1 - 160,604); \\ x_1^2 &= 1,64458(X_1^2 - 0,0191164X_1 - 0,372824); \\ x_1^3 &= 3,31219(X_1^3 - 0,0582365X_1^2 - 0,654433 X_1 + 0,0145849); \\ x_2 &= 0,0100246(X_2 - 136,182); \\ x_2^2 &= 1,56832(X_2^2 - 0,0387083X_2 - 0,34791); \\ x_2^3 &= 3,195(X_2^3 - 0,0147624X_2^2 - 0,663917 X_2 - 0,08331); \\ x_3 &= 1(X_3 - 1); \\ x_3^2 &= 1,6(X_3^2 - 0,625); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_4 &= 0,00941176(X_4 - 766,75); \\ x_4^2 &= 1,64632(X_4^2 - 0,0907563X_4 - 0,605536); \\ x_5 &= 0,0227556(X_5 - 74,8047); \\ x_5^2 &= 1,55962(X_5^2 - 0,0132701X_5 - 0,354272); \\ x_5^3 &= 3,1495(X_5^3 - 0,00418042X_5^2 - 0,675089X_5 - 0,00322023). \end{aligned}$$

де X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>, X<sub>4</sub> та X<sub>5</sub> – конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори.

Отримана залежність перевірена на адекватність, відтворюваність та інформативність результатів за критеріями математичної статистики.

Результати повторних досліджень, що проведені в однакових умовах, перевірилися на статистичну відтворюваність за G – критерієм Кохрена. Для отриманої регресійної залежності G<sub>розр</sub> < G<sub>табл</sub> при α = 0,05. Тому, ступінь розсіювання результатів за рядками матриці планування однакова, а результати відтворені.

Перевірка гіпотези на адекватність отриманої моделі результату експерименту проводилася з використанням F – критерію Фішера. Для одержаної моделі при прийнятому рівні значущості α = 0,05 F<sub>розр</sub> < F<sub>табл</sub>, тому модель адекватно відображає результат експерименту.

Оцінка якості отриманої математичної моделі проводилася шляхом визначення коефіцієнта множинної кореляції. В отриманій математичній моделі коефіцієнт множинної кореляції статистично значущий, тобто F<sub>розр</sub> > F<sub>табл</sub>, при прийнятому рівні значущості. Отже, модель інформативна і несе корисну інформацію про процес, що моделюється.

Для визначення факторів проведено графічне дослідження їх впливу на критерій оптимізації, що характеризує корозійну стійкість сталі 40ХН зі зміцненим поверхневим шаром ВГТЦПА. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків частинних рівнянь регресії (рис. 10 – 15).

Візуальний аналіз графіків дозволяє провести детальний аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначити те значення факторів, яке впродовж всього часу впливу здійснює найбільший чи найменший ефект.

На основі отриманих результатів можна одержати наочне уявлення про геометричний образ функції відгуку побудовою відповідної геометричної поверхні, які представлено для корозійної стійкості на рис. 12 – 15.

**Висновки.** В результаті оцінки параметрів технологічного процесу ВГТЦПА на корозійну стійкість сталі 40ХН встановлено, підвищення корозійної стійкості у 1,7...3,1 рази.

Використання методу ВГТЦПА дозволить підвищити ресурс елементів бурильної колони, а також прогнозувати їх довговічність. Це дасть можливість підвищити ефективність їх роботи.

### Література

1 Файн Г.М. Проектирование и эксплуатация бурильных колонн для глубоких скважин / Г.М. Файн. А.С. Неймарк. – Москва: Недра, 1985. – 237 с.



Рисунок 10 – Графіки частинних рівнянь регресії  $Y = f(X_2, X_3)$

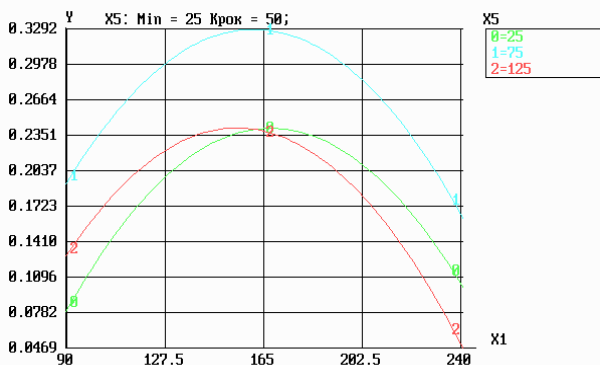


Рисунок 11 – Графіки частинних рівнянь регресії  $Y = f(X_1, X_5)$

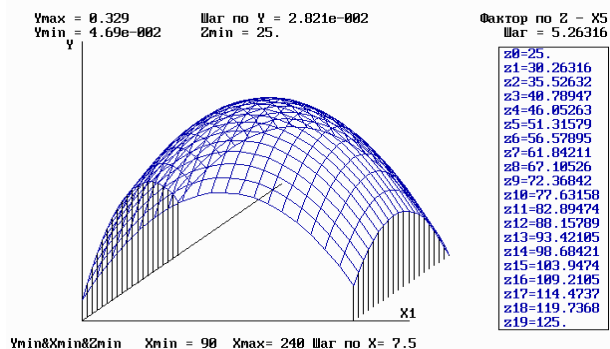


Рисунок 12 – Графік дослідження поверхні відгуку  $Y = f(X_1, X_5)$  в тривимірному просторі

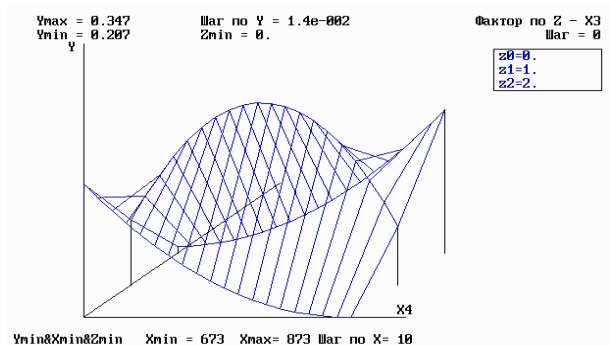


Рисунок 13 – Графік дослідження поверхні відгуку  $Y = f(X_4, X_3)$  в тривимірному просторі

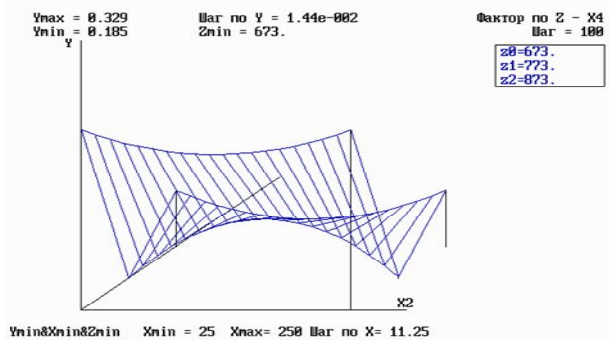


Рисунок 14 – Графік дослідження поверхні відгуку  $Y = f(X_2, X_4)$  в тривимірному просторі

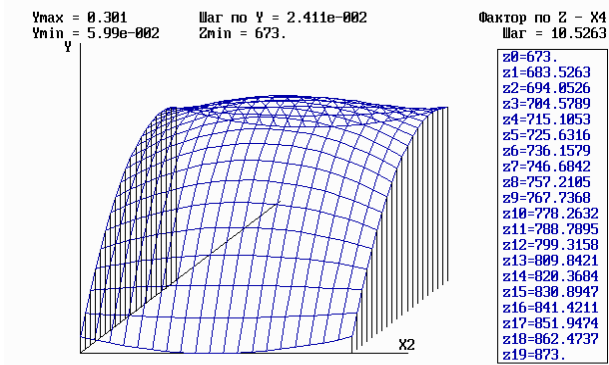


Рисунок 15 – Графік дослідження поверхні відгуку  $Y = f(X_2, X_4)$  в тривимірному просторі

2 Чернов Б.О. Методы повышения работоспособности бурильных и обсадных колон в нефтяных и газовых скважинах: дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.15.10. «Бурение скважин» / Б.О. Чернов. – Ивано-Франковск, 1999. – 345 с.

3 Ляшенко Б.А. О достоинствах технологии вакуумного азотирования / Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский // Оборудование и инструмент. – 2005. – № 12. – С. 20–21.

4 Оптимизация технологии нанесения покрытия по критериям прочности и износостойкости / Б.А. Ляшенко, Е.К. Соловых, В.И. Мирненко, А.В. Рутковский, М.И. Черновол; Под ред. В.В. Харченко – Киев: Ин-т пробл. Прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2010. – 193 с.

5 Підвищення довговічності елементів бурильної колони методом дифузійного насичення при вакуумному газотермоциклічному іонному азотуванні в імпульсному режимі / В.І.Мирненко, Б.О.Чернов, О.В.Радько, М.Я.Ткач // Сборник научных трудов ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины «Породоразрушающий и металло-обрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения». – 2013. – Вып. 16. – С. 136-142.

Стаття надійшла до редакційної колегії 04.11.14

Рекомендована до друку професором **Векериком В.І.** (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) д-ром техн. наук **Куртсеїтовим Т.Л.** (Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, м. Київ)