

О.С. Мельник

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ТА РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯТОРА ДЛЯ ОЧИЩЕНИЯ ХРОМОВМІСНЫХ СТИЧНЫХ ВОД

Глухівський національний педагогічний університет ім. О. Довженка

У статті надано результати експериментальних досліджень процесу електрокоагуляційного знешкодження стічних вод, що містять високотоксичний шестивалентний хром. Наведено висновки статичного оброблення даних і математичного аналізу ефективності очищення стоків. Обрані в ході досліджень параметри повністю відповідають вимогам до оптимізації процесу. Ефективність очищення стічних вод за умов використання запропонованих параметрів сягає 99,98%.

Одним з перспективних методів знешкодження хромовмісних стічних вод (СВ) на сьогодні є електрокоагуляція. Нами було розроблено та досліджено експериментальну модель електрокоагулятора надано на рис 1.

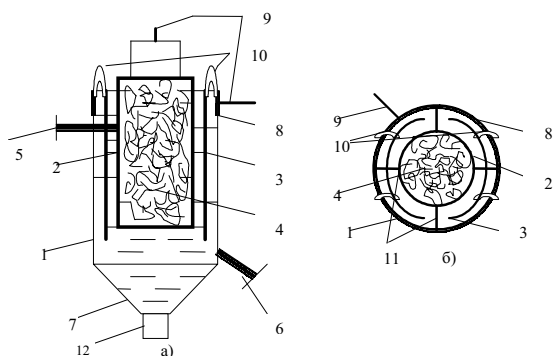


Рис. 1. Електрокоагулятор: а) поздовжній розріз апарата; б) вигляд зверху; 1 – корпус електролізера; 2 – чарунка анода; 3 – катод; 4 – стружка; 5 – патрубок введення стоків; 6 – патрубок виведення стоків; 7 – шламовіжник; 8 – обруч для закріплення катода; 9 – струмопідводи; 10,11 – штуцера для закріплення катода і анода; 12 – патрубок для відведення шламу

Завданням експериментальних досліджень процесу очищення СВ є пошук оптимальних конструктивних параметрів і режимів роботи технологічного устаткування за трьома інтегральними показниками (параметрами оптимізації) якості очищення:

- 1) ступінь відновлення іонів шестивалентного хрому, %;
- 2) ефективність осадження іонів тривалентного хрому, %;
- 3) питомі витрати електроенергії, (кВт·год)/м<sup>3</sup>.

Для проведення експериментів було відібрано 9 факторів (6 конструктивних та 3 режимних),

що імовірно впливають на якість очищення стоків (табл. 1). Відсіювання несуттєвих факторів проводили на основі апріорного ранжування.

При плануванні експерименту до факторів висували наступні вимоги:

1. Фактори мають бути керованими;
2. Фактори мають безпосередньо впливати на об'єкт досліджень;
3. Всі комбінації факторів мають бути сумісними між собою;
4. Фактори мають бути незалежними.

Вибір рівнів варіювання факторів приймали у відповідності до літературно-патентних даних [1–3] та виходячи з того, що розроблена модель електрокоагулятора має ефективно виконувати очищення СВ, відповідати вимогам до створення замкнених систем водообігу, максимально використовувати корисний об'єм апарата (з метою мінімізації виробничих площ, зайнятих під очисне обладнання), бути енергоощадною та економічно доцільною.

Розв'язок задачі оптимізації, тобто вишукування вектора, здійснювали методом покоординатного спуску. Метод покоординатного спуску зводить задачу знаходження найменшого значення функції багатьох змінних до багатократного рішення двомірних задач оптимізації. Було обрано план двофакторного експерименту. Варіюючи два фактори та стабілізуючи усі інші на обраних рівнях, знаходили залежність досліджуваного параметра від двох факторів. Для визначення області відгуку багатфакторної системи будували частинні залежності.

На першому етапі досліджували вплив зміни конструктивних параметрів електрокоагулятора (факторів  $X_1$ – $X_6$ ) на ефективності відновлення іонів шестивалентного хрому. Експерименти другого етапу виконували варіюючи значення режимних параметрів процесу електрокоагуляції (факторів  $X_7$ – $X_9$ ) з метою оптимізації процесів осад-

Фактори, що впливають на процес очищення СВ та рівні їх варіювання

Позначення факторів	Змінний фактор	Інтервал варіювання	Рівні варіювання		
			-1	0	+1
Конструктивні фактори					
X <sub>1</sub>	Величина зазора між анодною чарункою та катодом, r <sub>з</sub> , м	0,0225	0,005	0,0275	0,05
X <sub>2</sub>	Співвідношення між висотою електрокоагуляційної зони та радіусом поперечного перетину електрокоагулятора, H <sub>з</sub> :R	2,75	1,3	4,05	6,8
X <sub>3</sub>	Співвідношення між висотою електродної системи та загальною висотою електрокоагуляційної зони, h:H <sub>з</sub>	0,25	0,5	0,75	1,0
X <sub>4</sub>	Кут нахилу конуса відстійної камери, α, °	15	30	45	60
X <sub>5</sub>	Щільність завантаження анодної камери, γ <sub>ме</sub> , кг/м <sup>3</sup>	85	10	95	180
X <sub>6</sub>	Повнота використання матеріалу анодного завантаження до зниження ефективності очищення, η <sub>м</sub>	0,475	0,05	0,525	1
Режимні фактори					
X <sub>7</sub>	Щільність анодного струму, i А/м <sup>2</sup>	2,7	1,8	4,5	7,2
X <sub>8</sub>	pH, од.	3	2	5	8
X <sub>9</sub>	Час оброблення стоків, с	2550	3300	5850	8400

ження іонів тривалентного хрому та мінімізації енерговитрат.

Така оптимізаційна задача полягає у визначенні екстремумів функції M(Y) в області змінних конструктивних та режимних параметрів очисного обладнання f(X̄). Якщо, математичне очікування критерію оптимізації Y є функцією від вектора X вхідних керувань змінних (факторів варіювання) M(Y)=f(X̄)=f(X<sub>1</sub>;X<sub>2</sub>;...;X<sub>n</sub>), де n – число факторів, то задача оптимізації зводиться до пошуку таких значень факторів X̄\*=(X<sub>1</sub>\*;X<sub>2</sub>\*;...X<sub>n</sub>\*), при яких цільова функція досягає екстремуму (виходимо з завдання знаходження мінімуму) [4–5].

Таким чином, математичне очікування критерію оптимізації, надане поліномним рівнянням має вигляд:

$$M(Y)=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_{12}X_1X_2+b_{11}X_1^2+\dots, \quad (1)$$

де b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, ... – коефіцієнти регресії при відповідних змінних.

В якості критерію відгуку приймали найменше значення Y (екстремум мінімуму), що відповідає мінімальній кінцевій концентрації хрому в обробленій воді.

Математичну обробку результатів експериментів проводили за допомогою пакетів програм Statistica 6.0 та Maple 7.0.

Визначення оптимальних конструктивних параметрів електро-коагулятора. Серію дослідів, щодо оптимізації конструктивних параметрів, виконували на розведеному електроліті хромування, в якості анодного завантаження використовували залізну стружку, щільність анодного струму (X<sub>7</sub>) підтримували в діапазоні 3,5–4,0 А/м<sup>2</sup>, початкова концентрація Cr<sup>6+</sup> складала 100 мг/л, NaCl – 100 мг/л, теоретично розрахований час перебування СВ в електрокоагуляторі, необхідний для

напрацювання порції гідроксиду (X<sub>9</sub>) – 140 хв, що відповідало лінійній швидкості потоку в електрокоагуляторі 2,78·10<sup>-5</sup> м/с. Початкове значення кислотно-лужної реакції розчину (X<sub>8</sub>) складало 5,5 рН, температура води – 20–25°С.

Для незалежного оцінювання впливу визначальних факторів на процес знешкодження СВ всі досліди виконували за аналогічною схемою організації процесу при одноразовому проходженні промивної води через електрокоагулятор у низхідному напрямі.

З метою визначення оптимальної міжелектродної відстані (X<sub>1</sub>) та ефективного співвідношення між висотою електрокоагуляційної зони та радіусом поперечного перетину електрокоагулятора (X<sub>2</sub>), беручи за постійну величину радіус електрокоагулятора (R=0,074 м), в дослідженнях поступово змінювали висоту зони електрокоагуляції (з інтервалом в 0,05 м) та міжелектродну відстань (з інтервалом в 0,005 м). В якості нульових рівнів факторів приймали X<sub>3</sub><sup>0</sup>=0,75; X<sub>4</sub><sup>0</sup>=45; X<sub>5</sub><sup>0</sup>=95; X<sub>6</sub><sup>0</sup>=0,525. Показником ефективності виступала кінцева концентрація шестивалентного хрому (табл. 2).

Як видно з табл. 2, найбільш ефективно процес знешкодження іонів шестивалентного хрому відбувається в діапазоні значень міжелектродної відстані (X<sub>1</sub>) 0,03–0,04 м. При відстані менше за 0,01 м відбувається активне зашламовування міжелектродного простору, окрім того, на аноді виникає перенапруга, що супроводжується пасивацією поверхні анодної чарунки, в деяких випадках відмічалось виділення кисню. Збільшення міжелектродного простору до 0,05 м призводить до нерівномірного перерозподілу струмових навантажень за площиною анода.

Подібний вплив чинить конструктивне зменшення висоти електродної зони відносно діаметру електрокоагулятора, при цьому відбувається

Залежність кінцевої концентрації  $Cr^{6+}$  від міжелектродної відстані та співвідношення висоти зони електрокоагуляції до її радіусу поперечного перетину

$X_1$	$X_2$								
	1,3	2,0	2,7	3,4	4,0	4,7	5,4	6,1	6,8
	Кінцева концентрація іонів шестивалентного хрому (мг/л)*								
0,005	22,55	16,56	8,60	5,45	6,98	8,08	10,23	14,60	19,45
0,010	18,34	12,97	5,93	3,34	5,48	6,74	6,84	13,35	17,89
0,015	19,25	12,23	3,01	1,87	2,90	4,03	5,96	10,11	15,23
0,020	9,81	5,13	0,63	0,45	0,50	1,52	2,23	4,33	5,13
0,025	1,96	1,87	0,13	0,12	0,17	0,48	0,65	1,31	1,62
0,030	0,54	0,42	0,03	0,02	0,03	0,19	0,22	0,31	0,47
0,035	0,53	0,33	0,04	0,02	0,03	0,19	0,19	0,29	0,45
0,040	0,52	0,20	0,05	0,03	0,04	0,21	0,20	0,29	0,47
0,045	1,58	0,12	0,12	0,10	0,12	0,11	0,31	0,65	1,06
0,050	6,70	2,35	1,52	0,40	0,52	1,33	1,35	2,74	3,12

\*Примітка: \* – використано позасистемні одиниці, які дозволяють проводити порівняння з результатами отриманими іншими дослідниками

уповільнення процесів напрацювання гідроксо-комплексів у напрямі центральної осі анодної камери.

Ефективне конструктивне співвідношення між висотою електрокоагуляційної зони та радіусом поперечного перетину електрокоагулятора ( $X_2$ ) – 3,4. Тобто, оптимальна висота електрокоагуляційної зони лабораторного електрокоагулятора складає 0,25 м. При збільшенні висоти до 0,5 м ( $H_c:R=6,7$ ) починається процес формування каналців і порожнин в об'ємі анодної зони.

Вплив факторів  $X_1, X_2$  на ефективність знешкодження іонів шестивалентного хрому апроксимуємо наступним рівнянням регресії:

$$M(Y) = 11,271 - 524,409X_1 - 1,257X_2 + 7496,488X_1^2 + 0,171X_2^2 - 2,022X_1X_2. \quad (2)$$

Математичну обробку результатів експериментів виконували за програмою Statistica 6.0, при цьому: коефіцієнт детермінації складає 0,8425; критерій Фішера  $F$  ( $\nu=5; \omega=56$ ) – 63,489 (модель адекватна); стандартна похибка оцінювання – 0,6132.

При апроксимації результатів експерименту визначено, що ефективність очищення від іонів шестивалентного хрому сягає майже 100 %. Функція відгуку  $Y$  має мінімум в точці з координатами  $X_1=0,036; X_2=3,4$ . Високий ступінь очищення стоків (>99,96%) досягається при  $X_1=0,03-0,04; X_2=3,4$ .

З метою запобігання руйнуванню матеріалу корпусу електрокоагулятора під дією електричного струму, катодні пластини слід розташовувати на певній відстані від стінок корпусу. Зважаючи на те, що простір між катодом і корпусом є відносно «пасивним» тобто не залучається в процес очищення стоків, слід приймати найменший можли-

вий зазор між стінками корпусу та катодом. В нашому випадку цей зазор визначається особливостями кріплення катодних пластин і складає 0,003–0,005 м. В ході експериментальних досліджень під час тривалого накладання напруги на катод, при заданій відстані від катода до стінок корпусу ( $\delta_3=0,003-0,005$  м) електрохімічні руйнування ємності електрокоагулятора не відмічались.

Електрокоагуляційна частина реактора-електрокоагулятора включає зону активного напрацювання гідроксидів, тобто електродну зону та зону змішування продуктів реакції. Визначення ефективних співвідношень між цими зонами дозволить оптимізувати енергетичний процес та з більшою мірою ефективності використовувати корисний об'єм реактора.

З метою створення рівномірного електричного поля в міжелектродній зоні висота анодної чарунки має дорівнювати висоті катодних пластин ( $h_k=h_a$ ). Для визначення оптимальної конструктивної висоти електродів необхідно визначити вільний об'єм зони змішування, розташованої між електродною зоною та зоною осадження (табл. 3). Об'єм цієї зони має бути достатнім для активного перемішування потоків рідини з міжелектродного та внутрішньоанодного просторів з метою інтенсифікації процесів активного злипання зкоагульованих пластівців. Враховуючи, що основна частина реакцій відбувається в міжелектродній зоні – об'єм зони змішування має бути мінімізованим, отже співвідношення між висотою електродної системи та загальною висотою електрокоагуляційної зони має сягати максимально можливої величини, яка дозволить забезпечити найвищий ступінь очищення стоків.

Як видно з табл. 3 оптимальне співвідношення висоти електродної зони до загальної висоти зони електрокоагуляції ( $X_3$ ) складає 0,8. За

даних умов створюється мінімально необхідний об'єм зони змішування, подальше збільшення об'єму цієї зони не призводить до суттєвих змін щодо ефективності очищення стоків. Тобто, для створення оптимальних конструктивних рішень електрокоагулятора об'єм зони змішування має не перевищувати 20% загального об'єму електрокоагуляційної зони.

Таблиця 3

**Залежність кінцевої концентрації іонів шестивалентного хрому від співвідношення висоти електродної зони до загальної висоти зони електрокоагуляції і кута нахилу конуса відстійної камери**

X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub>					
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	Кінцева концентрація іонів шестивалентного хрому, мг/л					
30	0,58	0,43	0,21	0,05	0,09	0,12
40	0,51	0,32	0,10	0,02	0,05	0,09
50	0,48	0,31	0,09	0,02	0,05	0,07
60	0,48	0,32	0,10	0,04	0,06	0,07

Після змішування потік рідини надходить в зону відстоювання, де відбувається осадження домішок. Інтенсивність стікання шламодібних домішок визначається кутом нахилу конусоподібних стінок зони відстоювання (X<sub>4</sub>). Збільшення кута нахилу стінок відстійника призводить до певного прискорення процесів стікання шламу у шламозбірник, але, одночасно збільшується об'єм зони відстоювання, отже і загальні габарити електрокоагулятора.

З табл. 3 видно, що ефективне стікання шламу спостерігається вже при куті нахилу зони відстоювання 40–50°. Подальше збільшення кута нахилу до 60° не позначається суттєвим чином на ефективності осадження домішок.

Вплив факторів X<sub>3</sub>, X<sub>4</sub> на ефективність знешкодження іонів шестивалентного хрому апроксимуюмо наступним рівнянням регресії:

$$M(Y) = 1,47014 - 3,59602X_3 - 0,00416X_4 + 2,2556X_3^2 + 0,00009X_4^2 - 0,00532X_3X_4. \quad (3)$$

Математичну обробку результатів експериментів здійснювали за програмою Statistica 6.0, при цьому: коефіцієнт детермінації склав 0,8134; критерій Фішера F (ν=5; ω=9) – 7,5990 (модель адекватна); стандартна похибка оцінювання – 0,1610.

При апроксимації результатів експерименту отримано ефективність очищення більше 100%. В реальних умовах це неможливо. Однак, незважаючи на це, вважаємо, що функція відгуку Y має мінімум в точці з координатами X<sub>3</sub>=0,8; X<sub>4</sub>=48,40. Високий ступінь очищення стоків

(>99,96%) досягається при X<sub>3</sub>=0,8; X<sub>4</sub>=40 – 60.

Підвищення терміну безперервної роботи електрокоагулятора є одним з головних критеріїв ефективності очисного обладнання. Для стружкового електрокоагулятора період роботи визначається, в першу чергу, загальною площею анодного завантаження. Активна площа розчинного електрода залежить від його маси та щільності завантаження в анодну чарунку (X<sub>5</sub>). Щільність завантаження анода обмежується очікуваною ефективністю роботи електрокоагулятора за кінцевим вмістом Cr<sup>6+</sup> (табл. 4).

Таблиця 4

**Залежність ефективності знешкодження іонів шестивалентного хрому від щільності завантаження анодної чарунки**

X <sub>5</sub>	10	30	60	90	120	150	180
η <sub>Cr(VI)</sub> , %	98,61	100	100	100	100	99,24	91,87

З табл. 4 видно, що збільшення щільності анодного завантаження має певні обмеження. При γ<sub>ме</sub>=180 кг/м<sup>3</sup> спостерігається ущільнення та зашламовування міжелектродного простору, що негативно відображається на якості знешкодження стоків. Зменшення щільності завантаження анода до 10 кг/м<sup>3</sup> призводить до нерівномірного утворення пластівців по площі анода, окрім того, частина іонів шестивалентного хрому перетинає анодну чарунку не вступивши в реакцію відновлення. Таким чином, найбільш раціонально використовувати величину щільності анодного завантаження на рівні 90–120 кг/м<sup>3</sup>, що дасть змогу максимально подовжити час роботи електрокоагулятора без дозавантаження стружки та одержати високу ефективність очищення.

Як видно з табл. 4 ефективність очищення стоків не знижується при зменшенні щільності завантаження анодної камери до 30 кг/м<sup>3</sup>, отже коефіцієнт ефективного використання матеріалу анодного завантаження (X<sub>6</sub>) слід приймати 0,65–0,75 (табл. 5).

Таблиця 5

**Залежність коефіцієнта активного використання металу (X<sub>6</sub>) від щільності завантаження анодної чарунки**

Завантаження X <sub>5</sub> кг	Залишковий вміст						
	10	30	60	90	120	150	180
	X <sub>6</sub>						
180	0,94	0,83	0,67	0,50	0,33	0,17	0
150	0,93	0,80	0,60	0,40	0,20	0	–
120	0,92	0,75	0,5	0,25	0	–	–
90	0,89	0,66	0,33	0	–	–	–
60	0,83	0,50	0	–	–	–	–
30	0,67	0	–	–	–	–	–
10	0	–	–	–	–	–	–

Провівши статистичну обробку результатів експериментів, визначили, що ефективність очи-

щення стоків від іонів шестивалентного хрому, при раціональних значеннях конструктивних параметрів електрокоагулятора, досягає 100%. Можна вважати, що функція відгуку  $M(Y)$  дозволяє забезпечити високий ступінь очищення стоків при значенні параметрів  $X_1=0,03-0,04$ ;  $X_2=3,4$ ;  $X_3=0,8$ ;  $X_4=40-50$ ;  $X_5=90-120$ ;  $X_6=0,65-0,75$ .

Визначення оптимальних режимних параметрів електрокоагулятора. Однією з основних технологічних характеристик очисної установки є пропускна спроможність. Отже, важливим конструктивним завданням є підбір найбільш ефективних режимів витрат рідини, що дозволить забезпечити максимальний ступінь знешкодження стоків при мінімізації енерговитрат. Вищеописані експерименти проводили при заданих витратах рідини  $11,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ , що відповідало часу перебування рідини в апараті 4200 с., і, за теоретичними розрахунками, було достатньо для напрацювання необхідної порції гідроксиду в об'ємі електрокоагулятора. З метою подальшого підвищення ступеня очищення хромовмісних СВ вивчали вплив часу оброблення стоків на ступінь відновлення іонів шестивалентного хрому і осадження останнього у формі гідроксиду.

Для здійснення досліджень, за отриманими раніше даними [6,7], вибрали наступні режимні параметри роботи електрокоагулятора:

- 1) анодна щільність струму 1,8–7,2 А/м<sup>2</sup>, струмове навантаження на аноді відповідно 0,5–2,0 А;
- 2) концентрація NaCl 250 – 300 мг/л;
- 3) кислотно-лужна реакція СВ до оброблення в електрокоагуляторі 4,5–6,0 рН;
- 4) кислотно-лужна реакція розчину для осадження зкоагульованих домішок 9,0–9,5 рН.

Теоретично розрахований необхідний час перебування СВ в електро-коагуляторі складав 3300–8400 с. Таким чином, витрати рідини склали  $13,8 \cdot 10^{-7}$ ;  $11,1 \cdot 10^{-7}$ ;  $8,3 \cdot 10^{-7}$ ;  $5,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ , що відповідало лінійній швидкості потоку  $6,94 \cdot 10^{-5}$ ;  $5,55 \cdot 10^{-5}$ ;  $4,12 \cdot 10^{-5}$ ;  $2,78 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$  та часу перебування рідини в електрокоагуляторі 3300 с, 4200 с, 5600 с, 8400 с відповідно.

В результаті аналізу проб, відібраних після процесу очищення на модельній установці, в діапазоні витратних значень  $5,6 \cdot 10^{-7}$ – $13,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ , іони Cr(VI) виявлені не були. Таким чином, зробили висновок про повне відновлення хрому (VI) до тривалентної форми, при дотриманні вищеперелічених режимних характеристик роботи електрокоагулятора. Надалі розглядали вплив витратних параметрів на процес очищення стоків від іонів Cr(III). Залежність кінцевої концентрації іонів Cr (III) від сили струму та часу оброблення рідини надана на рис. 2.

З графіка на рис. 2 можна зазначити, що мінімальна швидкість вилучення  $\text{Cr}^{3+}$  зі стоку на початку процесу електрокоагуляції спостерігалася

при густині анодного струму 1,8 А/м<sup>2</sup>, а максимальна – при анодній густині струму 5,4 А/м<sup>2</sup>. Подальше, збільшення густини струму від 6,3 до 7,2 А/м<sup>2</sup> характеризувалося зниженням швидкості вилучення  $\text{Cr}^{3+}$ .

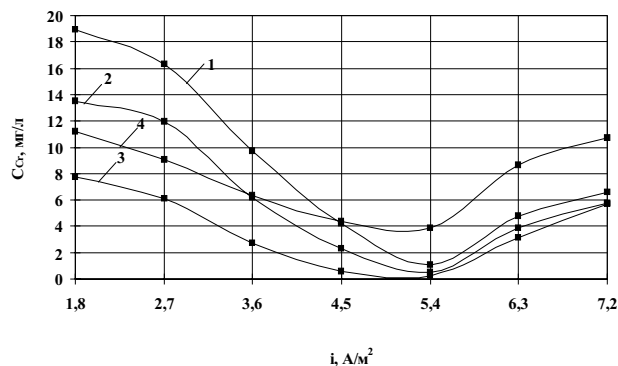


Рис. 2. Залежність концентрації іонів  $\text{Cr}^{3+}$  у стічних водах від густини струму та часу оброблення стоків: 1 – час обробки 3300 с; 2 – 4200 с; 3 – 5600 с; 4 – 8400 с

Розглядаючи залежність швидкості вилучення іонів хрому(III) від витрат рідини (табл. 6) можна зробити висновок, що найбільш інтенсивне вилучення хрому відбувається при витратах СВ  $13,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ , проте, за даних умов, стає неможливим створення замкнених систем водообігу, оскільки концентрація хрому в пробах одержаних при заданому режимі перевищує ГДК.

Таблиця 6

**Швидкість вилучення іонів хрому(III) зі стічних вод, мг/(м<sup>3</sup>·с)**

$j, \text{ м}^3/\text{с}$	I, A						
	0,50	0,75	1,00	1,25	1,5	1,75	2,00
$13,8 \cdot 10^{-7}$	1,88	1,94	2,09	2,22	2,22	2,2	2,16
$11,1 \cdot 10^{-7}$	1,6	1,68	1,74	1,81	1,84	1,72	1,74
$8,3 \cdot 10^{-7}$	1,28	1,3	1,35	1,38	1,38	1,34	1,24
$5,6 \cdot 10^{-7}$	0,82	0,84	0,87	0,89	0,89	0,85	0,83

При зниженні витрат рідини до  $5,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$  відбувається досягнення певного критичного рівня, що визначається швидкістю седиментації осаду, з'являється небажаний процес заростання анодного простору гідроксидами металів і, як наслідок, зниження ступеня подальшого розчинення заліза.

Підсумовуючи вищесказане, можна зазначити, що збільшення часу перебування рідини в електрокоагуляторі до 8400 с призводить до збільшення швидкості вилучення хрому (III). При анодній силі струму від 1,5 А концентрація хрому на виході відповідає вимогам ГДК при скиданні на станції біологічного очищення. Проте, такі стоки вимагають додаткового розбавлення перед поверненням у виробництво або скиданням у водой-

мища господарсько-питного водопостачання.

Найбільш ефективно очищення стоків досягається при витратах рідини  $8,3 \cdot 10^{-7} - 11,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$  (4200–5600 с). За даних умов при густині струму  $5,4 \text{ А/м}^2$  можливе зниження концентрації хрому до вимог ГДК. Такі стоки дозволено скидати на міські очисні споруди та використовувати при промиванні деталей після операцій підготовки поверхні до покриття і при приготуванні більшості електродів.

Подальше зниження часу оброблення стоків до 8400 с, в цілому не ефективно, як з екологічної так і технологічної точки зору.

Вплив факторів  $X_7$ ,  $X_8$ ,  $X_9$  на ефективність вилучення іонів тривалентного хрому можна апроксимувати наступним рівнянням регресії:

$$M(Y) = 48,3873 - 4,518X_7 - 14,5857X_8 + 0,2789X_7^2 + 0,0003X_7X_9 + 1,2882X_8^2. \quad (8)$$

Математичну обробку результатів експериментів виконували за допомогою пакета програм Maple 7.0. При цьому: коефіцієнт детермінації склав 0,8602; критерій Фішера  $F$  ( $\nu=5$ ;  $\omega=46$ ) – 27,3757 (модель адекватна); стандартна похибка оцінювання – 3,4387.

Для оптимізації критерію  $Y$ , виконували аналіз рівняння регресії на екстремум (мінімум). При апроксимації результатів експерименту отримали ефективність очищення від іонів тривалентного хрому 99,98%. Функція відгуку  $Y$  має мінімум у точці з координатами  $X_7=5,13$ ;  $X_8=5,66$ ;  $X_9=4200$ . Високий ступінь очищення стоків досягається при  $X_7=4,5 - 5,4$ ;  $X_8=4,5-6,0$ ;  $X_9=4200-5600$ .

#### Висновки

З метою оптимізації процесів електрохімічного очищення СВ в роботі електрокоагулятора слід використовувати наступні величини та співвідношення конструктивних і режимних параметрів апарата:

1) величина зазора між анодною чарункою та катодом  $r_3=0,03 \text{ м}$ ;

2) співвідношення між висотою електрокоагуляційної зони та радіусом поперечного перетину електрокоагулятора ( $H_c:R$ )=3,4:1;

3) співвідношення між висотою електродної системи та загальною висотою електрокоагуляційної зони ( $h:H_c$ )=0,8:1;

4) кут нахилу конуса відстійної камери  $\alpha=45^\circ$ ;

5) щільність завантаження анодної камери  $\gamma_{me}=110 \text{ кг/м}^3$ ;

6) повнота використання матеріалу анодного завантаження до зниження ефективності очищення  $\eta_m=0,7$ ;

7) щільність струму  $4,5-5,4 \text{ А/м}^2$ ;

8) рН  $4,5-6,0$  одиниць;

9) час перебування рідини в апараті  $4200-5600 \text{ с}$ .

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation* / Holt P.K., Barton G.W., Wark M. and oth. // *Colloids and Surfaces: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002. – Vol. 211 (2-3). – P. 233-248.

2. *Мусеев А.В.* Интенсификация процессов коагуляции и флокуляции сточных вод за счет регулируемого механического перемешивания в системах и камерах хлопьеобразования очистных сооружений: дисс. канд. техн. наук: 03.00.16. – М., 2005. – 157 с.

3. Osipenko V.D., Pogorelyi P.I. Electrocoagulation neutralization of Chromium Containing effluent // *Metallurgist*. – 1977. – Vol. 21(9-10). – P.44-45.

4. *Спиридонов А.А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

5. *Воеводин В.В.* Математические модели и методы в параллельных процессах. – М.: Наука, 1986. – 296 с.

6. *Пляцук Л.Д., Мельник Е.С.* Разработка конструкции экспериментальной очистной установки для обезвреживания хромсодержащих промывных стоков // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2009. – № 4. – С.192-194.

7. *Мельник Е.С., Пляцук Л.Д.* Физико-математическое моделирование процесса электрокоагуляции хромсодержащих стоков // *Вісник СумДУ*. – 2009. – № 3. – С.191-197.

Надійшла до редакції 17.01.2013