

УДК 681.58

МЕРДУХ С. Л., асистент; ЗАПОРОЖЕЦЬ Ю. А., старший викладач;
СКЛАДАННИЙ Д. М., доцент; ПЛАШИХІН С. В., доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ ЗНЕСОЛЕННЯ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕАКТОРА

Досліджено можливість використання математичних моделей іонного обміну детермінованого типу для рішення задач керування. Доведена необхідність створення нових математичних залежностей для можливості керування об'єктом дослідження. На основі виробничих даних АЕС проведено ідентифікацію досліджуваного об'єкта та розроблені відповідні математичні моделі.

Ключові слова: водяний енергетичний реактор, атомна електрична станція, водно-хімічний режим, регресійна модель, блокова знесолювальна установка

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2021.241029

© Мердуч С. Л., Запорожець Ю. А., Складанний Д. М., Плашихін С. В., 2021.

Постановка проблеми. У виробничих системах знесолення водного середовища енергоблоку відсутні дані про зміну стану іонообмінних фільтрів протягом перебігу технологічного процесу. Фільтри відключаються на регенерацію за даними періодичних аналізів проб води на виході фільтруючої установки. Такий метод контролю за ходом процесу знесолення може призвести до значного збільшення іонів кислотних залишків внаслідок неконтрольованих проскоків, що є небезпечним як для водного середовища енергоблоку так і для устаткування другого контуру реакторної установки в цілому. Для уникнення зазначених наслідків доцільно провести дослідження, в основу якого покладено математичний опис процесу [1].

Ведення та підтримка процесу знесолення турбінного конденсату впливає на екологічну безпеку підприємства. Для створення відповідної системи контролю та керування актуально застосовувати адекватні математичні залежності. На сьогодні, актуальним залишається питання створення таких математичних моделей систем керування знесолюючими установками, які дозволять враховувати описані аспекти.

Аналіз попередніх досліджень. У багатьох країнах світу, у тому числі і в Україні, проводяться дослідження щодо створення математичних моделей іонообмінних процесів знесолення водного середовища для різноманітних типів іонітів та різних середовищ фільтрування [2-5]. Створені моделі апробовані за допомогою даних експлуатації промислових фільтрів на різних стадіях їх роботи та доведена адекватність і можливість їх використання для цілого ряду процесів [6-11].

Відомо, що динаміка іонного обміну описується системою диференціальних рівнянь [12].

Наприклад, для процесу іонного обміну з використанням свіжоприготованого іоніту до математичної моделі входять наступні рівняння [13-14]:

— опис процесу перенесення речовини у рідкій фазі

$$D_{l1} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - u \frac{\partial c}{\partial x} - \beta_1 (c - c^*) = \varepsilon \frac{\partial c}{\partial t}; \quad (1)$$

— опис процесу перенесення речовини у твердій фазі

$$D_2 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \beta_1 (c - c^*) = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \frac{\partial a}{\partial t}; \quad (2)$$

— опис рівноваги в системі

$$\frac{a_i^{1/z_i}}{a_j^{1/z_j}} = K_{ij} \frac{c_i^{1/z_i}}{c_j^{1/z_j}}; \quad (3)$$

До системи рівнянь (1-3) додаються початкові й граничні умови, відповідно, за рідкою та твердою фазами (4-6):

$$\text{за } x = 0: D_{l1} \frac{\partial c}{\partial x} = u(c - c_0); D_2 \frac{\partial a}{\partial x} = \beta_2 (a - a^*); \quad (4)$$

$$\text{за } x = L: \frac{\partial c}{\partial x} = 0; \frac{\partial a}{\partial x} = 0; \quad (5)$$

$$\text{за } t = 0: c = c_0 = c_{\text{вх}}; a = a_0 = 0; \quad (6)$$

а також рівняння, що за умови електронейтральності рідкої фази дозволяють врахувати еквімолярність системи (7):

$$\sum_{i \neq j}^n c_{i,j} = c_0; \sum_{i \neq j}^n a_{i,j} = AA, \quad (7)$$

де a, c – сумарна концентрація іонів у іоніті та водному середовищі, мг-екв/мл; a_0, c_0 – вхідна концентрація іонів у іоніті та водному середовищі, мг-екв/мл; a^*, c^* – концентрація іонів у іоніті та водному середовищі у стані рівноваги, мг-екв/мл; AA – обмінна ємність іоніту у динамічному стані, мг-екв/мл; D_{t1} – коефіцієнт поздовжньої дифузії у водному середовищі, м²/год.; K_{ij} – константа обміну; β_1 – коефіцієнт масовіддачі, 1/год; D_2 – коефіцієнт дифузії домішок у дірчастому середовищі, м²/год.; β_2 – коефіцієнт масопереносу, 1/год; x – початок розрахунку (місце подачі до апарату водної фази), м; L – величина прошарку іоніту, м; t – час, год.; T – період між регенераціями, год.; ε – дірчастість шару іоніту; u – зведена швидкість потоку водного середовища у фільтрі, м/год.

Результатом розв'язання наведеної моделі є розподіл іонів за висотою фільтруючого обладнання та часом процесу фільтрації. Таким чином, використовуючи дану модель, можна визначити необхідну висоту шару іоніту в залежності від заданого ступеня очищення за необхідної лінійної швидкості потоку водного середовища, що піддається очищенню, та часу фільтроциклу [15].

Для оптимізації роботи іонообмінного обладнання основним фактором є визначення оптимального фільтроциклу, що розраховується за існуючими математичними моделями іонного обміну (1-7). Оскільки наведені моделі використовуються для розрахунку зміни концентрацій іонів солей, у більшості випадків, вони не можуть бути адаптовані для вирішення задач керування [1]. На сьогодні, актуальною науковою проблемою є отримання математичної моделі іонообмінної установки, що дозволить визначити оптимальне навантаження на кожен із фільтрів та забезпечити необхідні витрати на енергоблок в цілому. Розроблення такої моделі надасть можливість визначити та відображати стан фільтруючого обладнання під час іонообмінного процесу, дозволить у різні моменти часу володіти інформацією щодо продуктивності та складу водного середовища на вході та виході фільтрів. За результатами розрахунків даної моделі можна визначити точний час зміни режиму роботи фільтрів.

Метою даної роботи є збільшення ефективності процесу знесолення водного середовища енергоблоку шляхом наукового обґрунтування, дослідження, розроблення та реалізації регресійної моделі блокової знесолювальної установки (БЗУ) із використанням даних експлуатації атомної електростанції (АЕС).

Виклад основного матеріалу. Під час процесу фільтрації турбінного конденсату потрібно відслідковувати та підтримувати важливі характеристики водного середовища другого контуру, такі як водневий показник, електропровідність, кількість іонів солей, жорсткість, та інші [16]. За наявності виробничих даних експлуатації енергоблоку АЕС, для ідентифікації об'єкта керування використано експериментально-статистичний метод, що дає можливість врахувати особливості обладнання конкретного типу. Для отримання математичної моделі об'єкту керування проведено параметричну ідентифікацію знесолювальної установки АЕС.

На електростанціях України контроль за роботою іонообмінних фільтрів здійснюють за якістю фільтрату, визначаючи для цього вміст іонів натрію, максимальна кількість якого встановлена на рівні 5 мг/кг, та значення питомої електропровідності фільтрату, що не повинна перевищувати 0,3 мкСм/см. При виході цих параметрів за встановлені межі фільтр має бути виведений на регенерацію. Невчасне відключення іонообмінних фільтрів призводить до надходження іонів у водне середовище другого контуру, що, у свою чергу, спричиняє корозійні пошкодження конструкційних матеріалів устаткування. Тобто, потрібно забезпечити роботу фільтруючого обладнання таким чином, щоб запобігти експлуатацію «зношених» іонітів.

З аналізу роботи знесолювального обладнання АЕС виділено параметри, що суттєво впливають на оперативні рішення щодо керування об'єктом дослідження. При виборі враховувалась можливість їх прогнозування у часі та відсутність проявів, що не можуть бути заздалегідь передбачені. Такими виявились значення питомої електропровідності та водневого показника. Як відомо, електропровідність конденсату у значній мірі залежить від мінералізації, тобто присутності іонів домішок, температури та в'язкості водного середовища. Однак, перші два фактори є основними [17].

Серед даних пасивного експерименту обрано наступні змінні стану, що були використані для розроблення математичної залежності щодо питомої електропровідності конденсату χ (y): c_{Na} – концентрація іонів натрію (x_1); $c_{N_2H_4}$ – концентрація гідразину (x_2); c_{Fe} – концентрація іонів феруму (x_3); T – температура конденсату (x_4); c_{Cl} – концентрація іонів хлору (x_5); c_{SO_4} – концентрація іонів сульфату (x_6).

Аналогічним чином виявлено, що значення водневого показника залежить від температури конденсату, присутності у водному середовищі металів та концентрації/наявності гідразину, який вводиться до робочого середовища для зниження швидкості корозії у другому контурі енергоблоку.

Отже, із результатів пасивного експерименту обрані наступні змінні стану, що використовувались для розроблення математичної залежності щодо водневого показника рН (y): $c_{N_2H_4}$ – концентрація гідразину (x_1); T – температура конденсату (x_2); c_{Fe} – концентрація іонів феруму (x_3).

На наступному етапі дослідження встановлювалася наявність та тіснота зв'язку між обраними вхідними факторами та вихідними змінними процесу для визначення міри впливу кожної із обраних змінних на перебіг процесу. Ранжування вхідних даних проводилось із застосуванням кореляційного аналізу. Статистичний аналіз даних реалізовано за допомогою аналітичної системи STATISTICA від StatSoft. Проведено оцінювання ступеня впливу вхідних факторів на вихідні змінні. Для визначення впливу на досліджувану ознаку застосовано нелінійне оцінювання, як один із методів поглибленого аналізу. Рівняння, що реалізує користувацький тип моделі, задавалось у редакторі відповідного модуля програми (рис. 1).

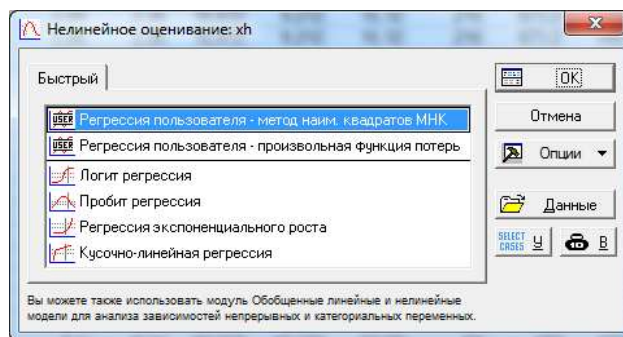


Рис. 1 – Вибір регресії користувача у модулі нелінійного оцінювання

У розрахунках було обрано регресію користувача з ідентифікацією коефіцієнтів методом найменших квадратів (МНК) [18], як найбільш розповсюджене та швидко використовуване на практиці. Зазвичай задача МНК формулюється наступним чином. Функціональний зв'язок вихідної величини від вхідної виражається залежністю:

$$y = b_0 f_0(x) + b_1 f_1(x) + \dots + b_m f_m(x), \quad (8)$$

де $f_0(x), f_1(x), \dots, f_m(x)$ – базисні функції, що задані, b_0, b_1, \dots, b_m – шукані коефіцієнти рівняння.

Значення аргументу x заздалегідь відомі, а відповідні експериментальні значення функції y визначені з певною похибкою. Теоретично, для визначення параметрів b_0, b_1, \dots, b_m необхідно провести $m + 1$ вимірювань. Але, на практиці, через помилки експерименту кожна серія вимірювань буде давати різні значення коефіцієнтів b_0, b_1, \dots, b_m . Тому, для зменшення впливу помилок експерименту, кількість проведених вимірювань має бути значно більшою за число m .

Отже, для визначення параметрів b_0, b_1, \dots, b_m необхідно провести n експериментів, що дають значення деякої функції (8), лінійно залежної від шуканих параметрів. За МНК, оцінювання параметрів b_0, b_1, \dots, b_m з формули (8) відбувається за умови: сума квадратів відхилень має бути мінімальною.

Для нелінійної регресії найменших квадратів у модулі нелінійного оцінювання пропонується метод Левенберга-Маркара, що реалізує спеціальний алгоритм для обробки великого масиву даних за умови використання функції втрат, аналогічній найменших квадратів.

Для оцінювання параметра за МНК із використанням функції втрат найменших квадратів не проводиться розрахунок часткових похідних другого порядку. Натомість на кожній ітерації вирішується система лінійних рівнянь для визначення градієнта. Припускається, що задана нелінійна модель у вигляді рівняння $y = f(\theta, X)$ зі значеннями y в точках X_i й Y_i , $i = 1, \dots, m$, де X_i із розмірністю k , а θ – розмірністю n . Метод

Левенберга-Маркара реалізує пошук деякого локального рішення θ^* із множини θ , що дозволяє мінімізувати функцію неузгодженості g :

$$g(\theta) = \sum_{i=1}^m (Y_i - f(\theta, X_i))^2.$$

За даним методом на кожній із ітерацій розраховується співвідношення:

$$\theta_{j+1} = \theta_j - (J'J + \lambda D)^{-1} J'(Y - f(\theta, X_j)),$$

де Y – вектор розмірністю $m \times 1$, що включає Y_1, \dots, Y_m ; X – матриця розмірністю $m \times k$, що містить X_1, \dots, X_m ; J – перетворення Якобіана $f(\theta, X)$ за θ ; D – діагональна матриця розмірністю $n \times n$.

Далі представлено результати досліджень для кожної із обраних ознак. Задано вигляд користувацької функції із використанням вікна доступу до редактора формул. Вигляд оцінюваної функції задавався у відповідному вікні (рис. 2). Спершу було досліджено функцію наступного вигляду:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1.$$

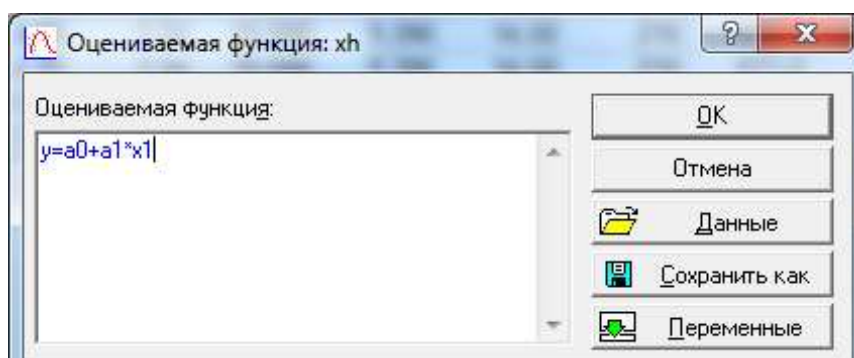


Рис. 2 – Редактор введення функції

Далі необхідно задати наступні параметри для поточного оцінювання введеної моделі: метод оцінювання, максимальне число ітерацій, початкові значення та критерій збіжності. Збережені параметри запропоновані за замовчуванням. Отримані результати розрахунків наведені на рисунку 3.

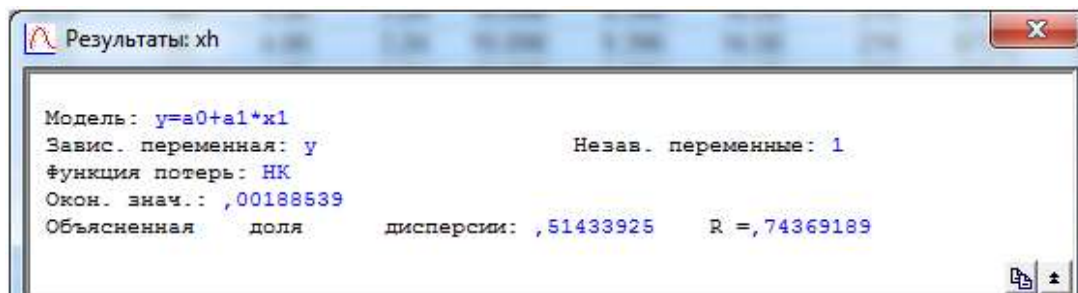


Рис. 3 – Результати проведеного оцінювання

Коефіцієнт детермінації пояснює розсіювання вихідної змінної. Він може приймати значення від 0 до 1. Чим ближче до одиниці буде отримане число, тим краще модель описує вихідні дані.

За отриманими результатами можна зробити висновок, що запропонована модель пояснює 51 % варіації вихідної змінної, оскільки коефіцієнт детермінації, у даному випадку, склав 0,51. Коефіцієнт кореляції становить 0,74 одиниці, відповідно, зв'язок між величинами є помірним.

Подібні розрахунки проведено для визначення ступеня впливу усіх факторів процесу та їх можливих взаємодій на вихідну змінну. Результати проведених досліджень у вигляді критеріїв придатності наближень

зведено до таблиці, що наведена у дисертаційному дослідженні [19]. Всі змінні та можливі ефекти їх взаємодій розміщені у порядку зниження ступеня впливу на вихідну змінну.

Отримані регресійні залежності у відповідності до результатів ранжування вхідних параметрів. Фактори включались до складу моделі по черзі за зменшенням ступеня їх впливу на вихідну змінну. Результати ранжування за ступенем впливу параметрів на значення питомої електропровідності зображено наступним чином:

$$x_1 > x_1 \times x_4 > x_1 \times x_6 > x_1 \times x_3 > x_4 > x_2 \times x_5.$$

де x_1 – концентрація іонів натрію, x_2 – концентрація гідрозину, x_3 – концентрація іонів феруму, x_4 – температура конденсату, x_5 – концентрація іонів хлору, x_6 – концентрація іонів сульфату.

Розраховані критерії придатності наближень для значення водневого показника внесено до зведеної таблиці результатів, що представлена у дисертаційному дослідженні [19]. У аналогічних дослідженнях щодо змінної водневого показника отримано такі результати:

$$x_2 > x_2 \times x_3 > x_3 > x_1 \times x_3,$$

де x_1 – концентрація гідрозину, x_2 – температура конденсату, x_3 – концентрація іонів феруму.

Інші фактори процесу та їх взаємодії надалі виключено із розрахунків.

Відповідно обраним виходам системи та результатів ранжування вхідних параметрів проведено регресійний аналіз для встановлення функціональних залежностей між даними експлуатації іонообмінного обладнання [20-21]. Фактори по чергово додавались до моделі у порядку зниження ступеня їх впливу на вихідну змінну.

Отримані регресійні залежності для питомої електропровідності зведено до результуючої таблиці, що наведена нижче (табл. 1).

Таблиця 1 – Регресійні залежності та критерії їх придатності

Регресійна модель	Коефіцієнт R ²	Коефіцієнт R
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1$	0,51	0,74
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_4$	0,55	0,77
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_4$	0,62	0,82
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4$	0,54	0,76
$y = a_0 + a_1 \cdot x_4 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4$	0,55	0,77
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 \cdot x_4$	0,51	0,74
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_6$	0,55	0,77
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_6 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3$	0,55	0,77
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_6 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3 + a_5 \cdot x_4$	0,64	0,83
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_6 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3 + a_5 \cdot x_4 + a_6 \cdot x_2 \cdot x_5$	0,64	0,84

Із наведених результатів очевидно, що збільшення кількості регресорів суттєво ускладнює структуру моделі незначно покращуючи її. Тому розрахунки було припинено та передостанню отриману залежність обрано як найкращу. Дану модель було перевірено на наявність незначущих регресорів. Виявилось, що коефіцієнти a_3 та a_4 є незначущими, із рівнем статистичної значущості $p > 0,05$, та їх можна виключити зі складу моделі.

Запропонована модель пояснює 72 % варіації залежної змінної (коефіцієнт детермінації склав 0,72). Зв'язок між величинами є тісним, зважаючи на кореляційне відношення 0,82.

На рисунку 4 представлено порівняння значень питомої електропровідності розрахованих за розробленою регресійною залежністю та виробничих даних.

Із наведеної графічної залежності та розрахованих критеріїв придатності моделі зроблено висновок, що отримана математична залежність добре описує експлуатаційні дані.

За результатами проведених досліджень отримана регресійна модель щодо значень питомої електропровідності наступного вигляду, яка найкращим чином описує виробничі дані:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_4$$

або із відповідними коефіцієнтами

$$y = 2,02 - 2,26 \cdot x_1 + 0,05 \cdot x_4 - 0,06 \cdot x_1 \cdot x_4$$

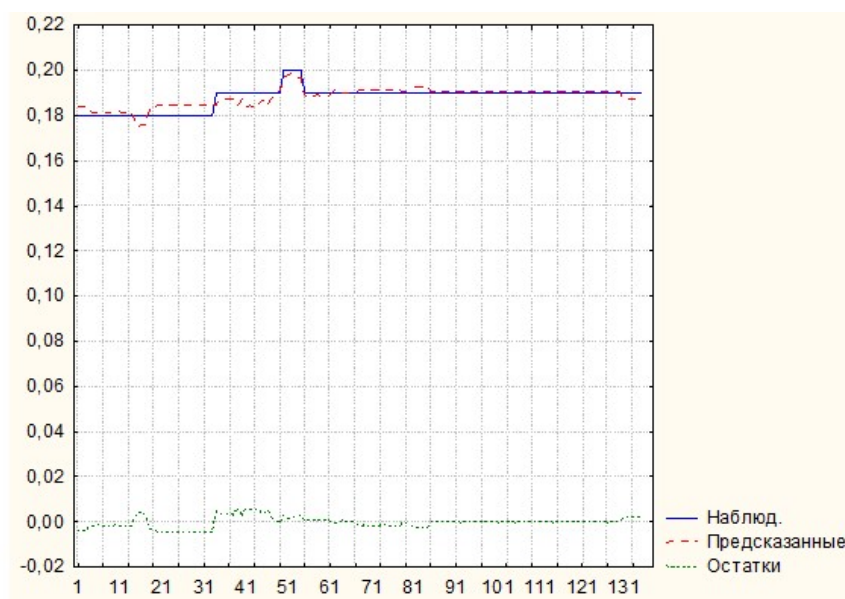


Рис. 4 – Порівняння виробничих та розрахованих за моделлю даних

Для розроблення регресійних залежностей щодо водневого показника проведено аналогічні дослідження із почерговим включенням факторів згідно проведеного ранжування даних. Результати розрахунків зведено до таблиці 2.

Таблиця 2 – Регресійні залежності та критерії їх придатності

Регресійна модель	Коефіцієнт R ²	Коефіцієнт R
$y = a_0 + a_1 \cdot x_2$	0,57	0,71
$y = a_0 + a_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot x_3$	0,60	0,73
$y = a_0 + a_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_3 \cdot x_3$	0,62	0,75
$y = a_0 + a_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3$	0,74	0,83

Подальше додавання регресорів до складу моделі незначно покращувало її. Тому доцільно зупинитись на останній отриманій залежності.

Отриману модель перевірено на наявність незначущих регресорів. Таким виявився коефіцієнт a_1 , так як рівень його статистичної значущості $p > 0,05$. Оптимальною прийнято модель із включенням усіх розглянутих регресорів.

Запропонована модель пояснює 72 % варіації залежної змінної, відповідно до значення коефіцієнту детермінації y 0,72. Зв'язок між величинами є тісним (кореляційне відношення становить 0,82). За результатами проведених досліджень отримана регресійна модель щодо значень водневого показника наступного вигляду, яка найкращим чином описує виробничі дані:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3$$

або із відповідними коефіцієнтами

$$y = 13,7740 - 0,108 \cdot x_2 + 0,0123 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,4537 \cdot x_3 + 0,0001 \cdot x_1 \cdot x_3$$

Отже, відповідно до отриманих результатів, зроблено висновок, що розроблені регресійні моделі адекватні виробничим даним АЕС та можуть бути використані для розроблення систем керування знесольовальними установками.

Висновки. Розроблені регресійні залежності параметрів іонообмінного обладнання дають можливість отримати значення водневого показника та питомої електричної провідності турбінного конденсату у будь-

який проміжок часу, що дозволить вчасно приймати управлінські рішення щодо визначення моменту зміни режиму роботи іонообмінних фільтрів. Значення коефіцієнтів детермінації отриманих моделей склало 0,72 та коефіцієнтів кореляційного відношення 0,82, відповідно, однакові в обох випадках для кожної моделі. Розроблені математичні залежності є адекватними реальним даним.

Перспективи подальших досліджень. Отримані регресійні моделі є адекватними та можуть бути використані при розробленні та апробації системи керування знесольовальними установками АЕС.

Список використаної літератури

1. Комарова И. В., Галкина Н. К., Анфилов Б. Г., Шептовецкая К. И. Визуализация процесса ионообменного умягчения воды с целью прогнозирования и управления // Сорбционные и хроматографические процессы, 2008. №1. С. 30–36.
2. Сенявин М. М., Рубинштейн Р. Н., Комарова И. В. Теоретические основы деминерализации пресных вод. / Наука. Москва, 1975. 325 с.
3. Сенявин М. М., Рубинштейн Р. Н., Веницианов Е. В. Основы расчета и оптимизации ионообменных процессов / Наука. Москва, 1972. 172 с.
4. Комарова И. В., Галкина Н. К., Махалов Е. М. Решение задач ионообменной водоподготовки на основе математического моделирования с применением ЭВМ // Теория и практика сорбционных процессов. 1989. №20. С. 30–41.
5. Галкина Н. К., Комарова И. В., Анфилов Б. Г., Шептовецкая К. И. Математическая модель глубокой отмывки ионообменного фильтра // Сорбционные и хроматографические процессы, 2004. №5. С. 644–652.
6. Закова И. М., Комарова И. В., Одинцов К. Ю., Лебедев В. Ю. Моделирование технологических процессов в ионитных фильтрах // Теплоэнергетика, 1983. №7. С. 13–16.
7. Калинина А. Г., Акмамедов С., Комарова И. В., Сенявин М. М. Расчет процесса умягчения на основе математической модели // Теплоэнергетика, 1981. №9. С. 53–55.
8. Комарова И. В., Галкина Н. К., Анфилов Б. Г. Комплекс программ расчета процесса химводоочистки на основе математической модели // Наука производству, 1998. №2(4). С. 53–56.
9. Юрчевский Е. Б., Комарова И. В., Галкина Н. К. Прогнозирование технологических характеристик противоточных ионообменных фильтров с использованием математического моделирования // Теплоэнергетика, 2003. №7. С. 29–34.
10. Комарова И. В., Галкина Н. К., Шептовецкая К. И. Комплексная очистка промышленных сточных вод с повышенным содержанием сульфата кальция // Сорбционные и хроматографические процессы, 2007. №2. С. 187–196.
11. Комарова И. В., Галкина Н. К., Шептовецкая К. И. Безотходный способ регенерации ионитов // Сорбционные и хроматографические процессы, 2007. №2. С. 197–204.
12. Кокотов Ю. А., Пасечник В. А. Равновесие и кинетика ионного обмена / Химия. Ленинград, 1970. 336 с.
13. Методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Математичне моделювання та застосування ЕОМ в хімічній технології» / сост. Голуб И. В. Днепропетровск, 2010. 32 с.
14. Бойко Т. В., Бендюг В. І., Потяженко І. О. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Математичне моделювання та застосування електроннообчислювальних машин в хімічній технології» / НТУУ «КПІ». Київ, 2007. 126 с.
15. Сенявин М. М., Рубинштейн Р. Н. Основы расчета и оптимизации ионообменных процессов / Наука. Москва, 1972.
16. Бондарь А. Г. Математическое моделирование в химической технологии / Вища школа. Київ, 1973. 280 с.
17. Кишневский В. А. Технологии подготовки воды в энергетике : учебник для вузов по направлениям «Теплоэнергетика» и «Атомная энергетика» / Фенікс. Одесса, 2008. 400 с.
18. Земляк Е. М., Статюха Г. А. Автоматизированное моделирование непрерывных и периодических процессов и систем / УМК ВО. Киев, 1992. 142 с.
19. Мердух С. Л. Керування блочно-знесольуючою установкою у другому контурі АЕС із ВВЕР-1000 : дис. канд. техн. наук.: 05.13.07 / Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського». Київ, 2017. 194 с.
20. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / Химия – Москва, 1985. 448 с.

21. Кафаров В. В., Перов В. Л., Мешалкин В. П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем / Химия. Москва, 1974. 344 с.

Надійшла до редакції 15.01.2021

Merdukh S. L., Zaporozhets Yu. A., Skladannyi D. M., Plashykhin S. V.

MODELING OF QUALITY INDICATORS FOR WATER DEMINERALIZATION PROCESS AT POWER REACTORS

Regression models of demineralizing filters for a nuclear power plant will increase the efficiency of the desalination process for turbine condensate.

To identify the control object, experimental and statistical research methods were applied. To detect the presence and study the extent of relations between the process factors and output variables, the STATISTICA (StatSoft) analytical system was used. The impact of factors on the studied traits was assessed using a nonlinear estimation module.

Upon the analysis of the desalination plant operation, the following initial parameters were identified. These parameters influence the control decisions in managing the object, can be predicted over time and are not random variables such as the values of specific conductivity and hydrogen index.

For specific electrical conductivity: X_h is the specific electrical conductivity of the condensate after the desalination plant; N_a is the concentration of sodium ions in the condensate behind the condensate electric pump of the first stage; $C_{N_2H_4}$ is the concentration of hydrazine in the feedwater of the steam generator; C_{Fe} is the concentration of iron ions in the condensate on the condensate electric pump of the first stage; T is the temperature of the condensate sample on the condensate electric pump of the first stage; C_{Cl} is the concentration of chlorine ions in the purge water of the salt compartment of the steam generator; and C_{SO_4} is the concentration of sulfate ions in the purge water of the salt compartment of the steam generator.

For the hydrogen index: pH is the hydrogen index of the condensate after the desalination plant; $C_{N_2H_4}$ is the concentration of hydrazine in the feedwater of the steam generator; T is the temperature of the condensate sample on the condensate electric pump of the first stage; and C_{Fe} is the concentration of iron ions in the condensate behind the condensate electric pump of the first stage.

To detect the presence and study the extent of relations between the selected factors of relevant process and output variables, a correlation analysis was conducted and input factors were subsequently ranked.

The correlation analysis allowed ranking all the variables and their possible interaction effects in a descending degree of impact on the outputs.

In accordance with the selected system outputs, based on the ranking of input variables, regression analysis was performed and corresponding mathematical dependences were obtained with alternate inclusion of factors in a decreasing degree of their influence on the output variable to establish functional dependencies between the experimental data on desalination plant operation.

The regression dependence for the experimental data of specific conductivity on the selected state parameters was obtained:

$$y = 2.02 - 2.26 \cdot x_1 + 0.05 \cdot x_4 - 0.06 \cdot x_1 \cdot x_4$$

where x_1 is the concentration of sodium ions in the condensate and x_4 is the temperature of the condensate.

The coefficient of determination is equal to 0.7245. The proposed model explains 72% of the variation in the dependent variable. The correlation ratio became 0.82, which determines the close relationship between the values. The regression dependence describing the change of the hydrogen index is as follows:

$$y = 13.7740 - 0.108 \cdot x_2 + 0.0123 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.4537 \cdot x_3 + 0.0001 \cdot x_1 \cdot x_3$$

where x_2 is the condensate temperature and x_3 is the concentration of iron ions in the condensate.

The coefficient of determination is equal to 0.7231. The proposed model explains 72% of the variation in the dependent variable. The correlation ratio is 0.82, which determines the close relationship between the values.

Regression models adequately describe the operational data of the nuclear power plant and can be used as part of the control system of the filter unit.

Keywords: *power engineering, demineralization, filtration, modelling, control.*

References

1. Komarova, I., Galkina, N., Anfilov, B. and Sheptovetskaya, K., 2008. Visualization of the process of ion-exchange water softening in order to predict and control. *Sorption and chromatographic processes*, 1, pp.30-36.
2. Senyavin, M., Rubinstein, R. and Komarova, I., 1975. *Theoretical Foundations Of Freshwater Demineralization*. Moscow: The science, p.365.
3. Senyavin, M., Rubinstein, R. and Venitsianov, E., 1972. *Basics Of Calculating And Optimizing Ion Exchange Processes*. Moscow: The science, p.172.
4. Komarova, I., Galkina, N. and Makhalov, E., 1989. Solution of problems of ion-exchange water treatment based on mathematical modeling using a computer. *Theory and practice of sorption processes*, 20, pp.30-41.
5. Komarova, I., Galkina, N., Anfilov, B. and Sheptovetskaya, K., 2004. Mathematical model of deep washing of ion exchange filter. *Sorption and chromatographic processes*, 5, pp.644–652.
6. Zakova, I., Komarova, I., Odintsov, K. and Lebedev, V., 1983. Modeling of technological processes in ion exchange filters. *Heat power engineering*, 7, pp.13-16.
7. Kalinina, A., Akmamedov, S., Komarova, I. and Senyavin, M., 1981. Calculation of the softening process based on a mathematical model. *Heat power engineering*, 9, pp.53-55.
8. Komarova, I., Galkina, N. and Anfilov, B., 1998. Complex of programs for calculating the process of chemical water treatment based on a mathematical model. *Science production*, 2(4), pp.53-56.
9. Yurchevsky, E., Komarova, I. and Galkina, N., 2003. Prediction of technological characteristics of countercurrent ion-exchange filters using mathematical modeling. *Heat power engineering*, 7, pp.29-34.
10. Komarova, I., Galkina, N. and Sheptovetskaya, K., 2007. Integrated treatment of industrial wastewater with a high content of calcium sulfate. *Sorption and chromatographic processes*, 2, pp.187-196.
11. Komarova, I., Galkina, N. and Sheptovetskaya, K., 2007. Waste-free method of ion exchanger regeneration. *Sorption and chromatographic processes*, 2, pp.197-204.
12. Kokotov, Y. and Pasechnik, V., 1970. *Equilibrium And Kinetics Of Ion Exchange*. Leningrad: Chemistry, p.337.
13. Golub, I., 2010. *Methodological Instructions For Performing Laboratory Work In The Discipline "Mathematical Modeling And Storage Of EOM In Chemical Technology"*. Dnipropetrovsk: NMetAU, p.32.
14. Boyko, T., Bendyug, V. and Potyazhenko, I., 2007. *Methodical Instructions To The Submission Of Laboratory Robots In The Discipline "Mathematical Modeling And Storage Of Electronic Counting Machines In Chemical Technology"*. Kiev: NTUU "KPI", p.126.
15. Senyavin, M. and Rubinstein, R., 1972. *Basics Of Calculating And Optimizing Ion Exchange Processes*. Moscow: The science.
16. Bondar, A., 1973. *Mathematical Modeling In Chemical Technology*. Kiev: High School, p.280.
17. Kishnevsky, V., 2008. *Water Treatment Technologies In Power Engineering: A Textbook For Universities In The Areas Of "Heat Power" And "Nuclear Power"*. Odessa: Fenix, p.400.
18. Zemlyak, E. and Statyukha, G., 1992. *Automated Modeling Of Continuous And Batch Processes And Systems*. Kiev: UMK VO, p.142.
19. Merdukh, S. 2017, *Control of condensate purification plant of the second circuit of the NPP with PWR-1000: dissertation [Keruvannia blochno-znesoliuiuchoiu ustanovkoiu u druhomu konturi AES iz VVER-1000: dis. ... kand. tekhn. nauk]*, Kyiv, 194 p.
20. Kafarov, V., 1985. *Cybernetics Methods In Chemistry And Chemical Technology*. Moscow: Chemistry, p.448.
21. Kafarov, V., Perov, V. and Meshalkin, V., 1974. *Principles Of Mathematical Modeling Of Chemical Technological Systems*. Moscow: Chemistry, p.34.