

УДК 531.3

Р.Б. Медведєв, проф., к.т.н.

О.В. Сангінова, к.т.н., доц.

Національний технічний університет України "КПІ"

МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ "ВОДНО-ХІМІЧНИЙ РЕЖИМ ДРУГОГО КОНТУРУ ВВЕР-1000"

Розглянуті питання моделювання водно-хімічного режиму другого контуру водо-водяних енергетичних реакторів ВВЕР-1000 і є актуальною для практичного застосування в реальних умовах атомних електростанцій.

Вступ. Енергетична стратегія України полягає в ефективному енергоспоживанні й енергозбереженні. З іншого боку, найважливішими пріоритетами України в галузі охорони навколишнього природного середовища є зменшення обсягів водозабору та мінімізація використання води на потреби атомної енергетики. Безповоротне водоспоживання в нашій країні становить 36 % від забраної води. Незаперечним є те, що розвиток цієї галузі промисловості неминує породжує проблеми очищення води та утилізації рідких та твердих відходів.

Існуючі системи контролю та моніторингу водно-хімічного режиму (ВХР) водо-водяних енергетичних реакторів зорієнтовані переважно на перший контур АЕС, який є важливішим з точки зору безпеки експлуатації. Однак порушення ВХР другого контуру прискорює корозійний знос устаткування, в першу чергу, парогенераторів та турбіни, тому створення математичної моделі та оптимізація водно-хімічного режиму другого контуру дозволить зменшити не тільки швидкість корозії конструкційних елементів, але й кількість відходів та тривалість перехідних процесів. Математична модель входить до складу програмно-технічного комплексу "Водно-хімічний режим другого контуру ВВЕР-1000" (ВХР-2).

Постановка задачі керування водно-хімічним режимом другого контуру ВВЕР-1000. Водно-хімічний режим (ВХР) експлуатації устаткування другого контуру (рис. 1) визначається такими задачами [1, 2, 3]: підтримання регламентованої чистоти робочого середовища контуру, підтримання заданих значень концентрацій хімічних домішок – коректорів водного режиму, забезпечення мінімальної швидкості корозії поверхонь устаткування другого контуру, запобігання концентруванню відкладень різних типів на трубках та інших елементах парогенераторів, мінімізація процесу накопичення корозійно-активних і важкорозчинних домішок у робочому середовищі контуру.

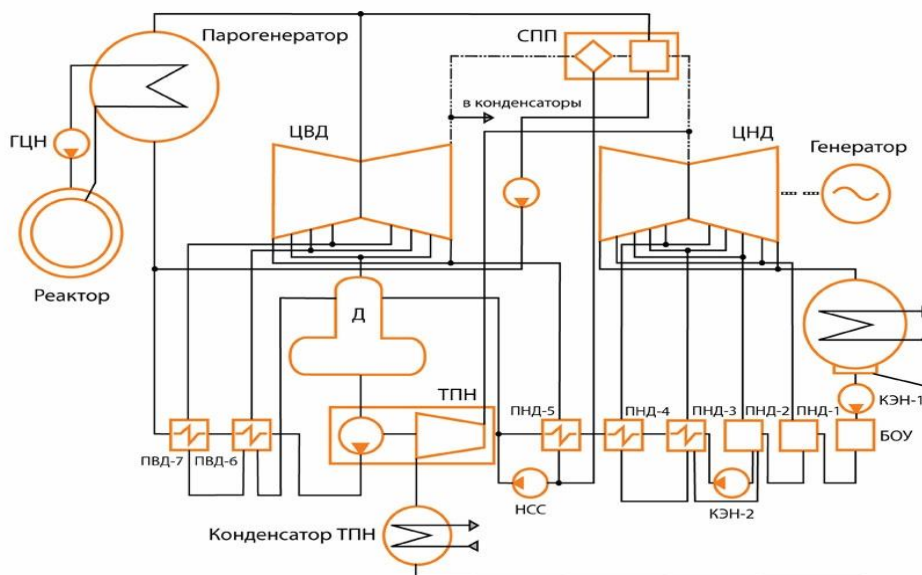


Рис. 1. Принципова теплова схема турбоустановки К-1000-60/3000:

ГЦН – головний циркуляційний насос; ЦВД – циліндр високого тиску;

СПП – сепаратор-паропігрівач; ЦНД – циліндр низького тиску; КЭН-1, 2 – конденсатні насоси; БОУ – блочна знесолююча установка; ПНД-1 ÷ 5 – підігрівачі низького тиску;

Д – деаератор; ТПН – турбоживильний насос; ПВД-6, 7 – підігрівач високого тиску

Розглянуті задачі дозволяють сформулювати критерій керування ВХР другого контуру з водо-водяним енергетичним реактором ВВЕР-1000. Враховуючи, що контролювання ВХР здійснюється за значенням електропровідності [2, 3], критерій керування матиме такий вигляд:

повернути у парогенератор потік живильної води із заданим значенням питомої електричної провідності та забезпечити мінімальну швидкість корозії матеріалів контуру.

Принципи побудови математичної моделі другого контуру Схеми з'єднання конструкційних елементів на кожній АЕС різні, тому при розробці математичної моделі прийнято припущення щодо спрямованості та параметрів потоків. Так суха насичена пара з чотирьох горизонтальних парогенераторів (тиск 60 кгс/см², температура – 274 °С, відносна вологість 0,2 %) по чотирьом паропроводам діаметром 630 мм подається у циліндр високого тиску (ЦВД) турбіни. Відпрацьована пара з ЦВД (тиск 11,6 кгс/см², температура 185 °С, відносна вологість не більш ніж 10 %) по паропроводам подається на чотири сепаратори-паропігрівачі (СПП), в яких здійснюється сепарація вологи і двосходинковий перегрів пари. Перегріта пара з СПП з температурою 250 °С і відносною вологістю 1 % надходить у циліндри низького тиску (ЦНД) турбіни. Сепарат з СПП подається у чотири сепаратозбірники.

Відпрацьована пара з трьох ЦНД подається в три конденсатора, в яких відбувається його повна конденсація. В конденсаторах підтримується вакуум (0,04–0,14) кгс/см² за рахунок конденсації пари і роботи основних ежекторів. Номінальний рівень конденсату в конденсатозбірниках складає 1,7 м. У конденсатор також надходять: конденсат з конденсаторів турбоживильних насосів, хімічно знесолена вода і конденсат з основних бойлерів тепломережі.

Основний конденсат з температурою 28–45 °С конденсатними насосами КЕН-1 подається з конденсаторів у блочну знесолюючу установку БОУ, яка складається з електромагнітного фільтра (ЕМФ) і п'яťох фільтрів змішаної дії (ФСД). Зазвичай у роботі знаходяться 1–2 ФСД, а інша частина конденсату проходить по байпасу БОУ.

З БОУ основний конденсат конденсатними насосами КЕН-2 подається у систему підігрівачів низького тиску. Після ПНД-1 основний конденсат з температурою 55 °С надходить у ПНД-2, звідки виходить з температурою 87,3 °С, далі подається у ПНД-3 і з температурою 121 °С прямує до ПНД-4, де підігрівається до температури 150 °С. Гріюча пара у ПНД надходить з відборів турбіни. Конденсат гріючої пари з ПНД подається насосами зливу у лінію основного конденсату.

З ПНД-5 основний конденсат надходить у деаератор, в якому відбувається – видалення з конденсату розчинених у ньому газів (О₂, СО₂ та ін.). У деаераторі вода та гріюча пара рухаються назустріч один одному: вода – зверху вниз, пара – знизу вгору.

Живильна вода з деаератору подається у підігрівачі високого тиску ПВД-6 турбоживильними насосами (ТПН), де підігрівається за рахунок пари другого відбору турбіни до 200 °С. З ПВД-6 живильна вода надходить у ПВД-7, де підігрівається за рахунок пари першого відбору турбіни до 224 °С. Далі з ПВД-2 живильна вода повертається до чотирьох парогенераторів. Слід також зазначити, що розбіжності в структурі потоків і технологічних режимів реального об'єкта та проекту вирішувались на користь проекту; при складанні системи рівнянь технологічних зв'язків не враховувалося транспортне запізнення. Також прийнято, що основним джерелом домішок є конденсатор, а у гріючій парі домішки відсутні; математичні моделі окремих блоків записані для енергоблоку в режимі нормальної експлуатації.

Згідно з блочним принципом аналізу хіміко-технологічних схем та прийнятими припущеннями, у принциповій тепловій схемі виділено блоки, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Назва блока	Блок описує
1	2
«ТУ»	турбінну установку
«Конденсатор»	конденсатори К-1, К-2, К-3
«КЕН-1»	конденсатний насос першої сходинок
«КЕН-2»	конденсатний насос другої сходинок
«БОУ»	блочну знесолюючу установку
«Деаератор»	деаератори Д-1 і Д-2
«ПВД-6»	підігрівачі високого тиску ПВД-6а і ПВД-6б
«ПВД-7»	підігрівачі високого тиску ПВД-7а і ПВД-7б
«ПНД-1»	підігрівачі низького тиску ПНД-1а і ПНД-1б

Закінчення табл. 1

1	2
«ПНД-2»	підігрівач низького тиску ПНД-2
«Парогенератор»	парогенератори ПГ-1, ПГ-2, ПГ-3, ПГ-4
«ПНД-3»	підігрівач низького тиску ПНД-3
«ПНД-4»	підігрівач низького тиску ПНД-4
«ПНД-5»	підігрівач низького тиску ПНД-5
«СМ-1»	змішувач за ПНД-5

«СМ-2»	змішувач за ПВД-7
«ТПН»	турбоживильний насос
«СВО-5»	механічний, катіонітний та аніонітний фільтри

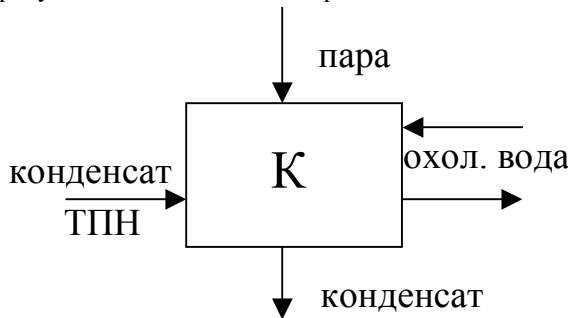
Розглянемо математичні моделі кожного з блоків.

Модель турбінної установки складена на основі матеріального і теплового балансів; розрахунки за моделлю виконуються за допомогою програми *MARGO*. Програма розроблена в Одеському національному політехнічному університеті під керівництвом В.С. Кірова [4]. Розрахунок за програмою *MARGO* включає побудову *h, S*-діаграми процесу розширення пари в турбіні, визначення параметрів робочого тіла в елементах турбоустановки, визначення витрат пари з доборов турбіни, визначення внутрішньої потужності турбіни й показників теплової економічності.

Моделі БОУ та СВО-5 описують розподілення концентрацій іонів домішок як у часі, так і по висоті фільтра й отримані у вигляді систем диференціальних рівнянь у часткових похідних. До складу моделі входять також рівняння матеріального і теплового балансів.

В основу математичної моделі конденсатора покладено експериментально-статистичний підхід; модель отримана у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку у кінцево-різницевої формі. В моделі враховуються ентальпія та мольна частка пари.

Розрахункова схема конденсатора:



Вектор витрат складається з таких елементів:

$$\bar{G} = \{G_{пара}, G_{охол. води}, G_K, G_{ТПН}\}.$$

Вектор температури:

$$\bar{T} = \{T_{пара}, T_{охол. води}, T_K, T_{ТПН}\}.$$

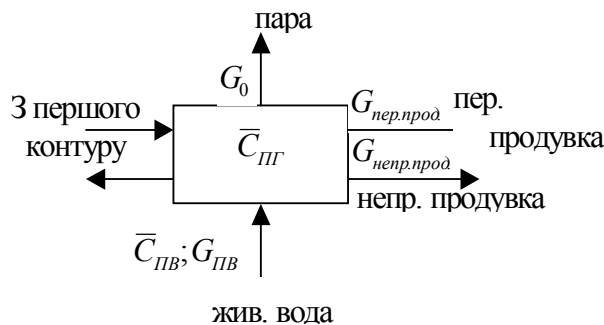
Вектор тиску:

$$\bar{P} = \{P_{пара}, P_{охол. води}, P_K, P_{ТПН}\}$$

Матриця концентрацій:

$$C = \begin{pmatrix} C_{пара}^{Na} & C_{пара}^{Cl} & C_{пара}^{SO4} & C_{пара}^{SiO2} & C_{пара}^{Fe} & C_{пара}^{Cu} & C_{пара}^{O2} \\ C_{охол. води}^{Na} & C_{охол. води}^{Cl} & C_{охол. води}^{SO4} & C_{охол. води}^{SiO2} & C_{охол. води}^{Fe} & C_{охол. води}^{Cu} & C_{охол. води}^{O2} \\ C_K^{Na} & C_K^{Cl} & C_K^{SO4} & C_K^{SiO2} & C_K^{Fe} & C_K^{Cu} & C_K^{O2} \\ C_{ТПН}^{Na} & C_{ТПН}^{Cl} & C_{ТПН}^{SO4} & C_{ТПН}^{SiO2} & C_{ТПН}^{Fe} & C_{ТПН}^{Cu} & C_{ТПН}^{O2} \end{pmatrix}$$

Математична модель парогенератора – це система звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. Розрахункова схема парогенератора:



$$\bar{C}_{ПВ} = (C_{ПВ}^{Na}, C_{ПВ}^{Cl}, C_{ПВ}^{SO4}, C_{ПВ}^{SiO2}, C_{ПВ}^{Fe}, C_{ПВ}^{Cu})$$

$$\bar{C}_{ПГ} = (C_{ПГ}^{Na}, C_{ПГ}^{Cl}, C_{ПГ}^{SO4}, C_{ПГ}^{SiO2}, C_{ПГ}^{Fe}, C_{ПГ}^{Cu})$$

$$\bar{G} = (G_{нодн.}, G_{ПВ}, G_0, G_{непр.прод}, G_{пер.прод.})$$

$$\bar{C}_{ПГ} = f(\bar{C}_{ПВ}, \bar{C}_{нодн.}, \bar{G}).$$

Математичні моделі конденсатних насосів, всіх блоків ПНД та ПВД, змішувачей та ТПН отримані на базі матеріальних і теплових балансів. Досить простий математичний опис пояснюється тим, що з точки зору масо обмінних та хімічних процесів у цих блоках нічого не відбувається.

Сукупність математичних моделей розглянутих блоків і системи рівнянь структури технологічних зв'язків складають математичну модель другого контуру ВВЕР-1000.

Програмна реалізація математичної моделі другого контуру. Розв'язання рівнянь, що входять до складу моделі, здійснювалося у середовищі MatLab Simulink [5]. Цей пакет обрано тому, що при застосуванні Simulink немає необхідності визначати оптимальну кількість дуг, що розриваються, та встановлювати послідовність розрахунку; у системі передбачено можливість візуального редагування моделі і вибору алгоритму розв'язання, а у дистрибутиві MatLab є велика бібліотека алгоритмів та математичних функцій.

Розрахункова схема другого контуру у блоках Simulink наведена на рис. 2.

Стрілки на рис. 2 позначають матеріальні потоки. Кожен потік описується структурою, яка у поданому порядку складається з: масових витрат, т/год.; температури, °C; тиску, МПа; концентрації Na^+ , мкг/кг; концентрації Cl^- , мкг/кг; концентрації SiO_2 , мкг/кг; концентрації SO_4^{2-} , мкг/кг; концентрації Fe^{3+} , мкг/кг; концентрації Cu^{2+} , мкг/кг; концентрації O_2 , мкг/кг; питомої електропровідності χ , мкСм/см.

Кожен з блоків Simulink відповідає блоку математичної моделі другого контуру ВВЕР-1000.

Розрахунок теплового режиму турбінної установки винесено до окремої програми (програма MARGO розроблена у ОНПУ під керівництвом В.С. Кірова [4]).

Модельовання здійснюється у два етапи. На першому етапі розраховуються теплофізичні параметри робочого середовища другого контуру, такі як: температура, витрати, ентальпія за елементами схеми (рис. 2). На цьому етапі прийнято припущення, що вихідні параметри попереднього блоку є вхідними для наступного. Розрахунок теплофізичних параметрів виконується за допомогою програми MARGO [4].

Розрахункові значення параметрів робочого тіла використовуються як вихідні на другому етапі. З метою організації такої взаємодії виконано реорганізацію програмного коду MARGO і отримано консольний варіант програми, а також відокремлено функції виводу в єдину бібліотеку, вилучені функції графічного інтерфейсу користувача, створено можливість вводити вихідну інформацію з файлів даних.

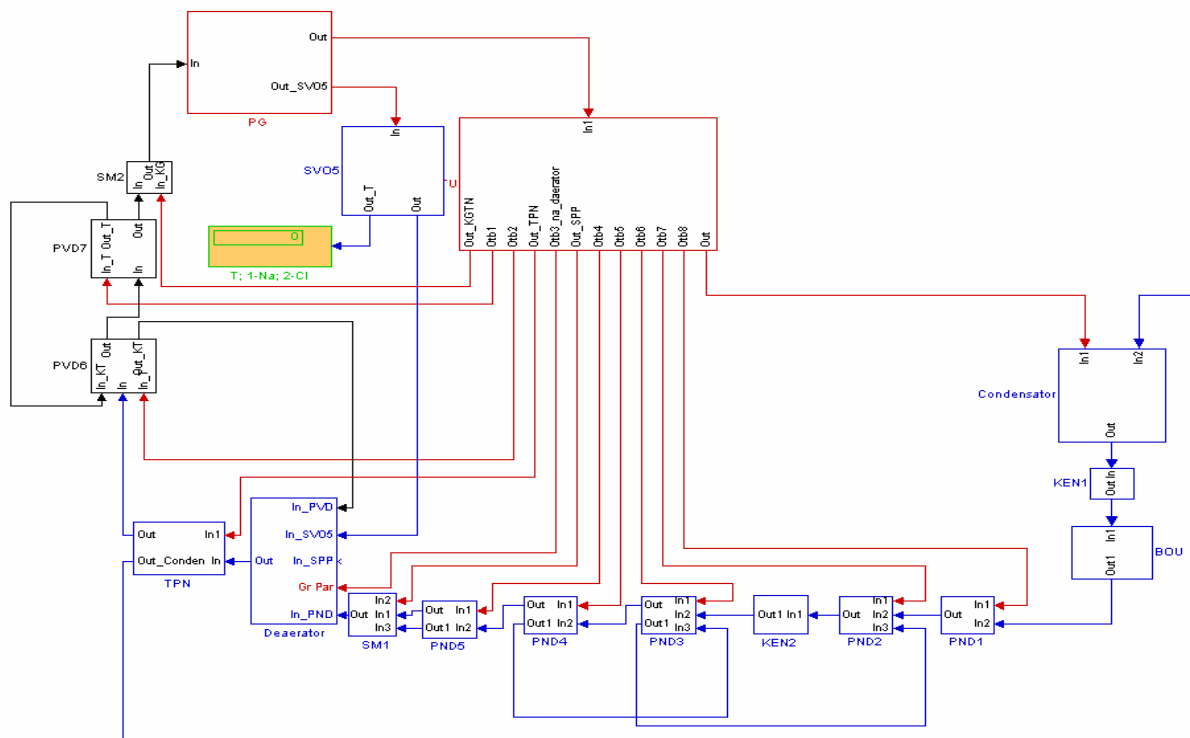


Рис. 2. Розрахункова схема 2 контуру ВВЕР-1000 у блоках Simulink

На другому етапі розраховується значення хімічних показників якості при заданих значеннях домішок, коригуючих домішок і відомих теплофізичних параметрах.

Оцінювання адекватності математичної моделі другого контуру ВВЕР-1000. Враховуючи розбіжності у структурі потоків і технологічних режимів реального об'єкта та проекту, пряме порівняння результатів та оцінювання адекватності моделі за даними нормальної експлуатації було б некоректним. Таку оцінку можна зробити, порівнюючи значення теплової схеми з результатами, отриманими за допомогою програми MARGO, а також дані нормальної експлуатації та нормативні значення – з результатами розрахунків.

Результати розрахунку матеріальних та теплових балансів та їх порівняння з тепловою схемою MARGO надані у табл. 2. Значення тиску не порівнюються, оскільки до складу математичних моделей блоків не входять рівняння для розрахунку тиску.

Таблиця 2

Результати розрахунку матеріальних та теплових балансів

№	Найменування	Результати розрахунку за моделлю		Теплова схема MARGO	
		G, т/ч	T, C	G, т/ч	T, C
1	Конденсат після конденсаторів турбін	3206,20	27,00	3206,1	27,0
8	Конденсат після ПНД-5	3717,18	152,54	3761,7	153
9	Живильна вода за деаератором	5289,75	164,0	5361,2	164,2
12	Живильна вода за останнім ПВД	5289,75	221,27	5361,2	212,2
16	Пара за парогенератором	5798,75	274,30	5870,0	274,3

Як видно з табл. 1, є незначна різниця у витратах, і, як наслідок, у температурах. Ці розбіжності можна пояснити невідповідністю розрахованого значення 4-го відбору значенню у тепловій схемі MARGO; у тепловій схемі не враховано також потік від СВО-5.

Як дані нормальної експлуатації використовувались матеріали звіту «Хімічні показники водно-хімічного режиму за травень 2006. РАЕС 3 блок». Результати порівняння наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Хімічні показники ВХР за травень 2006 р. РАЕС 3 блок

Робоче середовище	Хімічні показники	Одиниця виміру	Норма	Фактичне значення
Конденсат до БОУ	Питома електропровідність	мкСм/см	не > 0,3	0,196
	Na ⁺	мкг/дм ³	не > 2	0,340
	O ₂	мкг/дм ³	не > 30	20,805
Живильна вода 2 контуру	Значення рН	відносні од.	9,0 ± 0,2	8,983
	Питома електропровідність	мкСм/см	не > 0,3	0,206
	Fe ³⁺	мкг/дм ³	не > 15	7,967
	Cu ²⁺	мкг/дм ³	не > 3	2,267
	O ₂	мкг/дм ³	не > 10	3,652
Продувка парогенераторів	Значення рН	відносні од.	8,0–9,2	8,997
	Питома електропровідність	мкСм/см	не > 5	0,869
	Na ⁺	мкг/дм ³	не > 300	9,783
	Cl ⁻	мкг/дм ³	не > 100	40,000
	SO ₄ ²⁻	мкг/дм ³	не > 200	23,779

Розрахункові дані порівнювалися із даними нормальної експлуатації для вказаних у нормативних документах показників якості. Нормами виділені такі точки відбору проб: живильна вода після деаератору; живильна вода після останнього ПВД; конденсат до БОУ; продувка ПГ.

На рис. 3 наведено залежність вмісту кисню у живильній воді на виході з деаератору і в основному конденсаті після ПНД-5 від часу. Для розрахунку за моделлю застосовано метод Рунне–Кутта. Крок по часу дорівнює 0,1 год. Один з вихідних параметрів – значення присосів – рандомізовано; параметр рандомізації дорівнює 0,2.

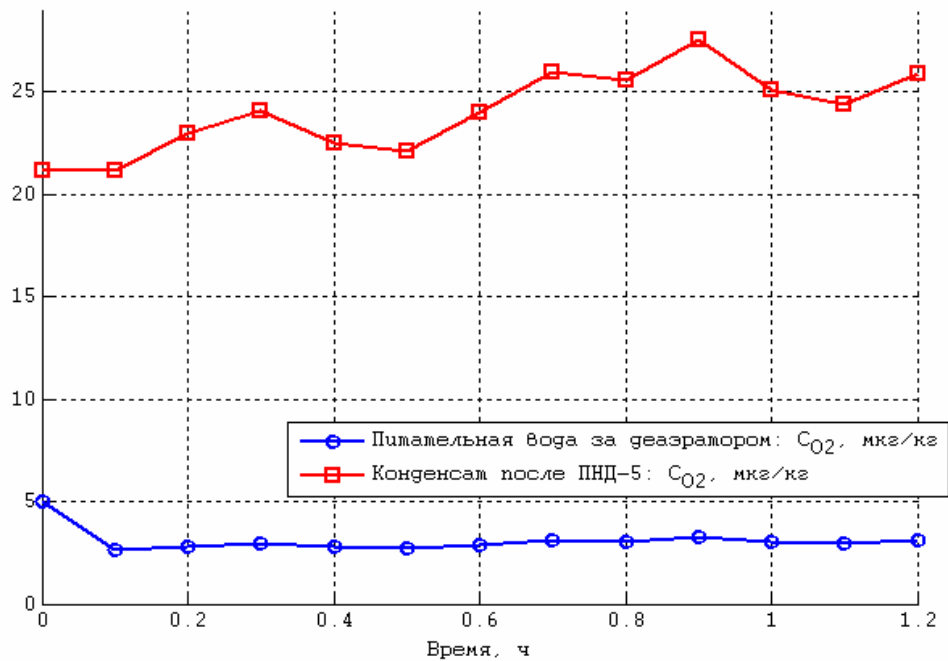


Рис. 3. Залежність вмісту кисню у живильній воді на виході з деаератору і в основному конденсаті після ПНД-5 від часу

Перехідний процес на графіку можна пояснити початковими умовами. Середнє значення концентрації кисню на виході з деаератору становить 2,6 мкг/кг, що відповідає значенням з табл. 3. Як видно з графіку (рис. 3), деаератор виконує своє завдання – позбавляє конденсат кисню.

На рис. 4 наведено залежності концентрацій іонів Na⁺, Cl⁻ та SO₄²⁻ до БОУ від часу.

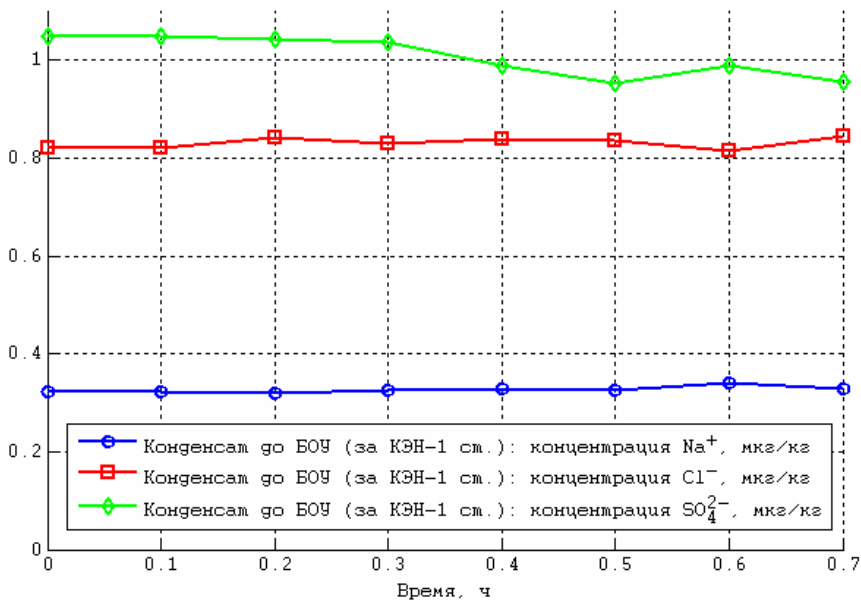


Рис. 4. Конденсат до БОУ. Залежності концентрацій іонів Na⁺, Cl⁻ та SO₄²⁻ від часу

Залежності на рис. 4 цікаво порівняти із залежностями концентрацій іонів Na⁺, Cl⁻ та SO₄²⁻ у неперервній продувці ПГ від часу.

На рис. 5 представлено змінення концентрацій іонів Na⁺, Cl⁻ та SO₄²⁻ у продувці ПГ залежно від часу.

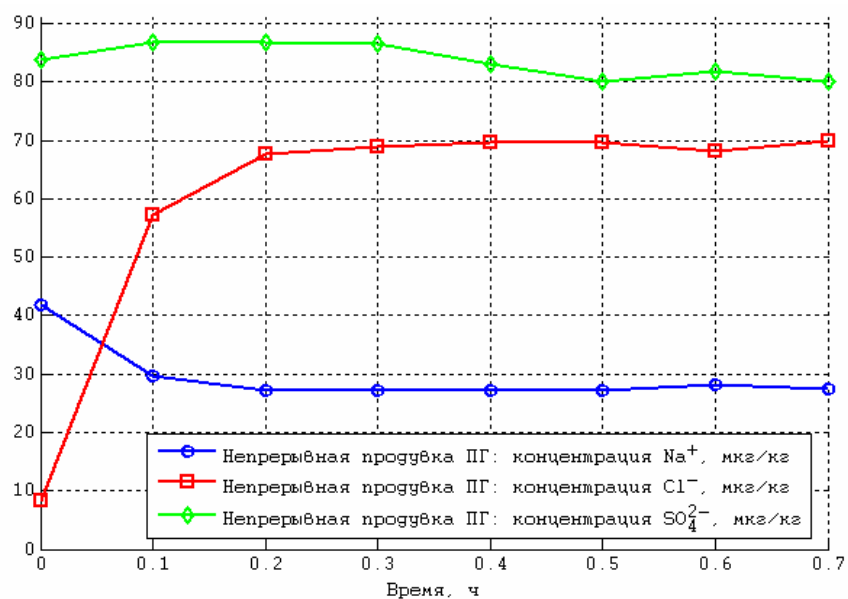


Рис. 5. Продувальна вода ПГ.

Залежності концентрацій іонів Na⁺, Cl⁻ та SO₄²⁻ від часу

Сталі значення відрізняються від даних нормальної експлуатації, але не перевищують нормативних значень. Різницю між розрахунковими і реальними даними можна пояснити тим, що до моделі не включено періодичну продувку парогенератора.

З графіків на рис. 4 і 5 видно, що коливання значень присосів домішок значно впливають на концентрації цих домішок у продувальній воді парогенератора.

Розглянемо вплив присосів іонів Na⁺ у конденсаторі на концентрацію іонів Na⁺ у безперервній продувці парогенератора.

Нанесемо збурення у вигляді одиначної сходинки у момент часу 0,6 год. Графік залежності змінення концентрації іонів Na⁺ у часі в точці відбору проби «до БОУ» представлено на рис. 6.

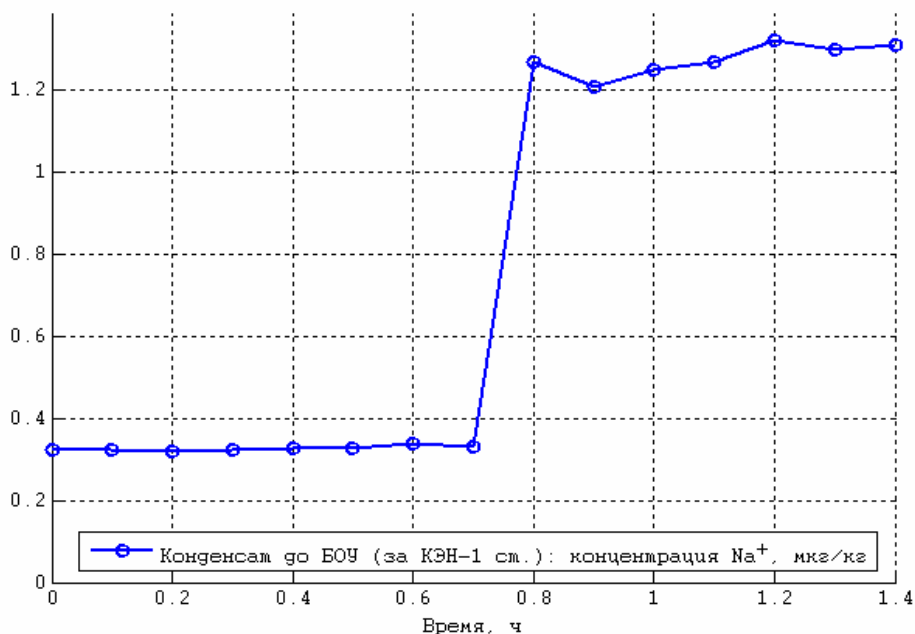


Рис. 6. Конденсат до БОУ.

Змінення концентрації іонів Na⁺ у часі

Графік залежності змінення концентрації іонів Na⁺ у часі у точці відбору проби «Продувка ПГ» представлено на рис. 7.

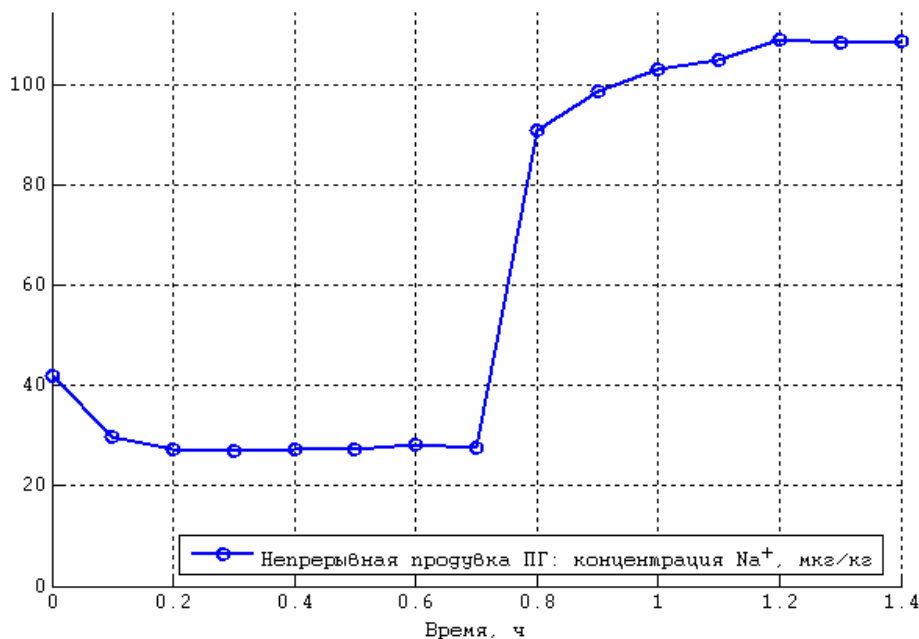


Рис. 7. Продувка вода ПГ.

Змінення концентрації іонів Na⁺ у часі

З рис. 6 і 7 видно, що при зростанні концентрації іонів Na⁺ у основному конденсаті на 1 мкг/кг концентрація його у продувальной воді ПГ збільшується більше ніж на 70 мкг/кг.

Висновок. Наведені залежності дозволяють зробити висновок, що математична модель другого контуру ВВЕР-1000 описує об'єкт згідно з прийнятими припущеннями.

Кількісна оцінка адекватності моделі може бути виконана тільки після обробки реальних технологічних значень за умови адаптації моделі до конкретного об'єкта введення транспортного запізнення між апаратами.

Розглянуту модель можна застосовувати не тільки з метою моніторинг водно-хімічного режиму другого контуру, але й для короткотривалого прогнозування та аналізу можливих порушень.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Медведев Р.Б., Сангинова О.В.* Моделирование и мониторинг водно-химического режима второго контура водо-водяных реакторов // XIX международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях»: Сб. трудов. – Т. 9. – Воронеж, 2006. – С. 11–12.
2. *Medvedev R., Sanginova O.* Optimization of the water chemistry mode at the secondary coolant circuit of a nuclear power plant equipped with VVER-1000 reactor, 33rd International conference of the Slovak Society of Chemical Engineering (SSCHE), Slovak, Bratislava, 2006. – P. 45.
3. *Технологія водоочистки на атомних енергетичних установках / Л.А. Кульський, Є.Б. Страхов, А.М. Волошинова / За ред. Кульського Л.А. – К.: Наук. думка, 1986. – 272 с.*
4. *Киров В.С.* Розрахунок теплових схем. – 1994. – 175 с.
5. *Дьяконов В.* Simulink 4: Специальный справочник. – С.-Пб.: Питер, 2002. – 528 с.

МЕДВЕДСВ Ромуальд Броніславович – професор, кандидат технічних наук, професор кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- автоматизовані системи управління технологічними системами;
- імітаційне моделювання технологічних процесів.

Тел. 454-97-83.

e-mail: medvedev@xtf.ntu-kpi.kiev.ua

САНГІНОВА Ольга Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- контроль та управління технологічними процесами;
- ядерна енергетика.

Тел. 454-97-83.

Подано 22.01.2007