

Кучма В.С.

Одеський національний політехнічний університет

Погосов О.Ю.

Одеський національний політехнічний університет

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЩОДО ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ БОРНОГО ПОГЛИНАЧА НЕЙТРОНІВ У ТЕПЛОНОСІЇ ЯЕУ З ВВЕР-1000

Основне завдання борного рідинного регулювання щодо управління потужністю ядерного реактора ВВЕР-1000 полягає в компенсації повільних змін реактивності протягом кампанії реактора шляхом зміни концентрації поглинача нейтронів – ізотопу ^{10}B , що може входити до теплоносія в складі хімічної сполуки H_3BO_3 . У статті розглядаються технічні можливості виміру концентрації борної кислоти, розчиненої в теплоносії ядерної енергетичної установки, оскільки зміна концентрації має супроводжуватися її оперативними вимірюваннями. Основна методика дослідження полягала в технічному аналізі фізичних принципів і використовуваних на практиці засобів реалізації процедури вимірювання концентрації борної кислоти в теплоносії ядерної енергоустановки з погляду аналізу можливостей щодо автоматизації цих процесів. Узято до уваги, що як базовий метод для визначення концентрації H_3BO_3 має використовуватися нейтронно-абсорбційний метод, передбачений технологічно на сучасних АЕС із реактором ВВЕР-1000.

Ключові слова: ядерний реактор, активна зона, тепловиділення, вимір концентрації рідкого поглинача нейтронів, борна кислота.

Постановка проблеми. Використання борної кислоти як поглинача під час рідинного регулювання дає змогу зменшити нерівномірність розподілу енерговиділення по активній зоні ядерного реактора, так як розчин контактує зі всією активною зоною реактора і змінює нейтронно-фізичні характеристики рівномірно по всьому її об'єму. При цьому потенційно дієвий вплив борної кислоти на реактивність реактора дає можливість використовувати зміну її концентрації в декількох системах безпеки, які здатні вводити в перший контур великі обсяги води з високою концентрацією поглинача нейтронів для припинення ланцюгової реакції й у разі потреби зменшення потужності реактора до прийнятних значень. Однак через значну інерційність такий спосіб практично не застосовується для оперативного регулювання відносно швидких перехідних процесів. Отже, поряд зі зниженням інерційності операцій впливу на потужність реактора шляхом зміни концентрації рідкого поглинача нейтронів у теплоносії існує проблема оперативного вимірювання концентрації борної кислоти для використання цієї поточної інформації в системі управління потужністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вимірювання значень концентрації ізотопу ^{10}B (що відповідає певним значенням концентрації борної кислоти) у водних розчинах зазвичай рахується на основі нейтронно-абсорбційного методу [1, с. 87]. У

публікації розглянута математична модель для розрахунку концентрації ізотопу ^{10}B та борної кислоти у водному розчині, рівняння для вимірювання концентрацій, залежність концентрацій від кількості атомів ізотопу ^{10}B , виконано аналіз цих залежностей. Відомі також інші роботи [2, с. 274; 3, с. 65], у яких аналізуються можливості нейтронно-абсорбційного методу, але в них недостатньо розглянуті аспекти, пов'язані з аналізом швидкості рахування імпульсів технічних засобів концентратометрії ^{10}B , що використовуються на АЕС, залежно від технологічних факторів.

Постановка завдання. Метою статті є проведення аналізу залежності швидкості рахування імпульсів в апаратурі концентратометрії від технологічних факторів, які можуть мати вплив на оперативність вимірювань.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час проведення досліджень бралось до уваги таке. У проектах енергетичних установок з ВВЕР-1000 всі прилади, обладнання та апаратура контролю й управління реакторної установки включені до складу автоматизованої системи управління технологічним процесом. Усі системи при цьому, за правилами ядерної безпеки, діляться на системи (елементи) контролю й управління та системи управління й захисту. Водночас не всі операції, які стосуються управління потужністю реактора, достатньою мірою автоматизовані.

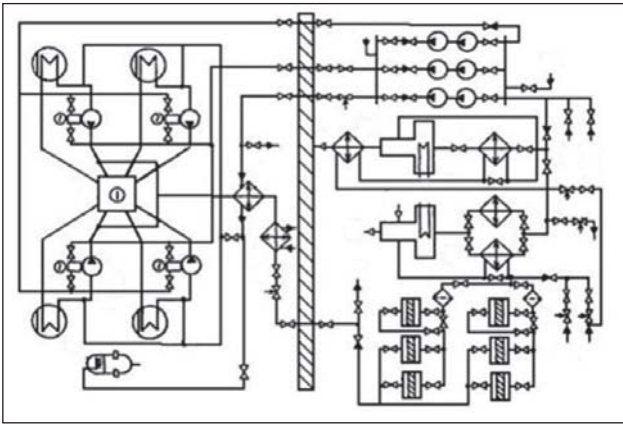


Рис. 1. Система підживлення-продувки першого контуру

Технологічно можливо управління потужністю реактора як за допомогою системи управління й захисту, так і за допомогою системи рідинного (борного) регулювання, але в цьому випадку розглядається тільки система рідинного регулювання, бо саме в цій системі автоматизація не є достатньою. Так, вимірювання концентрації борної кислоти здійснюється завдяки пробовідбору за запитом оперативного персоналу з блочного щита управління енергоблоком АЕС.

Основна функція борного рідинного регулювання полягає в компенсації повільних змін реактивності протягом кампанії реактора. На її початок запас реактивності палива на вигорання дуже великий, 30 ... 40 бевф, його компенсують відносно великою концентрацією борної кислоти (8 ... 9) г/кг. У міру вигорання палива його розмножувальні здатності погіршуються, концентрацію борної кислоти поступово зменшують практично до нуля для підтримки нейтронної потужності на постійному рівні. Існує й низка інших повільних ефектів, що компенсуються за допомогою борного регулювання, наприклад, шлакування палива. Крім борного (рідинного) регулювання, для тих же цілей у реакторах типу ВВЕР застосовуються й інші технічні рішення, наприклад, стрижні (поглинаючі елементи) з вигораючим поглиначем у складі тепловиділяючих збірок і вигораючим поглиначем, унесеним безпосередньо в паливну матрицю [4, с. 244].

Зміна концентрації борної кислоти в теплоносії забезпечується за допомогою системи продувки-підживлення першого контуру. Невелика витрата води через систему продувки-підживлення забезпечує дуже малу швидкість введення позитивної реактивності для відповідності правилам ядерної безпеки. Для збільшення концентрації бор-

ної кислоти її додають від системи боровмісткої води й борного концентрату в систему продувки-підживлення, а звідти в реакторний контур. Для зниження концентрації використовується система дистилляту. У кінці кампанії через дуже малу концентрацію бору ефективність водообміну сильно знижується, і додавання дистилляту стає вкрай неефективним, тому для виведення борної кислоти використовують іонітні фільтри однією із систем водоочиснення [5, с. 359].

Схема системи підживлення-продувки представлена на рис. 1.

Уведення й виведення поглинача нейтронів (^{10}B) вимагає не тільки високоточних попередніх розрахунків, пов'язаних із використанням описаного вище обладнання, а й прецизійних оперативних вимірювань.

Борний поглинач у складі хімічної сполуки ортоборної кислоти подається в теплоносії з так званого бака борного концентрату за допомогою системи підживлення. Отже, за необхідності зниження концентрації борної кислоти здійснюється подачею в теплоносії чистої знесоленої води. Згідно з технологічним стандартом, прийнятим в атомній енергетиці, система рідинного регулювання, що працює за принципом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії шляхом розведення його знесоленою водою або розчином борної кислоти, включає у свій склад технічні пристрої, які повинні забезпечувати таке: компенсацію повільних змін реактивності, пов'язаних із вигоранням ядерного палива, отруєнням реактора ізотопом ксенону ^{135}Xe й ізотопом самарію ^{149}Sm , із розігрів-розхолодженням першого контуру із заданими швидкостями та змінами потужності реактора; створення й підтримання в першому контурі концентрації борної кислоти, необхідної для безпечного проведення перевантаження реакторного палива і для виконання ремонтних робіт; компенсацію витоків теплоносія з першого контуру до значень, що не вимагають включення систем аварійного введення бору в складі водного розчину борної кислоти.

Виходячи із цих специфічних умов, визначення концентрації H_3BO_3 в воді першого контуру виконується за допомогою регулярного пробовідбору теплоносія. Для цього використовується нейтронно-абсорбційний метод, який у практиці експлуатації АЕС отримав умовну назву «метод нейтронного аналізу розчину бору». Варто поставити питання: чи можливо використовувати цей метод, маючи на увазі необхідність подальшої автоматизації описаних вище процесів?

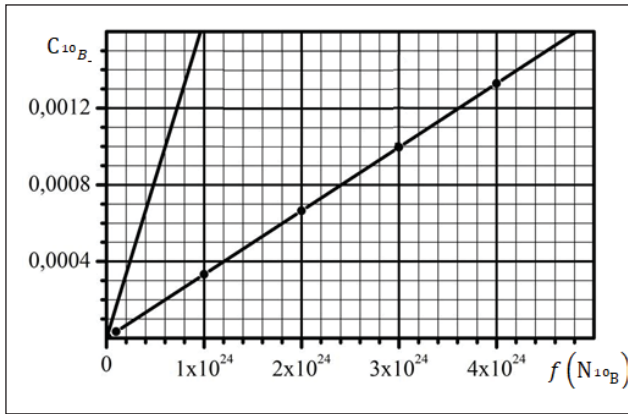


Рис. 2. Залежність $C_{10B} = f(N_{10B})$

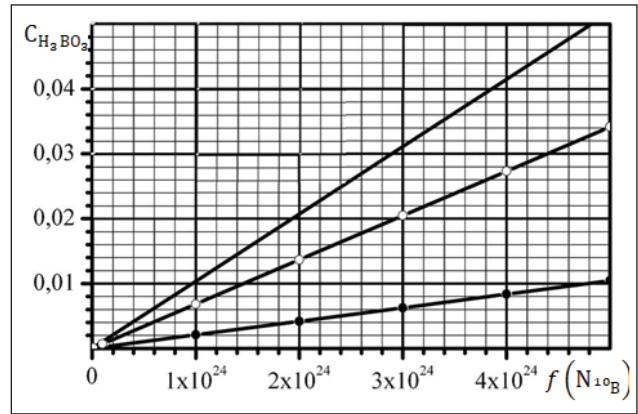


Рис. 3. Залежність $C_{H_3BO_3} = f(N_{10B})$

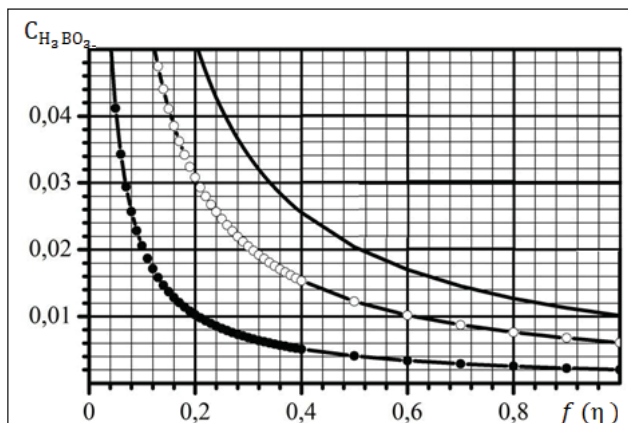


Рис. 4. Залежність $C_{H_3BO_3} = f(\eta)$

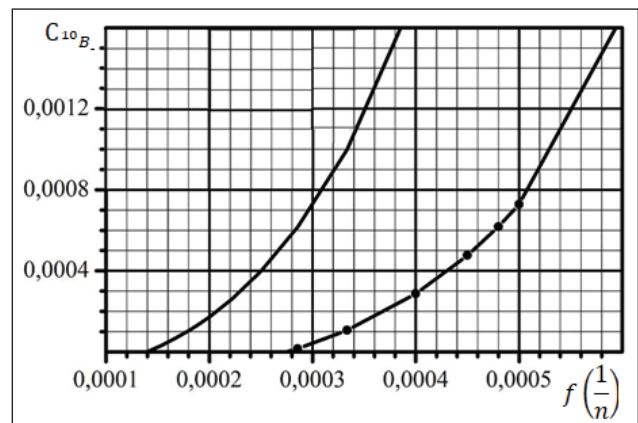
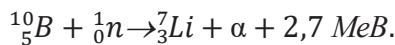


Рис. 5. Залежність $C_{10B} = f\left(\frac{1}{n}\right)$

Справа в тому, що цей метод заснований на таких процесах. Швидкі нейтрони, що випускаються технічним джерелом випромінювання в складі апаратури концентратометрії, в разі потрапляння в досліджуваний розчин борної кислоти (відібрану пробу) сповільнюються за рахунок пружної взаємодії з ядрами хімічних елементів розчину. Частина повільних (теплових) нейтронів поглинається ядрами ізоотопу бору ^{10}B згідно з реакцією:



Технічним засобом реалізації описаного методу є так званий «нейтронний аналізатор розчину базовий» (НАРБ), інакше кажучи, «боромер».

Отже, стандартний боромер містить джерело випромінювання нейтронів і датчик. Нейтронний детектор (датчик) підключений до вторинного приладу й оформлений як одне ціле. Вторинний прилад слугує для перетворення первинного сигналу від детектора нейтронів в електричний сигнал. Цей сигнал являє собою статистично осереднену в часі послідовність прямокутних імпульсів,

що перетворюються в аналоговий електричний сигнал, який потім можна трансформувати за необхідності в цифровий (кодовий) сигнал, пропорційний концентрації борного поглинача. Завдяки такому рішенню вторинний прилад вимірювача перетворює сигнал, що надходить на його вхід, у числове значення концентрації борної кислоти [6, с. 120].

Задля подальшого аналізу розглянемо загальні математичні залежності (аналітичну модель) процесу, що має місце. Значення концентрації бору та борної кислоти C_{10B} і $C_{H_3BO_3}$ дорівнюють:

$$C_{10B} = \frac{m_{10B}}{m_{\Sigma}}, \quad C_{H_3BO_3} = \frac{m_{C_{H_3BO_3}}}{m_{\Sigma}},$$

де m_{10B} – маса ізоотопу ^{10}B ; $m_{H_3BO_3}$ – маса H_3BO_3 ; $m_{\Sigma} = m_{10B} + m_{C_{H_3BO_3}}$ – маса розчину; m_{H_2O} – маса дистильованої води.

На практиці користуються фізичною величиною «масова концентрація», яка дорівнює:

$$C_{V^{10B}} = \frac{m_{10B}}{V_{\Sigma}} \quad \text{або} \quad C_{V_{H_3BO_3}} = \frac{m_{C_{H_3BO_3}}}{V_{\Sigma}},$$

де V_{Σ} – сумарний обсяг розчину.

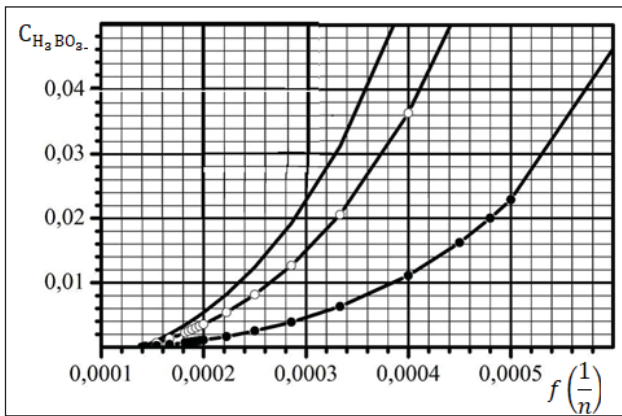


Рис. 6. Залежність $C_{H_3BO_3} = f\left(\frac{1}{n}\right)$

Зробивши математичні розрахунки згідно з методикою [1, с. 87], отримаємо три залежності $C_{10B} = f(N_{10B})$, $C_{H_3BO_3} = f(N_{10B})$, $C_{H_3BO_3} = f(\eta)$. Отримані залежності наведені на рис. 2–4.

Виконаємо аналіз наведених на рисунках залежностей. Проаналізуємо залежність

$$C_{10B} = f(N_{10B}) \text{ і } C_{H_3BO_3} = f(N_{10B}).$$

Масу розчину подамо у вигляді

$$m_L = \frac{(62 - \eta) \cdot N_{10B}}{\eta \cdot N_A} + m_{H_2O},$$

$$\text{де } m_{H_3BO_3} = \frac{(62 - \eta) \cdot N_{10B}}{\eta \cdot N_A}.$$

Аналіз показує таке:

1) C_{10B} і $C_{H_3BO_3}$ лінійно залежать від N_{10B} й обернено пропорційна від m_Σ (рис. 4, рис. 5).

$$C_{10B} = f(N_{10B}) \Big|_{m_\Sigma = const} = const.$$

2) $C_{H_3BO_3}$ нелінійно залежить від η . $C_{H_3BO_3}$ зменшується зі зростанням η (рис. 5), так як зменшується $m_{H_3BO_3}$. При $N_{10B} = const$ ($K_{10B} = const$) і $m_\Sigma = const$:

$$\frac{C_{H_3BO_3}}{C_{10B}} = \frac{\eta_2 \cdot (62 - \eta_1)}{\eta_1 \cdot (62 - \eta_2)}.$$

3) N_{10B} можна змінити або змінюючи масу H_3BO_3 при $\eta = const$, або застосовувати H_3BO_3 з різними значеннями η .

$$N_{10B} = \frac{\eta}{1 - \eta} \cdot N_{11B}.$$

4) $m_\Sigma = const$ і $\eta = const$. Із ростом N_{10B} : C_{10B} і $m_{H_3BO_3}$ збільшуються, отже, m_{H_2O} зменшується.

5) $m_\Sigma = const$ і $N_{10B} = const$. Із ростом η : $C_{10B} = const$, $m_{H_3BO_3}$ зменшуються, отже, m_{H_2O} збільшується.

6) $N_{10B} = const$ і $\eta = const$. Із ростом m_Σ : C_{10B} , $m_{H_3BO_3}$ зменшується, $m_{H_3BO_3} = const$, отже, m_{H_2O} збільшується.

7) $C_{10B} = const$ і $\eta = const$. Із ростом N_{10B} : $m_{H_3BO_3}$ збільшується, отже, $m_{H_2O} = Const$ і m_Σ збільшується.

Розглянемо далі рівняння вимірювань C_{10B} і $C_{H_3BO_3}$.

Щодо залежностей $C_{10B} = f\left(\frac{1}{n}\right)$ і $C_{H_3BO_3} = f\left(\frac{1}{n}\right)$ можна констатувати таке. По-перше, швидкість рахунку імпульсів визначається N_{10B} , N_{10B} обернено пропорційно n . По-друге,

$$C_{10B} = f\left(\frac{1}{n}\right) \Big|_{m_\Sigma = const} = const$$

при постійному потоці нейтронів, отже, $C_{10B} = f\left(\frac{1}{n}\right) \Big|_{m_\Sigma = const} = const$. По-третє, швидкість рахунку імпульсів пропорційна m_Σ . По-четверте, з ростом η швидкість рахунку імпульсів падає при $C_{H_3BO_3} = const$, так як N_{10B} збільшується (рис. 4). Загальні залежності $C_{10B} = f\left(\frac{1}{n}\right)$, $C_{H_3BO_3} = f\left(\frac{1}{n}\right)$ наведені на рис. 5 і 6.

Отже, за результатами аналізу можна зробити висновки, які відповідають досягненню поставленої цілі дослідження. Ці висновки сприятимуть подальшим крокам вирішення наявної проблеми щодо автоматизації вимірювання концентрації поглинача нейтронів у воді першого контуру енергетичної установки з ядерним реактором ВВЕР-1000 щодо завдання управління потужністю енергоблоку.

Висновки. Проведено математичний аналіз залежностей, пов'язаних із роботою вимірювача-аналізатора концентрації борної кислоти й, відповідно, ізоотопу ^{10}B , що призначений для функціонування в системі рідинного управління ядерним реактором ВВЕР-1000 задля вирішення питань подальшої автоматизації регулювання потужності. Аналіз показав таке:

1. Швидкість рахунку імпульсів при впливі нейтронного випромінювання залежить від кількості атомів ізоотопу ^{10}B у водному розчині борної кислоти, яке визначається масою борної кислоти й атомною часткою ізоотопу ^{10}B .

2. Швидкість рахунку імпульсів постійна при постійних значеннях концентрації ізоотопу ^{10}B у водному розчині борної кислоти, кількості атомів ізоотопу ^{10}B , густини потоку нейтронів і маси розчину.

3. При постійній швидкості рахунку концентрація борної кислоти у водному розчині обернено пропорційно залежить від атомної частки ізоотопу ^{10}B при постійній масі розчину.

4. Швидкість рахунку імпульсів пропорційна масі розчину при постійних значеннях концентрації ізоотопу ^{10}B у водному розчині борної кислоти або концентрації борної кислоти у водному розчині й атомної частки ізоотопу ^{10}B .

Результати аналізу можуть бути використані під час розроблення систем автоматизації вимірювань, необхідних для управління потужністю ядерного реактора та енергоблоку загалом і технологічного оцінювання можливостей щодо оперативності цих вимірювань.

Список літератури:

1. Orobinskiy A.N. Neutron-absorbing method for concentrations measuring of a boron-10 isotope in water solution of boric acid and water solution of boric acid. East European journal of physics. 2014. Vol. 1. No. 1. P. 87–94.
2. Погосов А.Ю., Положаенко С.А., Григоренко Ю.В. Моделирование физических процессов и технологическая информатизация в нефтяной промышленности и энергетике. Москва, 2014. С. 474.
3. Кобзев А.С. Радиометрическое обогащение минерального сырья. Москва, 2015. С. 65.
4. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность / А.М. Афров, С.А. Андрушечко, В.Ф. Украинцев, Б.Ю. Васильев, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, Э.Л. Кокосадзе, Е.А. Иванов. Москва, 2006. С. 244–247.
5. Овчинников Ф.Я., Семёнов В.В. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. Москва, 1988. С. 359.
6. Погосов О.Ю., Дерев'янку О.В. Метрологічне забезпечення експлуатації АЕС. Одеса, 2016. С. 120–127.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНО ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ БОРНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ЯЭУ С ВВЭР-1000

Основная задача борного жидкостного регулирования заключается в компенсации медленных изменений реактивности в течение кампании реактора. В статье рассматриваются технические возможности измерения концентрации поглотителя нейтронов, растворенного в теплоносителе ядерной энергетической установки на базе реактора ВВЭР-1000. Основная методика исследования заключалась в техническом анализе физических принципов и используемых на практике средств реализации процедуры измерения концентрации борной кислоты в теплоносителе ядерной энергоустановки. Изменение концентрации борной кислоты обеспечивается с помощью системы продувки-подпитки первого контура. Для определения концентрации H_3BO_3 используется нейтронно-абсорбционный метод.

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, тепловыделение, измерение концентрации жидкого поглотителя нейтронов, борная кислота.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF MEASURING THE CONCENTRATION OF BORON ABSORBER OF NEUTRONS IN THE COOLANT OF A NUCLEAR POWER REACTOR FROM THE VVER-1000

The main task of boron liquid regulation is to compensate the slow changes in reactivity during the reactor campaign. The technical possibilities of measuring the concentration of a neutron absorber dissolved in a coolant of a nuclear power plant based on a VVER-1000 reactor are considered. The main research technique consisted in a technical analysis of physical principles and practical means of implementing of the procedure of measuring the concentration of boric acid in the coolant of a nuclear power plant. The change in the concentration of boric acid is ensured by a purge and supply system of the primary circuit. The neutron absorption method is used to determine the concentration of H_3BO_3 .

Key words: nuclear reactor, active zone, heat release, measurement of liquid neutron absorber concentration, boric acid.