

Имя пользователя:  
Баранюк Александр Володимирович

ID проверки:  
1011593828

Дата проверки:  
16.06.2022 11:46:44 EEST

Тип проверки:  
Doc vs Internet + Library

Дата отчета:  
16.06.2022 11:58:15 EEST

ID пользователя:  
100007114

Название файла: TYa-81-Kasatsy-diploma-2022

Количество страниц: 29 Количество слов: 7485 Количество символов: 53130 Размер файла: 278.15 KB ID файла: 1011462282

## 0.11% Совпадения

Наибольшее совпадение: 0.11% с источником из Библиотеки (ID файла: 1003875657)

Не найдено источников из Интернета

0.11% Источники из Библиотеки

2

Страница 31

## 0% Цитат

Исключение цитат выключено

Исключение списка библиографических ссылок выключено

## 0% Исключений

Нет исключенных источников

## Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы

13

### 3 ОСНОВИ КОНЦЕПЦІЇ РЕАКТОРІВ ІЗ СПЕКТРАЛЬНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ

У реакторах типу ВВЕР, які є реакторами корпусного типу, для підвищення вигорання палива, застосовують часткові перевантаження ТВЗ. При фіксованому збагаченні палива підживлення, збільшення кратності перевантаження призводять до зниження запасу реактивності, що резервується в системі компенсації надлишкової реактивності. Також, це збільшує відносний час простою реактора, що негативно позначається на коефіцієнті використання встановленої потужності.

З метою підвищення КВВП (коефіцієнт використання встановленої потужності) пропонується впроваджувати подовження кампанії аж до півтора-двох років. Збільшення тривалості однієї кампанії реактора призводить до підвищення запасу реактивності. Система компенсації надлишкової реактивності, що використовуються в даний час, засновані на поглинанні нейтронів у сильних поглиначах, як, наприклад, природний бор і гадоліній. Втрати нейтронів у системі компенсації внаслідок їх непотрібного поглинання знижують ефективність використання палива в цих реакторах.

Відомий інший спосіб компенсації надмірної реактивності, так зване спектральне регулювання, при якому в процесі вигорання палива проводиться зміна ВПВ (Водопаливне відношення). Під ВПВ ми розуміємо число ядер водню, основного сповільнювача нейтронів, що припадає на одне ядро урану. Змінюючи водо-паливне відношення у реакторі, можна підтримувати його критичність. Отже, для свіжого паливного завантаження при спектральному регулюванні надлишкові нейтрони в основному поглинатимуться ядрами урану, що призведе до підвищення напрацювання плутонію в паливі. Надалі, із збільшенням ВПВ та наближенням його до оптимального значення відбувається випалювання цього плутонію, що дозволяє сподіватися на підвищення питомого енерговироблення палива.

Таким чином, якщо створити технічний пристрій, що дозволяє змінювати водопаливне відношення в процесі експлуатації реактора, то початковий запас реактивності може бути компенсований зменшенням ВПВ. Надалі в міру

вигорання палива та зниження реактивності необхідно збільшувати ВПВ і тим самим підтримувати критичність реактора.

Концепція реакторів з регульованим спектром нейтронів досліджується значний час, так як фізичні основи такого способу організації роботи реактора впливають безпосередньо з залежності коефіцієнта розмноження середовища ймовірності уникнути резонансного поглинання нейтронів. Значна частина наукових досліджень у галузі спектрального регулювання присвячена підвищенню енерговикористання палива легководних реакторів [8]. Є способи реалізації спектрального регулювання запасу реактивності, як механічним шляхом: застосування спеціальних витіснювачів, так і шляхом розведення уповільнювача матеріалами з гіршими властивостями уповільнення нейтронів.

Для застосування витіснювачів, як регулятора водо-паливного відношення в **ТВЗ**, необхідно здійснити модернізацію конструкції існуючої **ТВЗ** у вигляді застосування різної кількості витіснювачів, зменшення або збереження діаметра твела, зміни кількості цирконієвих і уранових витіснювачів.

Можливий варіант суміші важкої та легкої води, так що у міру вигорання палива вміст важких компонентів зменшується. У цьому варіанті температура та тиск теплоносія практично не змінюються, що є позитивним фактором, але потрібні великі витрати важкої води. Концепція реакторів типу ВВЕР з мікротвелами дозволяє використовувати спектральне регулювання запасу реактивності шляхом зміни пароутримання в теплоносії-уповільнювачі в процесі вигорання палива в реакторі.

Зниження витрати природного урану на паливо підживлення у реакторах на теплових нейтронах є актуальним завданням для сучасного етапу розвитку ядерної енергетики. Саме спектральне регулювання запасу реактивності в перспективних ядерних реакторах дозволяє підвищити вигорання палива без зміни збагачення.

### 3.1 СПОСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ СПЕКТРАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РЕАКТИВНОСТІ

Регулювання реактивності полягає у стриманні або вивільненні реактивності у різних станах реактора. У номінальному режимі реактора функція стримування потрібна для зниження надлишкової реактивності  $\rho$  та підтримки стану  $\rho_{\text{раб}} = 0$ ; у зупиненому стані - для створення підкритичності від 0,01 до 0,05. У діючих АЕС з ВВЕР і PWR (pressurized water reactor) застосовується метод регулювання на основі реакції поглинання надлишкових нейтронів ядрами поглинаючих матеріалів: B, Dy, Hf у ВВЕР, а так само : Ag, In, Cd, у PWR. З цією метою в активну зону вводять робочі органи - поглинаючі стрижні, а у теплоносій - розчин борної кислоти. Можливо також для стримування реактивності на початку кампанії введення в паливо поглиначів, наприклад, Gd. Розглянуті способи є надійними та перевірені багаторічною практикою їх застосування у ВВЕР та PWR. Таким чином, основне призначення регулювання – компенсація надмірної реактивності, призначеної для забезпечення необхідної тривалості кампанії реактора з урахуванням вигорання палива. Істотною особливістю розглянутих способів є нераціональне використання частини нейтронів в результаті реакцій  $n, \gamma$  з атомами B, Dy, Hf. Ці нейтрони могли б більш корисно застосовуватися для поділу урану та відповідно, отримання енергії або для виробництва нових ізотопів, що діляться, наприклад, ізотопів плутонію з подальшим їх використанням в якості вторинного палива. Прикладами процесів із вивільнення реактивності, що використовуються на практиці, є зниження температури теплоносія або потужності реактора для продовження кампанії реактора. У роботах [5] розглядається компенсація запасу реактивності чи вивільнення реактивності зміною спектра нейтронів. У початковий момент кампанії реактора спектр нейтронів посилюється для компенсації запасу реактивності, протягом кампанії і міру вигорання спектр пом'якшується для вивільнення реактивності та продовження кампанії реактора. Можливим варіантом умовно «жорсткого» спектру може бути рекомендований резонансно-тепловий спектр ВУВ (водо-уранове відношення)  $\approx 1,0$ . Подальше зменшення кроку розміщення твелів до

досягнення ВУВ близько 0,5 призводить до зсуву спектра в резонансну область енергії нейтронів, де зміна спектра мало впливає на реактивність. При значення ВУВ близько 0,5 потрібні підвищене збагачення палива близько 7,5% по плутонію. У сфері зміни ВУВ 1-0,5 КВ (коефіцієнт відтворення) змінюється від 0,7 до 1,0. Ці особливості реактора з швидко - резонансним спектром щодо реактора з резонансно-тепловим спектром підтверджені при опрацюванні ВВЕР-НКД - реактора з надкритичними параметрами теплоносія з MOX (Mixed-Oxide fuel) -паливом, збагачення - 7,7%, КВ=0,93 [5]. Розроблено такі способи регульованої зміни спектра:

- застосування в якості теплоносія та сповільнювача суміші легкої та важкої води:  $H_2O$  та  $D_2O$  зі зміною концентрації  $D_2O$  протягом кампанії;
- зміна водо-уранового відношення "ВУВ" протягом кампанії

### 3.1.1 Застосування легкої та важкої води.

Легка та важка вода:  $H_2O$  та  $D_2O$  суттєво відрізняються ядерно-фізичними властивостями. Довжина дифузії нейтронів у легкій воді при щільності  $\gamma=1$  г/см<sup>3</sup> дорівнює 2,72 см, у важкій воді при  $\gamma=1,1$  г/см<sup>3</sup> - 160 см; вік  $\tau$  дорівнює 27 і 120 см<sup>2</sup> відповідно. Таким чином, при використанні  $H_2O$  та  $D_2O$  істотно розрізняються як уповільнення нейтронів зі зниженням енергії до рівня (0,005-0,2)еВ до теплових нейтронів, так і процеси дифузії теплових нейтронів. Крім зазначених відмінностей легка вода має макроскопічний переріз поглинання  $\Sigma_{at} = 0,022$ см<sup>-1</sup> або в 670 разів вище, ніж  $\Sigma_{at} D_2O$ , що призводить до необхідності застосування у водоохолоджуваних реакторах збагаченого палива. Внаслідок зазначеної відмінності ядерно-фізичних властивостей при заміні  $H_2O/D_2O$  в паливній решітці спектр нейтронів істотно посилюється, що дозволяє компенсувати вихідний запас реактивності на початку кампанії реактора. Температурний коефіцієнт реактивності у системі без НО є позитивним. Як наслідок, з міркувань безпеки придатна тільки суміш, що містить не менше 20%  $H_2O D_2O$ , що дещо обмежує застосовність даного способу. Відповідно до ядерної реакції дейтерію з нейтронами утворюється тритій. Досвід експлуатації реакторів

CANDU (Canada Deuterium Uranium) показує, що у важкій воді при активації її нейтронами, утворившийся тритій, хімічно зв'язується в оксид дейтеротритію, а також тритій може бути присутнім у газових скиданнях АЕС. Зроблено оцінки скидання в атмосферу  $D_2O$  та тритію з енергоблоку [5]: до 0,5 кг  $D_2O$  на годину та 5000 кг тритію на рік.

Також суттєво, що  $D_2O$  значно дорожче, ніж штатний теплоносій PWR та ВВЕР. За оцінками джерела [5] вартість 1 кг  $D_2O$  не менше 550\$. Таким чином, впровадження цього способу має передувати виконання додаткових НДДКР (Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи) та заходів, що включають вивчення тритію, а також безпечного поводження з ним. В результаті підвищення вартості теплоносія  $H_2O - D_2O$  та створення додаткових систем з розділення  $H_2O - D_2O$ , а також виділення та поглинання тритію прогнозується подорожчання реакторної установки, але на рисунку В.1 з додатка В, можна побачити ефективність використання  $D_2O$  [6]

### 3.1.2 Зміна ВУВ протягом кампанії.

ВУВ варіюється в результаті зміни частки води в паливній решітці або її щільності [5]. Технологічно складно змінювати крок твелів у ТВЗ, керуючи твелями для зміни ВУВ та забезпечуючи при цьому високу надійність ТВЗ. ВУВ можна змінювати шляхом введення в ТВЗ витіснювачів, аналогічно як вводяться ПЕЛІ (поглинаючий елемент) в ТВЗ ВВЕР-1000. У напрямні канали ТВЗ замість ПЕЛІв можна вводити витіснювачі з незначним впливом на потік нейтронів або твели із збідненим або природним ураном, змінюючи при цьому ВУВ. На початку кампанії ВУВ має бути мінімальним, при цьому коефіцієнт відтворення буде максимально можливим для даного стану активної зони. Надалі протягом кампанії ВУВ збільшується з деяким зменшенням КВ. Зокрема, для активної зони APWR (advanced pressurized water reactor) з МОХ-паливом із вмістом Pu – (6,5-8,5) %, при ВУВ=1,0 коефіцієнт відтворення дорівнює  $K_B=(0,7-0,8)$ .

При ВУВ = 2,0 КВ знижується до 0,55 [7]. Зміна  $K_{eff}$  при зміні ВУВ від 1 до 2 дорівнює  $\Delta K \approx 20\%$ , що приблизно дорівнює діапазону регулювання реактивності

за допомогою борної кислоти. Ці оцінки по діапазону ВУВ узгоджуються з даними в роботі [8], в якій рекомендується діапазон зміни ВУВ (1,0 - 2...2,5) із вмістом ізотопів, що діляться, 2-5 %. У цьому спектр нейтронів змінюється від резонансно-теплого до теплового спектра. Перехід від вихідного варіанта активної зони ВВЕР-600 на активну зону зі спектральним регулюванням призводить до зменшення завантаження  $^{235}\text{U}$  на 12,5%, до зменшення паливної складової вартості електроенергії на ~3% і до можливості відмовитися від борного регулювання.

Зазначені ефекти отримані із застосуванням ТВЗ оптимізованої конструкції у роботі [9]. Замість 7 штатних твелів розміщено шестигранний канал-чохол з 7 твелями з низько збагаченим паливом, що застосовуються для відтворення палива. Кількість чохолів у ТВЗ - 19, і вони розміщені рівномірно за перерізом ТВЗ. Зовнішні два ряди твелів відокремлюють витіснювачі від водяного прошарку між ТВЗ. Твели основного масиву в ТВЗ мають штатний розмір оболонки  $\varnothing$  9,1 мм, крок між твелями зменшений і замість 12,75 мм дорівнює 11,64 мм. Оптимізація полягала у підборі конструкції, у якій область регулювання охоплює більшу частину перерізу ТВЗ, крім зовнішнього ряду твелів ТВЗ. Зовнішній ряд контактує з водяним прошарком між ТВЗ, товщина якого за розміром між ободами становить 2 мм і між твелями суміжних ТВЗ - 6 мм. Зовнішній ряд складається з 66 твелів, що становить 25% від загальної кількості твелів у ТВЗ. Діапазон зміни водо-уранового відношення близький до рекомендованого діапазону в роботі [8] і становить:  $\text{ВУВ} = 2,32$  при вилучених витіснювачах і при введених  $\text{ВУВ} = 1,25$ . Таким чином, передбачалося отримання близького до максимального позитивного ефекту, що необхідно для оцінки перспективності даного способу. Дещо менший ефект, такий як зменшення завантаження  $^{235}\text{U}$  на (10...12) % замість 12,5% у роботі [9], отриманий при опрацюванні варіанта ВВЕР-1000 зі спектральним регулюванням. Канал-чохол виконаний із труби, як у штатній ТВЗ ВВЕР. Канали-чохла в цьому варіанті розміщені в ТВЗ з урахуванням технічних рішень по блоку захисних труб, який розміщений над активною зоною та притискає ТВЗ. Таким чином, позитивний ефект у 2 рази

менший за певний у роботі [8]. Найменший ефект отримано внаслідок можливої похибки визначення ефектів: у 25% у роботі [8] і 12,5% у роботі [9], а також можлива і обмеженість області регулювання - в основному біля напрямних каналів у центральній частині ТВЗ, і не охоплює весь переріз ТВЗ. Наявність постійного за розмірами і властивостями шару води між ТВЗ також впливає на формування поля нейтронів і енерговиділення твелів зовнішньої низки ТВЗ. Крім зазначеного позитивного ефекту економії палива даний спосіб призводить до необхідності збільшення розмірів активної зони і корпусу, для розміщення каналів-чохлів з витіснювачами; а також до суттєвого збільшення кількості приводів на кришці реактора: (49...61) –для ОР СУЗ, (129...138) для переміщення.

Це може призвести і до інших змін як компонування, так і розмірів. Розглянуті оцінки взяті з роботи [9]. Введення витіснювачів в ТВЗ призводить до зміни розподілу енерговиділення в ТВЕЛ даної ТВЗ, що також необхідно враховувати і компенсувати розміщенням твелів з різним збагаченням. У роботі з урахуванням виконаних оцінок позитивного ефекту зроблено припущення, що в умовах, коли паливна складова собівартості електричної енергії, що виробляється на АЕС, не перевищує 15-20 %, такі серйозні зміни ТВЗ і створення додаткової системи управління витіснювачами навряд чи виявляться вигідними.

### 3.1.3 Зміна ВУВ шляхом зміни агрегатного стану води у ТВЗ.

У роботі [10] розглянуто спосіб спектрального регулювання шляхом зміни агрегатного стану води у паливній решітці та відзначається неефективність спектрального регулювання реактивності при кипінні теплоносія у ТВЗ ВВЕР. Неефективність обумовлена кипінням та наявністю бульбашок пари лише у верхній частині, тобто область регулювання обмежена верхньою частиною ТВЗ. Максимальний вміст пари також досягається на виході з ТВЗ. Відповідно, спектр нейтронів у разі змінюється у верхній половині ТВЗ. Цей висновок підтверджується в роботі [5] для реактору ВК-50 (водяний киплячий).

При зміні щільності по висоті ТВЗ киплячого реактора ВК-50 в результаті кипіння теплоносія від 0,8 г/см<sup>3</sup> до 0,3 г/см<sup>3</sup>, ефективна температура теплових



нейтронів змінюється від 640 до 820 К. При цьому зміна від 640 до 800 К відбувається в нижній половині ТВЗ тобто в зоні кипіння та від 800 до 820 К у верхній половині активної зони. Параметр жорсткості спектра у вигляді відношення щільності надтеплових нейтронів до щільності потоку теплових нейтронів збільшується приблизно в 2 рази, при зниженні щільності в 3 рази. Наголошується на складності спектра нейтронів, який, на думку авторів у роботі [11], не можна вважати рівноважним. Зокрема, форма спектру нейтронів, що уповільнюються, відрізняється від спектру Фермі, тобто від залежності  $E^{-1}$  [5]. Енергоблоки із сучасними ВВР (boiling water reactor) відрізняються від ВВЕР способом регулювання потужності. При зміні потужності ВВР більш, ніж 25% використовуються регулюючі стрижні системи управління аналогічно як і у ВВЕР, тобто регулювання здійснюється з допомогою поглинання надлишкових нейтронів ядрами поглинаючих матеріалів. При зміні до 25% потужність вищевказаного реактору регулюється шляхом зміни витрати теплоносія в активній зоні без переміщення регулюючих стрижнів. При збільшенні витрати область з кипінням зменшується за розмірами, зменшується частка пари в активній зоні, щільність теплоносія при цьому збільшується локально і в цій області спектр зміщується до теплового. Тому потужність зростає, доки утворення пари не збалансує надлишок реактивності. У роботі [7] вказується, що в умовах, що розглядаються, зменшення частки пари призводить до зміщення спектра нейтронів в теплову область і збільшення реактивності і, як наслідок до подальшого збільшення потужності ВВР. Зазначене регулювання реактивності ВВР зі зміною потужності до 25% з порівняно високою швидкістю зміни потужності здійснюється без використання реакції поглинання надлишкових нейтронів ядрами поглинаючих матеріалів і є прикладом застосування на практиці спектрального регулювання реактивності. Розглянуті способи та пристрої зі спектральним регулюванням реактивності відрізняються оцінками економічної ефективності. Економія визначається зменшенням завантаження  $U^{235}$  на 12,5% у ВПЦ (відкритий паливний цикл) згідно з даними з роботи [8]; на 25% та на 10%. Виграш у глибині вигорання у роботі [10] оцінено від 6% до 12% і зазначається,

що у ЗПЦ (замкнений паливний цикл), коли вартість палива підвищиться та збільшиться внесок паливної складової у собівартості електроенергії, ситуація не буде такою однозначною та непривабливою з позицій економічної доцільності, і буде вигідно використання спектрального регулювання у ВВЕР. Отже, під час запровадження спектрального регулювання реактивності економічний ефект значимо проявляється що до економії завантаження палива (до 25%).

Оскільки внесок паливної складової у собівартість електроенергії становить до 35%, тож зазначена економія палива у собівартості електроенергії не є значною – до 8%. Практичний інтерес представляє реалізація такої системи, яка має, поряд з економією палива, додатковою функцією, наприклад, реалізацією змінних режимів зміни потужності. При цьому зберігається розглянута економія палива з рахунок раціонального використання нейтронів.

### 3.2 СПЕКТРАЛЬНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ДЛЯ ТИПОВОГО ВВЕР-1000

#### 3.2.1 Спектральне регулювання в ТВЗ для ВВЕР-1000 з використанням Zr-стрижнів.

Розглянемо діапазон спектрального регулювання для одиночної замкнутої ТВЗ реактору ВВЕР-1000. Розрахунки діапазону спектрального регулювання для окремої ТВЗ взято з роботи [12], в якій розглядалася тривимірною моделлю ТВЗ ВВЕР-1000, яка показана на рисунку В.2 у додатку В. Розрахункові данні по ТВЗ були використанні в наступних підрозділах цього розділу.

##### 3.2.1.1 Діапазон спектрального регулювання для ТВЗ

В моделі ТВЗ ВПВ без витіснювачів більше, чим у чаруночній моделі. Тому діапазон регулювання запасу реактивності шляхом впровадження витіснювачів у моделі ТВЗ має бути дещо меншим, ніж у чаруночному поданні. На рисунку В.3 у додатку В, показано горизонтальний перетин моделей ТВЗ ВВЕР-1000 з Zr-стрижнями різного діаметру, вставленими між твелями. Крок решітки був тим самим, що й для чаруночної моделі. Діаметр Zr-стрижнів варіюється від 0 мм до 5,4 мм. Порівняння результатів за діапазоном регулювання в елементарної

чарунці і в ТВЗ для свіжого паливного завантаження та зміни водо-паливного відношення в чарунці і ТВЗ реактора ВВЕР-1000 наведено у таблиці 3.1. Діапазон регулювання в ТВЗ зменшує  $K_{\infty}$  на -0,156, коли діаметр Zr-стрижнів збільшується з 0 мм до 5,4 мм. З іншої сторони, введення Zr-стрижнів в чарунку ВВЕР-1000 призводить до збільшення діапазону регулювання Zr-стрижнями вдвічі більше, ніж у ТВЗ. Введення Zr-стрижнів у чарунку ВВЕР-1000 зменшує  $K_{\infty}$  на -0,3207, коли діаметр Zr-стрижнів збільшується з 0 мм до 5,4 мм. Введення Zr-стрижнів в чарунку і в паливну збірку проілюстровано на рисунку В.4 у додатку В. У кожному кутку в чарунці ВВЕР-1000 один стрижень із цирконію використовується спільно з трьома сусідніми чарунками. Для кожного твелу в чарунці ВВЕР-1000 сума частин Zr-стрижнів дорівнює двом повним Zr-стрижням. ТВЗ ВВЕР-1000 містить 312 твелів. Отже, щоб забезпечити такий же розподіл Zr-стрижнів навколо твелів як в чарунці, тепловиділяюча збірка повинна містити 624 Zr-стрижня. Через наявність направляючих каналів у ТВЗ і через те, що граничні чарунки ТВЗ не допускають такого розміщення витіснювачів, загальна кількість Zr-стрижнів у досліджуваній ТВЗ становить 486, як показано на рисунку В.4. у додатку В. Пропонуються дві моделі ТВЗ ВВЕР-1000 без напрямних каналів та зайвої води навколо ТВЗ. Розрахунки для двох моделей взяті з роботи [12] та порівнюються з результатом чарунки ВВЕР-1000. На рисунку В.5 у додатку В, показані запропоновані моделі ТВЗ ВВЕР-1000, а в таблиці 3.2. показані отримані результати для двох моделей ТВЗ і результат чарунки.

Таблиця 3.2 - Порівняння результатів двох запропонованих моделей ТВЗ і чарунки ВВЕР- 1000.

Модель	Нескінченний коефіцієнт розмноження	
Чарунка ВВЕР-1000	1.33533 ± 0.00072	
Перша модель ТВЗ	± 0.00075	1.33501
Друга модель ТВЗ	± 0.00067	1.33501

Таблиця 3.1 - Зміна діапазону регулювання запасу реактивності шляхом використання витіснювачів в чарунці і ТВЗ ВВЕР-1000.

Ефект Zr-стрижня в чарунці				Ефект Zr-стрижня в ТВЗ			
Діаметр стрижня (мм)	ВПВ в чарунці $i$	$K_{\infty}$	$\Delta K$ $K_0 * K_i$	Діаметр стрижня Zr (мм)	ВПВ у шестигранній ТВЗ із керуючими каналами	$K_{\infty}$	$\Delta K$ $K_0 * K_i$
0	1,60	1,3353		0	1,85	1,3617	
2	1,46	1,3036	-0,018	0,1	1,75	1,3433	-0,010
3	1,3	1,2649	-0,042	0,15	1,62	1,3210	-0,023
4	1,06	1,1988	-0,085	0,2	1,43	1,2850	-0,044
5	0,76	1,0837	-0,174	0,25	1,20	1,2328	-0,077
5,4	0,62	1,0146	-0,237	0,27	1,09	1,2056	-0,095
$\Delta K_{\infty} =$		-0,3207		$\Delta K_{\infty} =$		-0,156	

Якщо на початку чергової кампанії реактора використовуються стрижні великого діаметра як витіснювач води, то це призводить до підвищеного поглинання нейтронів в  $U^{238}$  і надлишкового напрацювання  $Pu^{239}$ .

Надалі у міру вигорання палива реактивність реактора може бути збільшено за рахунок заміни Zr-стрижнів стрижнями менших діаметрів. Послідовною заміною витіснювачів стрижнями різного діаметра, можна моделювати спектральне регулювання надмірної реактивності. Напрацьований плутоній бере участь у подальшому вигоранні палива та збільшує термін компан реактора. На рисунку В.6 у додатку В, показано регулювання реактивності реактора шляхом зменшення діаметра Zr-стрижнів. Також рисунок В.6 з додатку В, показує, що такий спосіб спектрального регулювання збільшує глибину вигорання палива в реакторі ВВЕР- 1000.

### 3.2.1.2 Можливість збільшення паливного кроку решітки ВВЕР- 1000

Спектральне регулювання за допомогою витіснювачів води призначене для регулювання надлишкового запасу реактивності реактора замість рідинного регулювання. Розведений бор у сповільнювачі має недоліки при проектуванні реактора, а також під час роботи реактора. Висока концентрація борної кислоти призводить до позитивного температурного коефіцієнту реактивності уповільнювача. Отже, при проектуванні реактора крок решітки повинен бути

зменшений до оптимального значення, що забезпечує тепловідведення сумісно з найвищою концентрацією борної кислоти. Під час роботи реактора слід використовувати поглиначі, що вигорають, для зниження високої концентрації борної кислоти на перших етапах вигорання. Рисунок В.7 у додатку В, ілюструє зміну значень  $K_{\infty}$  для різних паливних кроків решіток при різних концентраціях борної кислоти в нескінченній решітці паливних елементів в початку циклу. При збільшенні концентрації борної кислоти максимальне значення  $K_{\infty}$  зменшується. При нульовій концентрації борної кислоти максимальне значення  $K_{\infty}$  відповідає паливному кроку решітки 17 мм, який падає до 13 мм, коли концентрація борної кислоти підвищується до максимального значення 1,772 г/кг. Крім того, борна кислота знижує реактивність за рахунок зменшення коефіцієнта використання теплових нейтронів.

Таким чином, повна відмова від борної кислоти дає можливість збільшити паливний крок решітки. Отже, було проведено дослідження збільшення кроку решітки, який призводить до збільшення діаметра  $Z_{\text{стрижнів}}$ . Розширення паливного кроку вивчається в нескінченній решітці паливних елементів із нульовою концентрацією борної кислоти. У процесі збільшення паливного кроку було вираховувано зміну  $K_{\infty}$  на різних паливних кроках для двох станів, холодного та гарячого станів. На рисунку В.8 у додатку В, показано зміну значень  $K_{\infty}$  в залежності від паливного кроку решітки, для холодного та гарячого станів у нескінченній решітці паливних елементів з нульовою концентрацією борної кислоти. Розрахунок гарячого стану проводився при робочій температурі палива 1027 К. Розрахунки холодного та гарячого стану виконувались за нульових концентрацій  $^{153}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ , і борна кислота дорівнювала нулю [12]. Як показано на рисунку В.8 з додатку В, найбільше значення  $K_{\infty}$  холодного та гарячого станів у нульовій потужності становить 1.4574 та 1.4291 на 15 мм та 17 мм відповідно. Найбільше значення  $K_{\infty}$  на кривій холодного стану відповідає оптимальному паливному кроку решітки - оптимальному водо-паливному відношенню. Найвище значення  $K_{\infty}$  у стані гарячої нульової потужності утворює дві області. Перша область, у якій водопаливне відношення менше, ніж оптимальне. У першій

області коефіцієнт розмноження зменшується із підвищенням резонансного поглинання нейтронів в паливі (область 1 рис. В.8). Во другий області коефіцієнт розмноження зменшується рахунок збільшення поглинання теплових нейтронів сповільнювачем (область 2 рис. В.8). ВПВ повинно бути в діапазоні, що забезпечує безпеку активної зони при переході з холодного стану в гарячий, і знаходиться в області 1. Отже, негативна реактивність вводиться за рахунок підвищення температури в спроектованому реакторі на паливному кроці решітки нижче максимального значення  $K_{\infty}$ . Реактор в області 1 більш стабільний і безпечний. Результати вказують на можливість збільшення паливного кроку решітки з 12,75 мм до 15 мм без використання борної кислоти.

Дослідження можливості збільшення кроку палива дозволяє збільшити обсяг легкої води, що використовується як теплоносій та сповільнювач у ВВЕР-1000. Отже, важливо досліджувати щільнісний коефіцієнт реактивності на різних кроках палива. Як відомо, позитивний щільнісний коефіцієнт реактивності у воді водяних реакторах призводить до зниження реактивності реактора при зменшенні щільності води. На рисунку В.9 у додатку В, показаний ефект зменшення щільності води в чарунці ВВЕР-1000 при різних кроках решітки. Ці розрахунки проводились при нульовій концентрації борної кислоти [12]. Отримані результати показують, що щільнісний коефіцієнт реактивності зменшується з збільшенням кроку решітки. А для того ж кроку решітки з зменшенням щільності води щільнісний коефіцієнт реактивності позитивно зростає. Щільність реактивності для кроків решітки від 12 мм до 14 мм задовольняє вимогам безпеки реактора. А крок решітки 15 мм має невеликий щільнісний коефіцієнт реактивності. Можливо зробити висновок, що паливний крок може бути збільшений до 14 мм без борної кислоти з більш надійними підтвердженнями безпеки.

3.2.1.3 Основні параметри, що відносяться до збільшення паливного кроку решітки у ТВЗ ВВЕР-1000

Розглянемо аналіз застосування нового паливного кроку решітки у ТВЗ та діапазон регулювання надмірної реактивності.

У таблиці 3.3 наведено значення ВПВ в ТВЗ при різних кроках решітки, а також відсоток витісненою води при вставці Zr-стрижнів максимального діаметр в ТВЗ. Розширення паливного кроку решітки призводить до збільшення максимального діаметра Zr-стрижнів.

Максимальний діаметр Zr-стрижнів, що вставляються між твелями, збільшується з 5,4 до 7,0 мм при збільшенні кроку решітки з 12,75 до 14,00 мм, а відсоток витісненої води при введенні Zr-стрижнів у ТВЗ збільшується з 23,08 % до 32,17% від загального обсягу збирання, як показано в таблиці 3.3. Також розширення паливного кроку решітки призводить до збільшення загального обсягу ТВЗ, отже і до підвищення ВПВ. На рисунку В.10 у додатку В, показано зміну  $K_{\infty}$  в залежності від ВПВ при різних паливних кроках решітки. Величини  $K_{\infty}$  при кроці решітки 14,00 мм більше, ніж при стандартному, 12,75 мм, кроці решітки. Але коли обсяг води, що витісняється з ТВЗ, збільшується, її властивість уповільнення зменшується, і діапазон регулювання  $K_{\infty}$  стане більше при широкі кроках решітки, як показано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.3 - Збільшення кількості витісненою води з ТВЗ і діаметра Zr - стрижнів залежно від кроку решітки.

Крок решітки (мм)	ВПВ ТВЗ без витіснювачів води	Максимальний діаметр Zr-стрижнів (мм)	Кількість витісненої води з ТВЗ (%)
12,75	1,85	5,4	23,08
13,00	1,98	5,8	25,61
13,50	2,25	6,4	28,92
14,00	2,53	7,0	32,17

Таблиця 3.4 - Збільшення діапазону регулювання  $K_{\infty}$  з витіснювачами води в ТВЗ реактора ВВЕР-1000 зі збільшенням кроку решітки.

Крок решітки (мм)	Діапазон регулювання $K_{\infty}$
12,75	-0,156
13,00	-0,169
13,50	-0,180
14,00	-0,189

На рисунку В.11 у додатку В, показано зміну концентрації  $^{238}\text{U}$  при вигоранні при різних кроках решітки і введенні  $\text{Zr}$ -стрижнів діаметром 5 мм у ТВЗ ВВЕР-1000. Як показано на рисунку В.11 у додатку В, у разі кроку решітки 14 мм, кількість вигорілого  $^{235}\text{U}$  більша, ніж у випадку кроку решітки 12,75. Можемо зробити висновок, що при збільшенні кроку решітки збільшується вигоряння  $^{235}\text{U}$ . Збільшення кроку решітки призводить до збільшення обсягу сповільнювача в ТВЗ. Отже, більша кількість нейтронів сповільнилася до теплової енергії та більше  $^{235}\text{U}$  вигоріло. Проте відсоток витісненої води в більш великій зборці більше, чим в ТВЗ з кроком решітки 12,75 мм. Кількість  $^{238}\text{U}$  перетвореного на  $\text{Pu}^{239}$ , зменшується при збільшенні кроку решітки. На рисунку В.12 у додатку В, показано накопичення  $\text{Pu}^{239}$  з вигорянням на різних кроках решітки в ТВЗ ВВЕР-1000. Кількість  $\text{Pu}^{239}$ , що відтворюється, в пропонуваніх кроках решітки збільшується в міру вигоряння палива. Збільшення паливного кроку решітки знижує виробництво  $\text{Pu}^{239}$ , хоча відсоток витісненої води у разі кроку решітки 14 мм більший, ніж у випадку кроку решітки 12,75 [12].

Доплерівський коефіцієнт реактивності ( $\alpha_T$ ) повинен бути негативним і по порядку величини дорівнює  $10^5$  в теплових реакторах, що містять велику кількість  $^{238}\text{U}$  [12]. У таблиці 3.5 наведено значення Доплерівського коефіцієнта реактивності ( $\alpha_T$ ) у ТВЗ ВВЕР-1000 при різних кроках решітки з введенням  $\text{Zr}$ -стрижнів різного діаметра. Результати розрахунків Доплерівського коефіцієнта реактивності ( $\alpha_T$ ) наведені для температур 900 К та 1200 К. Значення  $\alpha_T$  збільшуються при збільшенні діаметра  $\text{Zr}$ -стрижнів для кожного кроку решітки. Збільшення діаметра  $\text{Zr}$ -стрижнів збільшує ймовірність резонансного поглинання;



нейтронів у паливі. Результати розрахунків параметрів безпеки показали безпек введення Zr-стрижнів у збірку ВВЕР-1000 на різних паливних кроках решітки.

Таблиця 3.5 - Доплерівський коефіцієнт реактивності ( $\alpha_T$ ) при різних паливних кроках решітки та різних діаметрах Zr-стрижнів у ТВЗ ВВЕР-1000.

Доплерівський коефіцієнт реактивності ( $\alpha_T$ )							
Крок решітки 12.75 мм		Крок решітки 13.00 мм		Крок решітки 13.50 мм		Крок решітки 14.00 мм	
Zr Діаметр ( $10^{-5}/\text{Тл}$ ) (мм)	$\alpha_T$	Zr Діаметр (мм)	$\alpha_T$ ( $10^{-5}/\text{Тл}$ )	Zr Діаметр (мм)	$\alpha_T$ ( $10^{-5}/\text{Тл}$ )	Zr Діаметр (мм)	$\alpha_T$ ( $10^{-5}/\text{Тл}$ )
0	-1,597	0	-1,599	0	-1,421	0	-1,355
2	-1,823	2	-1,721	2	-1,584	2	-1,314
3	-2,003	3	-1,542	3	-1,682	3	-1,465
4	-2,098	4	-1,735	4	-1,696	4	-1,477
5	-2,106	5	-2,283	5	-2,087	5	-1,577
5,4	-2,185	5,4	-2,306	5,4	-2,064	5,4	-1,843
		5,8	-2,034	6	-1,970	6	-1,813
			6,4		-2,110	6,6	-2,164
				7			-2,253

Наявність порожнечі знижує щільність сповільнювача. Зменшення щільності сповільнювача зменшує уповільнюючі властивості, збільшує час уповільнення та посилює резонансне поглинання у паливі, що призводить до зниження коефіцієнту розмноження та реактивності реактора. В таблиці 3.6 показаний ефект наявності порожнечі всередині ТВЗ ВВЕР-1000 для кроків решітки 12,75, 13,00, 13,50 і 14,00 мм. Результати по пустотному коефіцієнту реактивності у випадках пропонованого паливного кроку решітки знаходяться в безпечному діапазоні.

Таблица 3.6 - Пустотный коэффициент реактивности при різних паливних кроках решітки та різних діаметрах Zr-стрижнів у ТВЗ ВВЕР-1000.

Пустотный объём (%)	Пустотный коэффициент реактивности ( $10^{-5}/\Delta V\%$ )							
	Крок решітки 12,75 мм		Крок решітки 13,00 мм		Крок решітки 13,50 мм		Крок решітки 14,00 мм	
	Zr 0,0 мм	Zr 4,0 мм	Zr 0,0 мм	Zr 4,0 мм	Zr 0,0 мм	Zr 4,0 мм	Zr 0,0 мм	Zr 4,0 мм
5	-103,15	-136,92	-94,05	-128,13	-78,68	-107,11	-62,24	-91,11
10	-109,57	-153,50	-98,89	-134,72	-84,47	-116,09	-67,73	-97,25
15	-114,09	-158,49	-104,70	-146,51	-88,73	-125,05	-74,99	-104,72
20	-123,10	-168,26	-112,19	-156,36	-96,07	-131,47	-81,39	-113,36
25	-131,97	-181,65	-121,41	-168,82	-103,75	-144,67	-87,51	-121,47
30	-141,29	-193,26	-130,27	-179,34	-112,53	-153,73	-96,50	-131,39

Таблица 3.7 – Температурный коэффициент реактивности по уповільнювачу ( $\alpha_m$ ) за різних паливних кроках решітки і різних діаметрах Zr -стрижнів в ТВЗ ВВЕР-1000.

Щільнісний коефіцієнт реактивності по уповільнювачу ( $\alpha$ )							
Крок решітки 12,75 мм		Крок решітки 13,00 мм		Крок решітки 13,50 мм		Крок решітки 14,00 мм	
Zr Діаметр (мм)	$\alpha_T$ ( $10^{-5}/K^{\square}$ )	Zr Діаметр (мм)	$\alpha_T$ ( $10^{-5}/K^{\square}$ )	Zr Діаметр (мм)	$\alpha_T$ ( $10^{-5}/K^{\square}$ )	Zr Діаметр (мм)	$\alpha_T$ ( $10^{-5}/K^{\square}$ )
0	-22,60	0	-21,01	0	-18,31	0	-15,88
2	-24,17	2	-22,74	2	-19,76	2	-17,16
3	-26,75	3	-25,08	3	-21,75	3	-18,99
4	-30,57	4	-28,69	4	-24,75	4	-21,49
5	-36,61	5	-33,64	5	-29,04	5	-25,12
5,4	-40,03	5,4	-37,09	5,4	-31,55	5,4	-27,28
		5,8	-40,49	6	-36,13	6	-30,78
			6,4		-39,75	6,6	-35,49
			7				-39,26

В основному температурний коефіцієнт реактивності по сповільнювачу  $\alpha_m$  пов'язаний із залежністю реактивності реактора від температури та щільності води. Температурний коефіцієнт реактивності сповільнювача  $\alpha_m$  має бути негативним у водо-водяному реакторі [12]. Таблица 3.7 показує температурний коефіцієнт реактивності за уповільнювачем  $\alpha_m$  усередині запропонованої геометрії. Як показано в таблиці 3.7, негативність температурного коефіцієнта

реактивності по уповільнювачу зменшується зі збільшенням кроку решітки, але залишається в діапазоні безпеки. При фіксованому кроці решітки температурний коефіцієнт реактивності по уповільнювачу зростає зі збільшенням діаметра *Zr*-стрижня.

Це дослідження показало можливість використання *Zr*-стрижнів для регулювання реактивності при експлуатації реактора ВВЕР-1000 на основі палива діоксиду урану. Використання *Zr*-стрижнів як витіснювача води знижує реактивність реактора. Діапазон регулювання *Zr*-стрижнями в ТВЗ вдвічі менший, ніж у чарунці. Дослідження кроку решітки показало можливість збільшення кроку решітки ВВЕР-1000 до 14 мм без борної кислоти, що призводить до збільшення діапазону регулювання з витіснювачами води. Застосування *Zr*-стрижнів як витіснювач води, збільшує глибину вигорання і продовжує паливний цикл за рахунок накопичення вторинного палива.

3.2.2 Спектральне регулювання запасу реактивності в ТВЗ реактору ВВЕР-1000 за допомогою цирконієвих витіснювачів для уранового та торієвого паливних циклів

Торій вважається перспективною альтернативою урану. По-перше, запаси торію в земній корі перевищують запаси урану втричі [12]. По-друге, число нейтронів поділу на один акт на  $U^{233}$  більше чим на  $U^{235}$ , а частка радіаційного захоплення на один акт поділу менше. По-третє, у торієвому циклі вихід трансуранових елементів на порядки менше, ніж у урановому паливному циклі. Таким чином, використання торію в теплових реакторах відкриває можливість збільшення коефіцієнта відтворення та підвищення вигорання палива [12]. У цьому розділі порівнюється використання *Zr*-стрижнів як витіснювачів води в паливних циклах на основі низькозбагаченого урану і уран-торієвого циклу в реакторах типу ВВЕР-1000. %. *Zr*-стрижні розташовуються у просторі між твелями, а діаметр *Zr*-стрижнів варіювався.

Розглянемо оцінку залежності діапазону регулювання ВПВ від радіусу цирконієвого витіснювача.

Розрахункові дослідження впливу Zr-стрижнів на розмножуючі властивості ТВЗ реактора типу ВВЕР проводилися без наявності борного поглинача в теплоносії та поглиначів, що вигоряють, у твелах [12]. У принципі, у реакторах цього типу основна частка початкового запасу реактивності палива на вигоранні компенсується застосуванням часткових перевантажень палива. Чим вище кратність часткових навантажень, тим менше залишкового запасу компенсується поглиначами, включаючи і борне регулювання. Діаметр Zr-стрижнів варіюється від 0 мм до 5,4 мм. Максимальний діаметр Zr-стрижнів залежить від відстані між твелами. Передбачається, що Zr-стрижні безперервно витягуватимуться з активної зони незалежно від органів регулювання. При зміні діаметра Zr-стрижня відбувається зміна ВПВ. В таблиці 3.8 наведено початкові значення коефіцієнта розмноження ТВЗ ВВЕР-1000 при різних діаметрах Zr-стрижнів та відповідне значення водопаливного відношення.

Таблиця 3.8 - Коефіцієнт розмноження у ТВЗ ВВЕР-1000 при різних значеннях водо-паливного відношення для стандартного паливного циклу і торій-уранового паливного циклу з однаковим вмістом матеріалу, що ділиться.

Діаметр Zr-стрижня (мм)	ВПВ $K_{\infty}$ для $UO_2$	$K_{\infty}$ для $Th-U^{233}$	$Th-U^{233}$
0	1,85	1,3608	1,4594
2	1,75	1,3443	1,4487
3	1,62	1,3210	1,4110
4	1,43	1,2857	1,4344
5	1,20	1,2329	1,3743
5,4	1,09	1,2059	1,3541

На рисунках В.13 і В.14 (додаток В) показано зміна коефіцієнта розмноження  $K_{\infty}$  з вигоранням при різних значеннях водо-паливного відношення для обох паливних структур,  $UO_2$  та  $Th-U^{233}$ , відповідно. Як показано на рисунках В.13 та В.14 у додатку В, значення  $K_{\infty}$  у паливному циклі  $Th-U^{233}$  вище, ніж у паливному циклі  $UO_2$ .

У таблиці 3.9 показана різниця коефіцієнта розмноження для обох паливних композицій. Zr-стрижні як витіснявачі води більш ефективні в регулюванні

реактивності реактора з традиційною структурою палива,  $UO_2$  -3,7%, ВВЕР-1000 при тому ж вмісті матеріалу що ділиться, як показано в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 - Різниця нескінченного коефіцієнта розмноження в ТВЗ ВВЕР-1000 при різних значеннях ВПВ в обох паливних циклах  $UO_2$  і  $Th-U^{233}$  з однаковим вмістом матеріалу, що ділиться.

Різниця нескінченного коефіцієнта розмноження	Водопаливне відношення				
	1,85-1,75	1,75-1,6	1,62-1,43	1,43-1,20	1,20-1,09
$\Delta K_{\infty}(UO_2)$ 0,017	0,040	0,075		0,1280,154	
$\Delta K_{\infty}(Th-U^{233})$ 0,011	0,025	0,048		0,0850,105	

На рисунку В.15 у додатку В, показано відносну зміну концентрацій ізоотопів, що діляться, в обох паливних циклах з вигорянням при різних значеннях водо-паливного відношення. Рисунок В.15 (додаток В) показує перевагу уран-торієвого циклу. Нагромадження і захоплення нейтрону в  $Th^{232}$  ось час вигоряння утримує високу концентрацію ізоотопів усередині активної зони.

На рисунках В.16 та В.17 у додатку В, показано зміну концентрацій  $U^{238}$  та  $Th^{232}$ , відповідно, з вигорянням при різних значеннях водо-паливного відношення. Як показано на рисунках В.16 і В.17 (додаток В), концентрація  $U^{238}$  у паливному блоці ВВЕР-1000 зменшується при зменшенні ВПВ.

Вага керуючих стрижнів, Доплерівський коефіцієнт реактивності  $\alpha_T$ , та температурний коефіцієнт реактивності за уповільнювачем  $\alpha_M$ , є важливими параметрами внутрішньо-властивої безпеки реактора. Отже, була проведена оцінка зміни величин цих коефіцієнтів реактивності при зміні водопаливного відношення. У таблиці 3.10 наведено значення аналізованих коефіцієнтів реактивності при різних значеннях ВПВ. Отримані результати забезпечують внутрішньо властиву безпеку у всьому діапазоні зміни ВПВ.

Таблиця 3.10 - Вага керуючих стрижнів, Доплерівський коефіцієнт реактивності, температурний коефіцієнт реактивності по сповільнювачу в різних

моделях ТВЗ ВВЕР-1000 для обох паливних циклів з однаковим змістом матеріалу, що ділиться.

Параметр зворотного зв'язку	Вага керуючих стрижнів $\alpha_T$ та $\alpha_M$						
	$UO_2$	$Th-U^{233}$	$UO_2$	$Th-U^{233}$	$UO_2$	$Th-U^{233}$	
Водопаливне відношення	1,85	-36077	-29972	-1,60	-1,532	-22,60	-10,12
	1,75	-37836	-31198	-1,82	-1,722	-24,17	-11,40
	1,62	-40414	-33018	-2,00	-2,055	-26,75	-13,19
	1,43	-44674	-36101	-2,10	-2,214	-30,57	-15,95
	1,2	-51708	-41343	-2,11	-2,563	-36,61	-20,74
	1,09	-55699	-44336	-2,18	-2,590	-40,03	-23,32

З цього ми бачимо, що використання Zr-стрижнів дозволяє здійснювати компенсацію надлишкової реактивності в відносно невеликому обсязі - приблизно до однієї четвертої частини повного запасу реактивності паливного завантаження на вигорання. При однакових вагових вмістах ізотопу в паливі, 3.7%, діапазон компенсації надлишкової реактивності в урановому паливі кілька більше, чим в торієвому паливному циклі. максимальне значення визначається максимальним діаметром витіснювача. Проте при цьому витрата теплоносія через ТВЗ буде мінімальною, що може призвести до перевищення теплотехнічних обмежень лінійного навантаження. Це може вимагати зниження середньої енергонапруженості активної зони, тобто зниження номінальної потужності АЕС. Одночасне використання борного та спектрального регулювання запасу реактивності буде економічно невиправданим. Тому для відмови від борного регулювання необхідно вибрати таку кратність часткових перевантажень палив щоб запас реактивності на початку кампанії можна було б компенсувати цирконієвими стрижнями. Розрахунки ваги керуючих стрижнів,  $\alpha_T$  та  $\alpha_M$  показали наявність внутрішньо властивих властивостей безпеки в реакторах тиг ВВЕР-1000 з паливом обох паливних циклів  $UO_2$  і  $Th-U^{233}$  та Zr-стрижнями як регулятор реактивності.

### 3.3 ПРОЕКТ ВВЕР ІЗ СПЕКТРАЛЬНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ РЕАКТИВНОСТІ

#### 3.3.1 Перспективність розвитку проекту ВВЕР-С

Розглянемо збільшення сировинної бази ВВЕР на прикладі даних з джерела [6]. У джерелі йдеться, що з початку експлуатації до 2010 року з 9 блоків російських ВВЕР було вилучено 7000 ТВЗ у паливі яких містилися:  $U^{235}$  у кількості 0,7-1,2%,  $Pu$  у кількості 0,6-1,3%, У плутонії залишалися ізотопи, що діляться, в кількості 65-70 %.

Джерело [6] стверджує, що з цих 7000 ТВЗ, шляхом збагачення виділеного з палива, що вигоріло, урану можна отримати регенероване уранове паливо з вмістом ізотопу  $U^{235}$  - 5,1%

Такої кількості палива вистачить для виготовлення приблизно 1500 ТВЗ, еквівалентних енергопотенціалу ТВЗ з природного урану, збагаченого до 4,95%. Але через високий вміст  $U^{232}$  при збагаченні регенерату необхідна його розбавлення природним ураном.

Також вигорілого плутонію достатньо для виготовлення 800 МОХ ТВЗ, еквівалентних енергопотенціалу ТВЗ, виготовленим з природного урану зі збагаченням до 4,95 %.

Дане дослідження показує ефективності використання палива РУ зі спектральним регулюванням оскільки ВВЕР-С працює на такому типі ТВЗ, що в результаті сильно збільшує економію палива.

Модернізація ВВЕР до ВВЕР-С дозволить максимально зменшити кількість поглиначів в активній зоні в процесі вигорання, включаючи борну кислоту, наприклад, при використанні цирконієвих стрижнів, ефективність яких була досліджена в розділі 2. Також за рахунок використання спектрального регулювання стає можливим зменшення кроку твела, що призведе до зменшенню ВУВ. Зменшення ВУВ у свою чергу призведе до посилення спектру, що спричинить збільшення резонансного захоплення. Все це призведе до зменшенню

виникнення теплових нейтронів і буде одним із способів компенсації запасу реактивності на вигоряння на початку компанії.

Основним ефектом спектрального регулювання можна виділити збільшенн захоплення  $^{238}\text{U}$  на початку компанії, яке буде на 10% більше у порівнянні із захопленням у штатній активній зоні.

Це у свою чергу дозволить відмовитися від використання борної кислоти як компенсатор початкової реактивності, а також зменшить вимоги до початковогог завантаження  $\text{U}^{238}$  внаслідок зниження величини необхідного запасу реактивнос

### 3.3.2 Конструкторські опрацювання ТВЗ для ВВЕР-С

У роботі [9] для реалізації вищенаведених принципів спектрального регулювання були виконані опрацювання конструкції ТВЗ зображеної на рисунку В.18 у додатку В, та активної зони із застосуванням стрижнів-витіснювачів на базі відпрацьованих рішень щодо активної зони ВВЕР-1000. Бо для розміщення витіснювачів при збереженні основних параметрів, таких як діаметр твела і розмір ТВЗ "під ключ" зменшилася гріюча поверхня, то розрахункові оцінки виконувалися для зниженої теплової потужності рівною 1600 МВт. Тобто для ВВЕР-600, який при використанні методу спектрального регулювання отримав позначення ВВЕР-600С.

Основна мета виконаних конструкторських опрацювань у роботі [9] - показати принципову можливість технічної реалізації ідеї спектрального регулювання та на основі технічних рішень з ТВЗ та оцінити їх ефективність. Наявність витіснювачів передбачає щонайменше два варіанти роботи активної зони залежно від типу витіснювачів:

- використання порожніх витіснювачів, дозволяє накопичувати плутоній у паливі, що вигоряє, а після вилучення витіснювачів випалювати його;
- використання витіснювачів з природним ураном. У цьому випадку витіснювачі можуть працювати як поглиначі нейтронів і використовуватись для накопичення плутонію.



В результаті конструкторських опрацювань показана наступність технічних рішень як по конструкції ТВЗ, так і конструкції витіснювачів. Зміна ВУВ при введених витіснювачах становила 1,25, а при вилучених - 2,32. Як несучу конструкцію так само як і в ТВЗ-2М використовують жорсткий каркас, утворений приваркою дистанційних решіток до напрямних каналів. Форма прямого каналу, зображена на рисунку В.21 (додаток В) у вигляді профільованої шестигранної труби, вона обумовлена конструкцією витіснювача, виконаного у вигляді 6 твелів  $\varnothing$  8,6 мм, закріплених на цирконієвому дроті. Конструкція витіснювача обрана для забезпечення достатності охолодження твелів у витіснювачі, забезпечення вібростійкості та допустимих зусиль тертя під час переміщення витіснювача. Перетин по пучку представлено на рисунках В.19 і В.20 у додатку В. Як видно, напрямні канали дають можливість оптимізувати кількість точок зварювання при збереженні необхідної жорсткості ТВЗ.

Дистанційна решітка виконується з осередків, аналогічних використовуваним у конструкції ДР (дистанційна решітка) ТВЗ-2М, встановлених по трикутній сітці з кроком 11,64 мм на відміну від 12,75 мм у ВВЕР-1000. Теплоділяючі елементи практично повністю повторюють конструкцію твелів ТВЗ-2М. Відмінність пов'язана з тим, що вони не мають кріплення у нижній решітці. Відмінності конструкції нижньої решітки від нижньої решітки ТВЗ-2М пов'язані з конструкцією напрямних каналів та відсутністю кріплення твелів у ній. Хвостовик ТВЗ повністю відповідає конструкції хвостовика ТВЗ-2М та виконує ті ж функції. Головка ТВЗ – знімна. У ній використані самі принципові рішення і, відповідно, вона виконує самі функції, як і головка ТВЗ-2М. Відмінність пов'язана з тим, що напрямні канали витіснювачів розташовані рівномірно перерізу ТВЗ. Це позначилося на тому, що обичайки виконані шестигранними. Як показали опрацювання конструкцій голівки, пучка та витіснювачів, необхідне коригування конструкції блоку захисних труб. Так фіксація ТВЗ у плані має здійснюватися уловлювачами у формі штирів  $\varnothing$  35 мм, розташованими по кутах шестигранника перерізу ТВЗ. Шестигранна форма голівки, а також те, що елементи витіснювача утворюють досить жорсткий пучок з 6 твелів, закріплених на цирконієвому дроті

рисунок В.21 з додатку В, передбачає відсутність направляючого апарату в БЗТ (блок захисних труб).

Отже, проведені опрацювання показали можливість виготовлення ТВЗ з поглиначом, що можна виймати. Однією з основних завдань подальших конструкторських робіт буде створення надійного приводу, здатного переміщувати складання витіснювачів з твелями з відвального урану вагою ~250 кг. По каркасу буде потрібно технологічне відпрацювання конструкції ДР як основного поля, так і витіснювача, а також створення виробництва тонкостінних профільованих шестигранних труб [9].

### 3.3.3 Нейтронно-фізичні та теплогідравлічні розрахунки

На основі представлених вище конструкторських опрацювань науково дослідницького центру Курчатовського інституту у роботі [9] були виконані нейтронно-фізичні та теплогідравлічні оцінки. Проведено попередні порівняльні оцінки ефективності паливного циклу АЕС з ВВЕР-600 зі штатною конструкцією активної зони та активної зони зі спектральним регулюванням ВВЕР-600С. На рисунку В.22 у додатку В, представлена картограма активної зони ВВЕР-600С. Темним кольором на картограмі відзначені ТВЗ, у яких у стартовий момент роботи реактора розташовуються витіснювачі з збідненого урану. Спектральне регулювання поєднує функції регулювання реактивності у процесі вигорання палива. Послідовне вилучення витіснювачів з твелями з збідненого урану, показане на рисунку В.22 (додаток В), дозволяє компенсувати втрату реактивності під час роботи реактора, при цьому борне регулювання не використовується. У таблиці 3.11 представлено порівняння основних нейтронно - фізичних характеристик активної ВВЕР-600 зі спектральним регулюванням та без нього .

Таблица 3.11 – Основні нейтронно-фізичні характеристики

Характеристика ВВЕР-600	ВВЕР-600С (спектральне регулювання)	
Тривалість роботи стаціонарного завантаження, діб	319	319
Збагачення в твелах витіснювачів, вага	0,2	
Завантаження в АЗ (Вага витіснювачів)	66(11)	
Завантаження $U^{235}$ , кг	476	417

Теплогідравлічний аналіз, виконаний для граничних характеристик енерговиділення,  $K_q = 1,45$ ,  $K_r = 1,63$  [9], показав, що мінімальний запас до кризи тепловіддачі, рівний 1,816, отриманий для ТВЗ із витягнутими витіснювачами на початку завантаження, при цьому максимальна температура оболонки твела 350°C. Найбільше кипіння отримано наприкінці завантаження. Рівноважний масовий паровміст і справжній об'ємний паровміст у "гарячому" осередку рівні, відповідно, 0,017 і 0,423. Проведені дослідження у роботі [9] показали, що перехід від вихідного варіанта активної зони ВВЕР-600 на активну зону зі спектральним регулюванням призводить: до зменшення завантаження  $U^{235}$  на 12,5%, до зменшення паливної складової вартості електроенергії на 3% і до відмови від борного регулювання.

### 3.3.4 Орієнтовні економічні показники проекту ВВЕР-С

У цьому розділі розглянута конкурентоспроможність ВВЕР зі спектральним регулюванням. Модернізація ВВЕР до ВВЕР-С призведе до збільшення ефективності використання  $U^{235}$ . Відмови від борного регулювання на всіх експлуатаційних етапах РУ ВВЕР-С, включаючи етап перевантаження, а також забезпечить підкритичність у будь-якому стані РУ ВВЕР-С за допомогою ОР СУЗ та витіснювачів. ВВЕР-С зможе працювати у маневрених режимах. Також пропонуємо до ознайомлення графік порівняння економії палива на рисунку 3.1.

З діаграми ми бачимо, що за життєвий цикл при роботі самим економічним є ВВЕР-С у ВПЦ з MOX-паливом, далі слідує ВВЕР-С в ВПЦ з REMIX (regenerated mixture)-паливом і на останньому місці по економіці палива за дослідженнями з джерела [6] є ВВЕР у ВПЦ з UOX (Oxide Fuel) паливом.

У ВВЕР-С внесені зміни, які дозволяють мати 100% завантаження MOX - паливом і даний реактор може працювати ~30 років на урановому паливі, а потім ще ~30 років на своєму ж плутонії, що в результаті дає наступний економічний ефект:

Економія ~50% природного урану, в порівнянні з роботою ВВЕР-ТОI (типові оптимізовані та інформатизовані) у відкритому паливному [6].

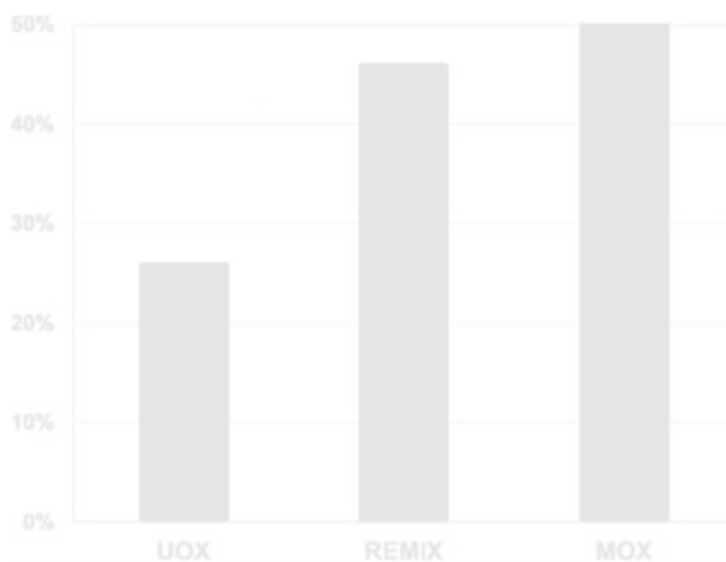


Рисунок 3.1 Порівняння економії природного урану за життєвий цикл під час роботи реактору.

## ВИСНОВКИ ДО СПЕЦПИТАННЯ

Спектральне регулювання під час паливної компанії, дозволяє контролювати спектр нейтронного потоку для збільшення глибини вигорання палива. Для здійснення контролю та управління спектральним регулюванням застосовують зміну ВУВ протягом паливної компанії або використовують легку та важку воду. При використанні легкої та важкої води, температура та тиск теплоносія практично не змінюються, що є позитивним фактором, але будуть потрібні великі витрати важкої води. При цьому по мірі вигорання палива вміст важких компонентів зменшується. Альтернативний варіант це зміна у конструкції існуючих ТВЗ для використання спеціальних витіснювачів. Це дозволить відмовитись від використання борного регулювання.

При застосуванні витіснювачів на початку компанії реактора збільшується поглинання нейтронів в  $U^{238}$  і підвищується напрацювання  $Pu^{239}$ , який бере участь у подальшому вигоранні палива і збільшує тривалість компанії реактора. Спосіб застосування Zr-стрижнів як витіснювачів збільшує інтенсивність вигорання палива, яка залежить від зміни діаметра Zr-стрижнів. Для покращення цього показника необхідно переробити ТВЗ, а саме збільшити крок решітки, що призведе до відмови від борної кислоти. Борна кислота знижує реактивність за рахунок зниження коефіцієнта використання теплових нейтронів і повна відмова від неї дозволить збільшити паливний крок решітки, що призведе до збільшення обсягу легкої води, яка використовується як теплоносій та сповільнювач у ВВЕР.

Із застосуванням витіснювачів паливний крок може бути збільшений до 14мм без використання борної кислоти та при цьому відповідати вимогам безпеки. Для відмови від борної кислоти необхідно вибрати таку кратність часткових перевантажень палива, щоб запас реактивності на початку компанії можна було компенсувати Zr-стрижнями.

Модернізація ВВЕР до ВВЕР-С дозволить зменшити кількість поглиначів, що вигорають, в активній зоні, які поглинають нейтрони під час компанії реактора. Зміни в паливній решітці ТВЗ дозволять зменшити ВУВ на початку

компанії, що призведе до збільшення спектру та сприятиме збільшенню резонансного захоплення, що у свою чергу призведе до зменшення виникнення теплових нейтронів. Все це необхідно для компенсації запасу реактивності на початку компанії. Зменшення необхідної величини запасу реактивності на початку компанії дозволить зменшити вимоги до початкового завантаження палива. Основний ефект запасу реактивності проявляється у збільшенні захоплення  $U^{238}$  на початку компанії що на 10% більше, ніж у типового проекту ВВЕР.

ВВЕР-С дозволяє використовувати МОХ паливо в закритому паливному циклі і це в результаті дає сильний ефект у вигляді економії приблизно 50% природного урану в порівнянні зі ВВЕР, що працює у відкритому паливному циклі.

## Совпадения

Источники из Библиотеки

2

1	Студенческая работа	ID файла: 1003875657	Учебное заведение: National Aviation University	2 Источник	0.11%
---	---------------------	----------------------	---	------------	-------