

*Визначено основні критерії удосконалення паливних завантажень для енергоблоків з реакторами ВВЕР 1000. Обгрунтовано використання паливних циклів з пониженим витоком нейтронів, а також проведено оптимізацію глибини вигорання палива, що вивантажується.*

*Ключові слова:* завантаження, енерговиділення, кампанія, нейтрон.

*Определены основные критерии усовершенствования топливных загрузок для энергоблоков с реакторами ВВЭР 1000. Обосновано использование топливных циклов с пониженной утечкой нейтронов, а также проведена оптимизация глубины выгорания выгружаемого топлива.*

*Ключевые слова:* загрузка, энерговыделение, кампания, нейтрон.

*The main criteria for improving fuel downloads for WVER 1000. The use of fuel cycles with low neutron leakage and also the optimization of the depth of burning fuel is unloaded.*

*Keywords:* download, for energy, campaign, neutrons.

УДК 504.064:621.039

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА В АКТИВНІЙ ЗОНІ РЕАКТОРА

**А. Ф. Васильєв**

Кандидат технічних наук, доцент\*

Контактний тел.: (044) 406-80-82

E-mail: tef@ntu-kpi.kiev.ua

**В. А. Кондратюк**

Аспірант\*

Контактний тел.: (044) 454-97-87

E-mail: komandirVA@i.ua

\*Кафедра атомних електростанцій і інженерної теплофізики  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

### 1. Вступ

Однією з найважливіших проблем сьогоденної атомної енергетики України є неекономне використання палива і досить швидке «старіння» і вихід з ладу устаткування атомних електростанцій. У результаті це істотно позначається на бюджеті України, оскільки найприбутковішою галуззю енергетики є саме атомна енергетика, що дає, як відомо, до 50 % всієї електроенергії. Оскільки Україна не має завершеного паливного циклу, то її розвиток енергетики цілком залежить від країн-партнерів, більш енергетично розвинених. Якщо при цьому ще враховувати високу вартість свіжого палива, нового устаткування і вартість утилізації і переробки ядерних відходів, то можна сказати, що проблема знаходження шляхів по продовженню ресурсу устаткування, вдосконалення паливних завантажень і повнішого використання палива стоїть дуже гостро і потребує максимально швидкого вирішення.

Не менш важливою внутрішньою проблемою ядерної енергетики України є досягнення стійкості просторового розподілу нейтронів по активній зоні. Стійкість просторового розподілу нейтронів по активній зоні і пов'язана з нею стійкість поля енерговиділення є першою умовою, необхідною для забезпечення працездатності і безпеки реакторів [1]. Проблема стійкості нейтронних полів в активній зоні ядерного реактора виникає у зв'язку з тим, що будь-яка зміна стану активної зони викликає відносно повільні ксенонові перехідні процеси. Багатократні перерозподіли енерговиділення, що відбуваються в цей час, можуть призводити до зниження надійності паливних елементів в результаті циклічних навантажень, або до виникнення кризи теплообміну на окремих ділянках ТВЕЛів. З накопиченням досвіду експлуатації ВВЕР, під-

вищенням ефективності використання ядерного палива росте глибина вигорання як вивантажуемого ядерного палива, так і того, яке знаходиться в реакторі. Разом з цим знижується стійкість нейтронних полів, ростуть вимоги до якості управління реактором.

### 2. Критерії підвищення ефективності паливних завантажень

Критерієм підвищення ефективності паливних завантажень на АЕС є підвищення середньої глибини вигорання палива, що вивантажується, і поступове її наближення до максимально припустимого [2].

Відзначимо, що внаслідок збільшення глибини вигорання відпрацьованого палива зменшується кількість підлягаючих захороненню високорадіоактивних ядерних матеріалів. Як наслідок знижуються витрати на обіг з ними. Останній параметр у сучасних умовах стає усе більше важливим через постійне збільшення вартості захоронення ВЯП.

Основними напрямками вдосконалення паливних завантажень є:

- зміна кількості паливних завантажень, протягом яких ТВЗ перебуває в активній зоні;
- впровадження завантажень зі зниженим витоком нейтронів з активної зони, тобто установкою на периферії активної зони частково відпрацьованих ТВЗ.

Важливим моментом є те, що в руслі обох цих напрямків можна використовувати продовження кампанії реактора за рахунок використання негативних ефектів реактивності.

Внаслідок збільшення глибини вигорання ядерного палива продовжується ресурс корпусу реактора й внут-

рішньокорпусного устаткування, тому що щільність потоку нейтронів стає значно меншою.

Однак, зі збільшенням глибини вигорання і, як наслідок, продовження кампанії ядерного палива, з'являється небезпека накопичення в активній зоні трансуранових ізотопів, що, у випадку аварії може привести до більших викидів і забруднення навколишнього середовища. Крім цього, із нагромадженням в активній зоні трансуранових ізотопів збільшується залишкове енерговиділення, а це потребує удосконалення системи охолодження ВЯП. Тому необхідно вести постійний контроль цього процесу. Також у міру нагромадження трансуранових ізотопів керування процесами в ядерному реакторі усе більше ускладнюється. Система керування стає більш інерційною, що збільшує ризик виникнення аварійної ситуації з викидом радіоактивних речовин у навколишнє середовище й руйнування активної зони реактора.

**2.1. Підвищення ефективності паливних завантажень на АЕС із періодичним перевантаженням палива.** Важливим аспектом економіки будь-якого ядерного паливного циклу є дослідження закономірностей, що впливають на величину паливної складової виробленої енергії. Звичайно, роль паливної складової для АЕС не так велика, як для електростанцій на органічному паливі. Однак, існують заходи, що дозволяють не тільки знизити паливну складову собівартості виробленої енергії, але й продовжити строк експлуатації реакторної установки. Причому ці заходи не суперечать існуючим технологічним регламентам експлуатації [2].

Очевидно, що вартість тепловиділяючої збірки у процесі експлуатації змінюється від  $\Pi_0$  — вартості свіжої ТВЗ, до 0 — вартості ТВЗ до моменту вивантаження з активної зони. Відповідно глибина вигорання міняється від 0 до  $E_{\text{виг}}$ . Найбільш часто використовується розмірність МВт · дб/кг для величини  $E_{\text{виг}}$ , де кг — маса спочатку завантаженого в ТВЗ урану. Тоді кількість теплової енергії, отриманої від цієї ТВЗ, дорівнює  $ME_{\text{виг}}$ , де  $M$  — маса вигорілих паливних ізотопів у ТВЗ. Якщо не розглядати вартість поглинаючих стрижнів системи керування й захисту і стрижнів вигораючого поглинача, що змінюється незалежно від вартості ТВЗ, то паливна складова собівартості одиниці енергії, виробленої за весь термін служби реактора дорівнює

$$C_{\text{ТВЗ}} = \frac{\sum_{k=1}^N \Pi_{0,k}}{\sum_{k=1}^N M_k E_{\text{виг},k}} = \frac{\sum_{i=1}^T \Pi_{0,i} P_i}{\sum_{i=1}^T M_i \sum_{j=1}^{P_i} E_{\text{виг},i,j}} = \frac{\sum_{i=1}^T \Pi_{0,i} P_i}{\sum_{i=1}^T M_i \langle E_{\text{виг}} \rangle_i P_i} \quad (1)$$

де  $N$  — загальна кількість ТВЗ, використаних за весь термін служби реактора;  $T$  — кількість типів ТВЗ, які можуть використатися в даному реакторі;  $P_i$  — кількість ТВЗ типу  $i$  використаних у реакторі за весь термін експлуатації;  $P_i = P/N$  — відносна кількість ТВЗ типу  $i$  використаних у реакторі за весь термін експлуатації;  $\Pi_{0,k}$  — початкова вартість  $k$ -ї ТВЗ;  $\Pi_{0,i}$  — вартість свіжої ТВЗ типу  $i$ .

Це означає, що будь-які напрямки модернізації паливних завантажень реактора, пов'язані з використанням

нових типів ТВЗ, удосконаленням режимів експлуатації ТВЗ, тільки в тому випадку приводять до економії ядерного палива, якщо вони приводять до збільшення  $P_i$  з меншим відношенням  $\Pi_{0,i}/(M \langle E_{\text{виг}} \rangle)$ . Або просто до збільшення величини  $\langle E_{\text{виг}} \rangle$ . Цей фактор повинен бути ключовим при аналізі можливих наслідків модернізації.

Таким чином, підвищення ефективності використання ядерного палива звичайно викликає збільшення середньої глибини вигорання вивантажуемого палива, і поступове її наближення до максимально допустимої. До речі, що в цей час максимально припустимою глибиною вигорання основного палива підживлення з початковим збагаченням 4,4 % є значення  $E_{\text{виг}} = 49$  МВт · дб/кгU.

Окрім згаданого виникають декілька інших другорядних зв'язків, наприклад, між паливною складовою собівартості енергії та поведінням з відпрацьованим ядерним паливом. Унаслідок збільшення глибини вигорання вивантажуваного ядерного палива зменшується кількість ВЯП на одиницю виробленої енергії і, як наслідок, знижуються витрати на повадження з ВЯП. Останній параметр в сучасних умовах стає все більш важливим. З урахуванням цього далі в роботі замість терміну «паливна складова собівартості» використовуватимемо ширше поняття «ефективності паливовикористання».

Основним напрямом вдосконалення паливних завантажень для реакторів з періодичним перевантаженням ядерного палива є зміна кількості паливних завантажень, протягом яких ТВЗ знаходиться в активній зоні. Іншим напрямом модернізації паливо використання, що дозволяє підвищити глибину вигорання вивантажуваного ядерного палива, є впровадження завантажень з пониженим вибитком нейтронів із активної зони.

У руслі обох напрямів можна використовувати продовження кампанії реактора за рахунок використання негативних ефектів реактивності. Режим роботи енергоблоків типу ВВЕР з використанням потужностного й температурного негативного ефекту реактивності наприкінці експлуатації паливного завантаження є проектним. Нейтронно-фізичні аспекти використання негативного ефекту реактивності для продовження кампанії водоводяних енергетичних реакторів багаторазово розглядалися в наукових виданнях.

### 3. Перспективи впровадження паливних циклів з пониженим вибитком нейтронів із активної зони ядерного реактора

Експлуатовані в цей час енергоблоки ВВЕР проектувалися для несення базового навантаження й дотепер більшість із них працюють у цьому режимі. Питання економіки паливних циклів, навіть без обліку макроекономічних аспектів, украй складні й ставляться до класу оптимізаційних завдань зі зворотними зв'язками. Традиційний підхід заснований на двох позиціях: між перевантаженнями енергоблок повинен працювати на номінальній потужності, а відношення часу простоїв блоку до часу роботи повинне бути мінімальним.

Звідси виникає завдання скорочення тривалості планово-попереджувальних ремонтів і проробляється активно зараз у Росії, як і в інших країнах, програма збільшення тривалості паливних кампаній. Через те, що однозначного, вичерпного критерію ефективності роботи АЕС дотепер не відомо з розгляду виключається безліч аспектів.

Тривалість роботи між перевантаженнями залежить не тільки від економічної ефективності варіантів циклу, але й від таких умов як забезпечення проведення ППР у заданий час (наприклад, поза осінньо-зимовим максимумом споживання електроенергії, під час роботи інших блоків даної АЕС, а також надійністю устаткування). Таким чином, протяжність кампанії може істотно знизуватися поза залежністю від типу використовуваного паливного циклу.

Актуальною проблемою сучасної атомної енергетики є управління терміном служби АЕС, яке повинне включати комплекс заходів щодо ослаблення впливу шкідливих чинників на устаткування енергоблоку, заміна якого технічно неможлива або економічно недоцільна. До такого устаткування перш за все відноситься корпус реактора. Одним з шкідливих чинників, що впливають на його працездатність, є нейтронне випромінювання. Опромінювання корпусу, головним чином, залежить від розстановки ТВЗ в реакторі. Отже, експлуатація паливних завантажень, що забезпечують мінімальний потік нейтронів з активної зони, є важливим заходом щодо ослаблення шкідливої дії нейтронного випромінювання на корпус. Очевидно, що досягти такого ефекту можна за рахунок установки на периферії активної зони ТВЗ з вигорілим паливом. Ідея використання для зниження витоку нейтронів паливних завантажень з установкою свіжого палива в центральній частині активної зони реактора, вигорілого — на периферії з'явилася майже одночасно з першими енергетичними реакторами.

Основною метою такої компоновки активної зони спочатку вважалася необхідність максимального збільшення тривалості паливної кампанії і/або глибини вигорання відпрацьованого ядерного палива. Надалі паливні завантаження, що характеризуються наявністю вигорілого палива на периферії активної зони реактора, стали використовувати для ослаблення шкідливого впливу нейтронного випромінювання на корпус.

Впровадження циклів зі зниженим витоком нейтронів, як це зроблено на Хмельницької АЕС, дозволяє формувати широкий спектр завантажень у рамках згаданих обмежень, у середньому на 10 % коротше, чим передбачене проектом. З погляду традиційного підходу ці цикли менш ефективні чим проектний, через пропорційний ріст постійної складової собівартості електроенергії. Але в такому циклі щільність потоку швидких нейтронів на внутрішній поверхні корпусу реактора знижується на 25–40 %, що створює передумови пропорційно збільшити термін служби реактора й, тим самим, практично пропорційно знизити постійну складову собівартості. Крім того, такий цикл дозволяє одержати значну економію паливної складової собівартості й знизити питома кількість відпрацьованого ядерного палива на одиницю відпущеної енергії, а більш часте проведення ППР додатково підвищує надійність роботи систем АЕС у ході кампаній. Вплив компоновочних рішень активної зони на ресурс корпусу настільки великий, що дає можливість фактично управляти ними. Проведені дослідження показують, що цей напрямок актуально й перспективно [3].

Для багатьох проектів реакторів, до яких відноситься і ВВЕР-440, технічно не складно встановити ТВЗ з глибоковигорілим паливом майже у всі периферійні осередки. Проте у ВВЕР-1000 зкомпонувати завантаження, що володіє прийнятними характеристиками, з периферійними осередками, повністю заповненими

вигорілим паливом, не представляється можливим. Основна важкість пов'язана з відносно великим поперечним перетином ТВЗ і, як наслідок, малим числом мір свободи при розстановці збірок по осередках, високій нерівномірності енергорозподілу. Із 42 периферійних осередків зазвичай вигорілими ТВЗ заповнюються не більше 24, частіше всього 12–18. Крім того, формально будь-яка з тих, що знаходяться в реакторі ТВЗ з ненульовим вигоранням може вважатися вигорілою. Вказані факти приводять до необхідності пошуку відповідей на питання про те, наскільки глибоковигорілою повинна бути збірка, щоб її установка на периферії призводила до зниження витоку нейтронів, в які периферійні осередки повинні встановлюватися вигорілі ТВЗ, чи завжди зменшення числа нейтронів, втрачених із-за витоку, забезпечує досягнення обох цілей, з якими зв'язують зниження витоку, тобто підвищення економічних показників паливовикористання і ослаблення радіаційного навантаження на корпус.

Слід зазначити, що установка ТВЗ з вигорілим паливом в периферійні осередки, зниження числа нейтронів, що безповоротно покидають активну зону, а також ослаблення радіаційного навантаження на корпус реактора зв'язані не однозначно. Хоча із загальних міркувань завантаженням із зниженим витоком можна було б рахувати будь-яку, в якій зменшено число нейтронів, поглинутих за межами активної зони реактора, правильніше рахувати таким завантаженням, що тільки забезпечує досягнення обох згаданих цілей.

Таким чином, основними напрямками вдосконалення паливних циклів та ТВЗ є:

- збільшення збагачення палива з 4,4 % до 4,95 %;
- компоновки зі зниженим радіальним витоком нейтронів;
- збільшення маси палива за рахунок зміни геометрії паливної таблетки;
- збільшення висоти паливного стовпчика;
- введення аксіальних торцевих бланкетів з паливом низького збагачення;
- збільшення маси палива за рахунок зменшення товщини оболонки паливного елемента;
- розвиток методології обґрунтування безпеки;
- розвиток програмного забезпечення;
- розвиток і розширення сервісної підтримки споживачів.

Картограми перспективних паливних завантажень з пониженим витоком нейтронів для чотирьохрічного і п'ятирічного паливних циклів ВВЕР 1000 зображені на рис. 2 та 3.

Перехід до компоновок з пониженим витоком приводить до помітних змін нейтронний-фізичних характеристик стаціонарних завантажень 12-ти і 18-ти місячних циклів:

- середня за кампанію потужність ТВС периферійного ряду знижується на ~30 %;
- тривалість кампаній зростає на ~2,5 % (12-ти) та ~0,5 % (18-ти);

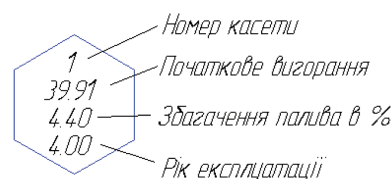
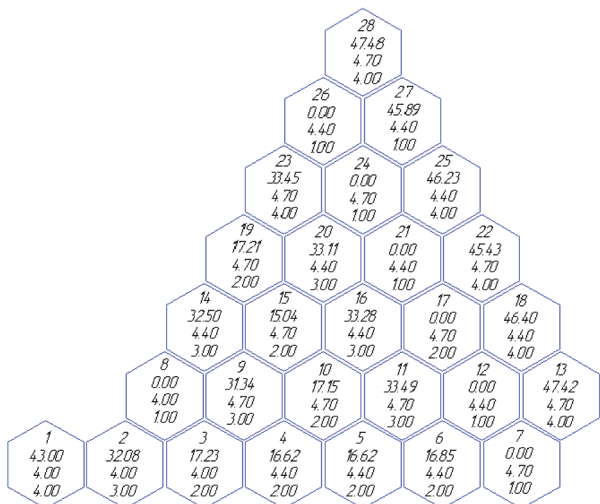
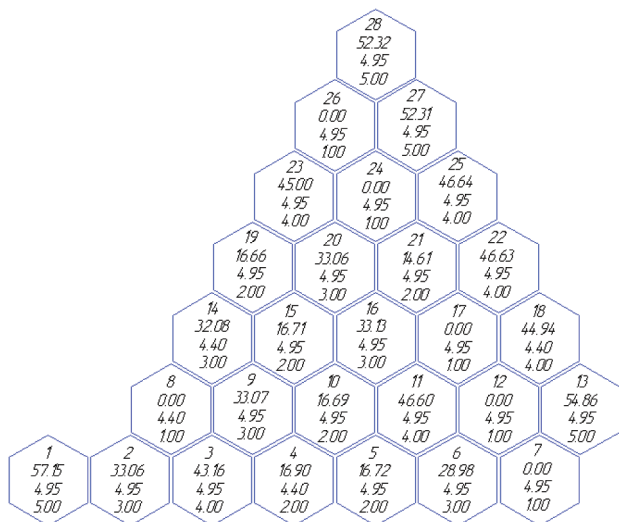


Рис. 1. Позначення картограм паливних завантажень



**Рис. 2.** Картограма перспективного паливного завантаження з пониженим виотком нейтронів для чотирьохрічного паливного циклу



**Рис. 3.** Картограма перспективного паливного завантаження з пониженим виотком нейтронів для п'ятирічного паливного циклу

- температура повторної критичності знижується на 15 °С (12-ти) і 35 °С (18-ти);
- відносна потужність паливних елементів зростає на ~2 % (12-ти) і ~5 % (18-ти);
- лінійне теплове навантаження паливних елементів збільшується на ~4 % (12-ти) і ~5 % (18-ти).

Очевидно, що з погляду паливовикористання не важливо, як розподілена щільність потоку нейтронів по периферії активної зони. Більш того, з погляду зручності компоновки завантаження, дотримання нормативних обмежень на нейтронний-фізичні характеристики активної зони значно простіше встановити вигорілі ТВЗ в осередок 22 (симетрія 60°). Проте не будь-яка установка вигорілого палива на периферії активної зони призводить до зниження виотку нейтронів і/або ослаблення радіаційного навантаження на корпус.

В результаті переходу до перспективних паливних циклів зі зниженим виотком нейтронів середнє вигорання ТВЗ збільшується до 60 МВт·діб/кг, максимальне

вигорання ТВЗ збільшується до 65 МВт·діб/кг, а відносні потужності ТВЗ і твєлів зростають на 3–6 %. Але при цьому:

- відкривається можливість формування паливних завантажень з тривалістю роботи до 600 еф. діб, що розширює діапазон гнучкості експлуатації;
- знижуються питома витрата ТВЗ на ~21–24 %, питома витрата збагаченого урану на ~7–20 %, питома кількість розділових робіт на ~3–6 %;
- з'являється можливість понизити паливну складову собівартості електроенергії на ~12 %.

## Висновки

У даній статті був проведений аналіз існуючих методів удосконалення паливних завантажень для енергоблоків з реакторами ВВЕР-1000. Була розглянута робота реактора на негативних ефектах реактивності наприкінці кампанії, використання ТВЗ збагаченням 4,4 % на четвертий рік експлуатації. Таким чином, основним критерієм підвищення ефективності паливних завантажень на АЕС є підвищення середньої глибини вигорання палива, що вивантажується, і поступове її наближення до максимально припустимого. Внаслідок збільшення глибини вигорання відпрацьованого палива зменшується кількість підлягаючих захороненню високорадіоактивних ядерних матеріалів, як наслідок знижуються витрати на обіг з ними. Крім цього, внаслідок збільшення глибини вигорання ядерного палива продовжується ресурс корпусу реактора й внутрішньокорпусного устаткування, тому що щільність потоку нейтронів стає значно меншою. Однак зі збільшенням глибини вигорання і, як наслідок, продовження кампанії ядерного палива, з'являється небезпека нагромадження в активній зоні трансуранових ізотопів, що, у випадку аварії може привести до більших викидів і забруднення навколишнього середовища. Також із нагромадженням в активній зоні трансуранових ізотопів збільшується залишкове енерговиділення, а це потребує удосконалення системи охолодження ВЯП, і керування процесами в ядерному реакторі ускладнюються.

## Література

1. Аминов Р. З. АЭС с ВВЭР: режимы, характеристики, эффективность [Текст] / Р. З. Аминов, В. А. Хрусталеv, А. С. Духовенский, А. И. Осадчий. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 365 с.
2. Буканов В. Н. Использование топливных загрузок с пониженной утечкой нейтронов для ослабления радиационной нагрузки на корпус ВВЭР-1000 [Текст] / В. Н. Буканов, В. Л. Демехин, А. А. Коренной // Атомная энергия. — Август, 2006. — Т. 101. — Вып. 2. — С. 93–97.
3. Дементьев Б. А. Ядерные энергетические реакторы [Текст] / Б. А. Дементьев. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 280 с.