

Підвищення середньої глибини вигорання ядерного палива шляхом модернізації вигородки ВВЕР – 1000

Повышение средней глубины выгорания ядерного топлива путем модернизации выгородки ВВЭР – 1000

Increasing the average nuclear fuel burnup by modernization the WWER-1000 baffle design

Науковий керівник – старший викладач каф. Атомних електричних станцій
Колиханов В. М., Колыханов В. Н., Kolikhanov V.

Студент групи ТЯ – 1506 Муромський Є. О., Муромский Е. А., Muromskiy I. O.

Анотація: У статті проведений аналіз глибини вигорання палива та шляхи його підвищення. В аналізі були використанні данні трьох кампаній з нейтронно – фізичних характеристик активної зони третього енергоблоку Південно – Української АЕС. Запропоновано проведення модернізацію вигородки за рахунок чого збільшився об'єм активної зони. Рішення включає використання малих ТВЗ, кожна з яких дорівнює третині звичайної ТВЗ. Розглянута модернізація дозволяє підвищити середню глибину вигорання на 1,24 – 2 % за рахунок використання ТВЗ вивантажених ТВЗ протягом п'ятого року та на 3,68 % за рахунок збільшення об'єму активної зони.

Ключові слова : глибина вигорання ядерного палива, активна зона, вигородка реактору, тривалість кампанії, тривалість паливного циклу, ВВЕР – 1000, тип ТВЗ.

Аннотация: В статье проведен анализ глубины выгорания топлива и пути его повышения. В анализе были использованы данные трех кампаний с нейтронно – физических характеристик активной зоны третьего энергоблока Южно – Украинской АЭС. Было предложено проведение модернизацию выгородки за счёт чего увеличился объем активной зоны. Решение включает использования малых ТВС, каждая с которых равно трети обычной ТВС. Рассмотренная модернизация разрешает повысить среднюю глубину выгорания на 1,24 – 2 % за счёт использования ТВС выгруженных ТВС в течении пятого года и на 3,68 % за счёт увеличения объема активной зоны.

Ключевые слова : глубина выгорания ядерного топлива, активная зона, выгородка реактора, продолжительность кампании, продолжительность топливного цикла, ВВЭР – 1000, тип ТВС.

Abstract: The article analyzes the depth of fuel burnout and ways to increase it. The data of three campaigns on neutron - physical characteristics of the core of the third power unit of the South - Ukrainian NPP were used in the analysis. It is proposed to modernize the fence, which increased the volume of the core. The solution involves the use of small fuel assemblies, each equal to one-third of a conventional fuel assemblage. The considered modernization allows to increase the average depth of burnout by 1.24 - 2% due to the use of fuel assemblies unloaded fuel assemblies during the fifth year and by 3.68% due to the increase in the volume of the core.

Keywords: nuclear fuel burn – up, core, reactor baffle, fuel lifetime, fuel cycle duration, baffle VVER – 1000, fuel assemblies.

Одним з важливих показників використання ядерного палива є глибина вигорання. На міжнародному рівні проведено засідання Комітету з ядерної науки NEA, було створено групу експертів, які провели технічну оцінку паливних циклів дуже глибокого вигорання в поточних реакторах легкої води (LWR). Зокрема, розглянуте середнє вигорання палива, що відпрацювало охоплює діапазон між 60 ГВт / т (межа поточного досвіду) та ~ 100 ГВт / т. Об'єм розгляду включатиме оцінки наслідків щодо збагачення, виготовлення палива

(UO2), управління паливом в АЗ, тепло-гідравліки, характеристик палива, термінів використання палива, що відпрацювало та економіки паливного циклу.

Розроблено керівництво щодо технічної можливості поглиблення вигорання палива що відпрацювало на LWR виходячи за межі сучасних рівнів та визначити дослідження, необхідні для підтримки дуже глибокого вигорання. Аналіз охоплює:

- історія розвитку вигорання палива LWR, конструкція палива та вимоги експлуатуючої організації;
- проблеми, що потребують вирішення для досягнення дуже глибокого вигорання;
- наслідки для виробництва палива високих початкових збагачень палива;
- вплив на управління паливом всередині АЗ;
- економічні наслідки для різних етапів паливного циклу;
- потреби додаткових досліджень та розробок.

Це дослідження підкреслила важливі науково технічні проблеми пов'язані з використанням високого вигорання [1].

Найбільш важливим резервом підвищення глибини вигорання і економічного використання палива являється покращенням вирівнювання потужності по активній зоні, що забезпечується відповідними комплектаціями і розташуванням ТВЗ і органів СУЗ в активній зоні. Наприклад, додаткове вирівнювання енерговиділення по радіусу активної зони на 5 – 10 % збільшує середню глибину вигорання і, отже, зменшує паливну складову собівартості електроенергії на 1 – 2 %. Додаткове вирівнювання енерговиділення по висоті активної зони на ті ж 5 – 10 % призводить к збільшенню глибини вигорання і зниженню паливної складової на 3 – 7 %. [2]

Максимальне вигорання палива ВВЕР-440 коливається в межах від 42 до 65 ГВт·діб/т U, тоді як для твел ВВЕР-1000 може досягати до 55 ГВт·діб/т U. Проводиться робота, щоб підняти ці межі до 72 ГВт·діб/т U. Це буде досягнуто шляхом маневрування паливом та впровадженням оптимізованої болонки з цирконієвих сплавів. [2]

Головним обмеженням на шляху підвищення глибини вигорання являється максимальне збагачення свіжого палива до 5 % . Це зв'язано з тим, що заводи – виготовлювачі та підприємства з створення ядерного палива отримали ліцензію, від МАГАТЕ, на виготовлення тільки до 5 % збагачення свіжого палива.

Чим вище глибина вигорання, тим більше глибоке використання палива. Тобто для ефективної роботи ядерного реактору необхідно підвищити глибину вигорання. Можливо підвищити глибину вигорання та пройти 5 % бар'єр задля підвищення ефективності роботи реактора ?

1. Шляхи підвищення глибини вигорання

Є два шляхи підвищення глибини вигорання :

- 1) Збільшити тривалість глибини вигорання. Адже задача полягає у збільшенні тривалості 1,5 – 2 роки;
- 2) Продовжити паливний цикл. Її задача вирішується за рахунок зменшення частка палива, які підвантажують в активну зону.

Розглянуті шляхи підвищення глибини вигорання потребують збільшення початкового збагачення ядерного палива

Тенденція Westinghouse нещодавно була підтверджена неопублікованими розрахунками, проведеними NOK / KNP для BWR Лейбштадта з використанням пакету кодів HELIOS / PRESTO-2. Розрахунки NOK / KNP передбачали фіксовану 12-місячну тривалість кампанії реактора, як у дослідженні Вестінгауза, але поширюються на вигорання, що перевищують 100 ГВт·діб / т. Три варіанти низького вигорання мають нульове завантаження поглинача що вигорає, а дані NOK / KNP дуже близькі до даних Вестінгауза (правда, з трохи крутішим градієнтом). Однак два варіанта сильного вигорання використовують гадоліній як поглинача що вигорає, щоб зменшити потребу в

розчинному борі на початку кампанії. Завантаження гадолінію менше, ніж передбачається в таблиці 1, і лінія тренду для даних NOK / NNP являє собою проміжний варіант між трендом Вестінгауза, який має нульове покарання за отруєння та високе завантаження гадолінію, передбачене у таблиці 1.

Таблиця 1. Приклад взаємозв'язку початкового збагачення ^{235}U та середнього вигорання в збірці 17×17 для PWR, що працює з перезавантаженням чверті АЗ [3]

Вигорання протягом кампанії (ГВт·діб / т)	Середнє вигорання в збірці палива що відпрацювало	Середнє початкове збагачення ^{235}U
11.2	44.9	3.8
13.6	54.3	4.5
16.0	64.1	5.4
18.5	73.8	6.5
21.0	84.0	7.5
23.4	93.7	8.5

Усі заводи з виробництва палива, які зараз працюють, функціонують з обмеженням збагачення 5,0 %; матеріал із збагаченням більше 5,0 % на АЕС не допускається. На практиці окремі балони UF_6 , що постачаються виробником збагаченого урану, мають похибку 0,05 %. Коли кілька таких балонів об'єднуються в одну виробничу партію, похибка середнього збагачення падає до 0,02 %. Тому для того, щоб гарантувати, що обмеження 5,0 % не буде перевищено, заводи з виробництва палива повинні працювати з UF_6 з номінальним збагаченням не вище 4,98 %. Уже є дані, що обмеження 5,0 % починає набувати характер заборони. При середньому вигоранні вивантажених з реактора ТВЗ яке наближається до 50-60 ГВт·діб / т, вже потрібно середнє збагачення збірки в районі 4,5 %. Оскільки паливні збірки BWR використовують радіальну градацію збагачення, щоб протидіяти піку потоку всередині збірки, це означає, що найвищі збагачувальні твелів повинні бути близько 5,0 %, і зараз для розробників палива BWR незвично вказувати область найбільшого збагачення в обмеженнях.

Очевидно, що середнє прогорання збірки, яке перевищує 60 ГВт·діб / т як у BWR, так і в PWR, вимагатиме послаблення межі 5,0 %.

Якщо на практиці потрібно досягти дуже високого вигорання, контроль критичності у виробництві палива та транспортуванні свіжого палива є однією з ключових перешкод, яку слід подолати. Це потребуватиме значних інвестицій, які потребуватимуть гарантованого ринку. З іншого боку, ринок не існуватиме, доки перша компанія з виробництва палива не бере на себе зобов'язання. Прогнози, чи відбудеться це і коли, мають невизначеність одну з найбільших.

Глибина вигорання ядерного палива обмежується великим числом факторів, які можна розбити на три групи :

1. Група факторів, яка обумовлена необхідністю мати в кінці кампанії критичну масу палива і певний надлишок над нею, створюючий запас реактивності, необхідний для компенсації шлакування, отруєння і, в разі необхідності, температурного ефекту реактивності ;
2. Група факторів, пов'язана з обмеженнями по вибору надлишку маси ядерного палива над критичною у момент перезавантаження, визначаючи тим, що маючи в ядерний реактор органи СУЗ не в змозі компенсувати надмірно великого запасу реактивності ;
3. Група обмежуючи фактори, обумовлена стійкістю оболонок твелів. Вона зв'язана як з накопленням продуктів ділення, так із загальною тривалістю роботи твелів в ядерний реактор і режимам його роботи. Накопичення газоподібних продуктів

ділення, особливо при великій глибині вигорання, призводить к великому збільшенню внутрішнього тиску. Цей ефект підсилюється можливим розпуханням палива при накопичуванні в ньому продуктів ділення. В поєднанні з термоциклічними навантаженнями, а також радіаційними і корозійними пошкодженнями це можливо стати причиною розгерметизації твєлів.

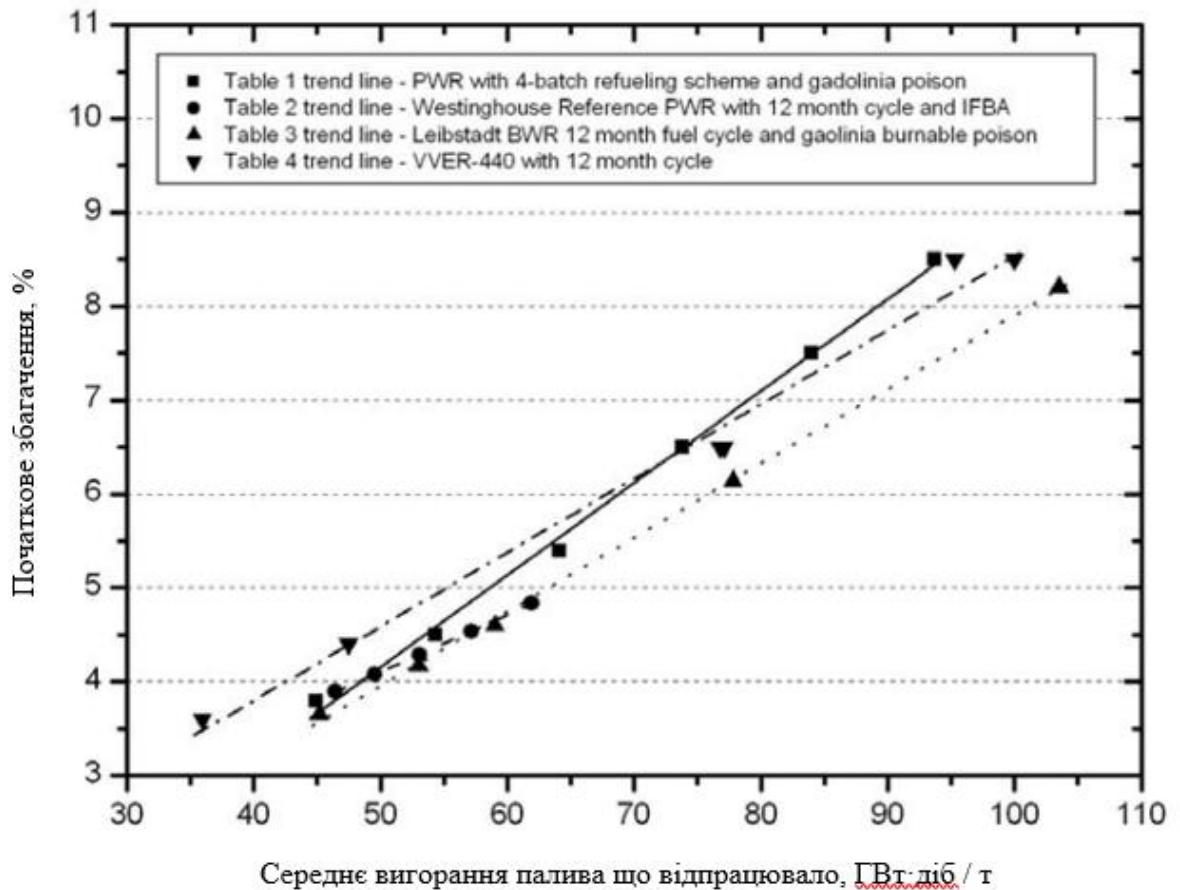


Рисунок 1. Початкове збагачення порівняно із середнім вигоранням палива що відпрацювало.

Для того, щоб реактор працював більш ефективно, необхідно постійно шукати шляхи модернізації. Адже необхідно, щоб підприємство працювало більш ефективно та продуктивніше. При гарантії безпеки звичайно ж.

МАГАТЕ поставила ліміт – “Виробляти не більш 5 % збагачення палива” (не враховуючи військові цілі при яких виробляють не більш 20 % збагачення палива). Тобто, для вироблення енергетичних реакторів ліміт вироблення ядерного палива сягає у 5 % бар’єрі. Ліміт виправдовує мету безпеки від організації. Але приведені нижче розділи доведуть, що підвищення ліміти збагачення палива не тільки ефективні і економічні, але і безпечніші.

2. Оцінка підвищення глибини вигорання за один рік

Подальший аналіз буде проведено на підставі даних [3-5] щодо трьох кампаній реактора ВВЕР-1000 третього блоку Південно-Української АЕС. Особливістю завантаження палива в цих кампаніях є те, що в АЗ одночасно знаходяться ТВЗ різного типу, принаймні трьох модифікацій - ТВЗ-М, ТВЗ-А, ТВЗ-В. ТВЗ також відрізняються початковим збагаченням ядерного палива, наявністю твєлів з гадолінієм (твєг). Крім того, ТВЗ деяких модифікацій складається з груп твєлів певної кількості з різним збагаченням

4,40 – 2,80 %. Для ТВЗ-W середнє початкове збагачення обраховано з урахуванням бланкетів, які виготовлено з природнього урану (збагачення 0,714 %).

Розрахункова тривалість трьох кампаній реактора, для яких приведені дані, майже однакова і в середньому становить 287 ефективних діб ($\pm 8,6$ еф. діб) роботи реактора на потужності без урахування можливої роботи на ефекті реактивності від зниження потужності (до 30 еф. діб).

Використовується паливний цикл що складається з чотирьох кампаній, тобто ядерне паливо знаходиться в АЗ приблизно чотири роки. Кількість ТВЗ що вивантажують з реактора після завершення кампанії та заміняють свіжими ТВЗ не є постійною для розглянутих кампаній (див. Табл. 1).

Таблиця 1 - Кількість ТВЗ останнього року використання (четвертий рік)

Номер кампанії	ТВЗ-М	ТВЗА	ТВЗ-W	всього
22	30	0	0	30
23	0	42	0	42
24	0	7	26	33

Глибина вигорання ядерного палива регламентує як стосовно твелів або твег, так і стосовно середнього значення вигорання по ТВЗ. Наприклад, для ТВЗ-W допустима глибина вигорання твелів і твег становить 62 МВт·діб./кг, а допустиме середнє вигорання по ТВЗ – 57 МВт·діб./кг. Допустима глибина вигорання визначається виробником ядерного палива приведена в Табл. 2.

ТВЗ наприкінці останнього року використання досягають максимальної глибини вигорання, яка не повинна перевищувати допустимого значення, що уникнути можливого пошкодження твелів в наслідку надмірно глибокого вигорання. Але водночас важливо яким є мінімальна глибина вигорання (див. Табл. 2) що визначає повноту використання палива що відпрацювало. Максимальне вигорання наприкінці кампанії останнього року використання ТВЗ в відсотках від допустимого вигорання становить приблизно 90 %, а мінімальне, відповідно – 70 %.

Таблиця 2 - Глибина вигорання ТВЗ останнього року використання, МВт·діб./кгU

Тип ТВЗ (кампанія) та вигорання	Допустиме вигорання	Вигорання наприкінці кампанії	Вигорання наприкінці кампанії відносно допустимого, %
ТВС-М (22)	49		
максимальне		49,160 ¹	100,3
мінімальне		42,527	86,8
середнє		46,440	94,8
ТВСА (23)	55		
максимальне		49,735	90,4
мінімальне		38,584	70,2
середнє		46,054	83,7
ТВСА (24)	55		
максимальне		50,764	92,3
мінімальне		38,104	69,3
середнє			
ТВС-W (24)	57		
максимальне		50,706	89,0
мінімальне		37,682	66,1
середнє			

¹ Вигорання лише однієї ТВЗ дещо перевищує допустиме значення.

Така розбіжність значень вигорання ТВЗ що вивантажуються з реактора вказує на те, що досягти однакової глибини вигорання для усіх ТВЗ наприкінці паливного циклу майже не можливо.

Можна зробити наступні висновки відносно вигорання ТВЗ що вивантажуються з реактора:

- ТВЗ з максимальним вигоранням мають запас біля 10 % до допустимого значення;
- ТВЗ з мінімальним вигоранням мають невикористаний резерв до 30 % від допустимого вигорання.

Таким чином з реактора вивантажують ТВЗ, в яких після чотирьох років роботи в активній зоні реактора залишається невикористаний резерв що дорівнює майже третині від допустимого вигорання.

3. Збільшення глибини вигорання за рахунок модифікації вигородки

Запропонований оригінальний спосіб підвищення глибини вигорання за рахунок модернізації вигородки та використання малих ТВЗ. На відміну від способів, які було розглянуто в розділі 1 запропонований спосіб не потребує підвищення збагачення. Модернізація вигородки спрямована на зменшення її площі та відповідному збільшенню об'єму активної зони.

Загалом, збільшити кількості ядерного палива, яке знаходиться в АЗ реактора, можливо завдяки зміні конструкції вигородки. За рахунок площі вигородки не можливо розмістити додаткові ТВЗ звичної шестигранної геометрії, бо товщина вигородки в будь-якому перерізі менша ніж габаритний розмір ТВЗ.

3.1 Геометрія активної зони

АЗ складається з 163 ТВЗ, які розташовані в внутрішньо корпусній шахті реактора і оточені вигородкою. Розташування ТВЗ є симетричним відносно центру і повторюється в межах сектору 30° . На Рис.1 представлено геометрію такого сектору АЗ. Координата центру кожної ТВЗ визначається номером рядка m та порядковим номером в цьому рядку n . Розміри ТВЗ – розмір під ключ H та габаритний розмір S пов'язані між собою співвідношенням $S = \frac{\sqrt{3}}{2} H$.

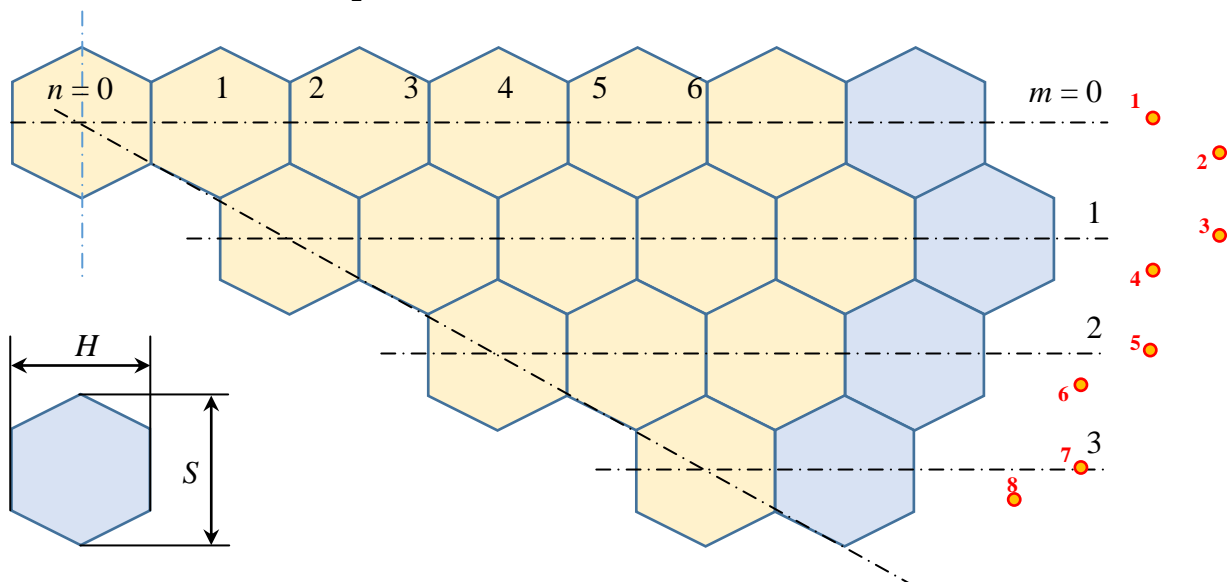


Рисунок 2 Геометрія розташування ТВЗ в активній зоні реактора в межах сектору 30° .

Координати x , y центру кожної ТВЗ відносно центру АЗ можна обрахувати на підставі комбінації m та n за допомогою загальних рівнянь:

$$x = (n + 1,5 m) H \quad (1)$$

$$y = 0,75 m S \quad (2)$$

Координати чотирьох периферійних ТВЗ, які на рис.1. позначені блакитним кольором, представлено в Табл.2.

Таблиця 2 – Координати периферійних ТВЗ які знаходяться в секторі 60°

Координат	Номер ТВЗ			
	1	2	3	4
x	$6 H$	$6,5 H$	$6 H$	$5,5 H$
y	0	$0,75 S$	$1,5 S$	$2,25 S$

3.2 Геометрія вигордки

Зовнішня ломана границя між периферійними ТВЗ та вигордкою утворена зовнішніми гранями ТВЗ. Вузлові точки цієї ломаної лінії відповідають координатам кутів шестигранників та пронумеровані (див. червоні цифри на Рис.1). Зміщення координат кутів відносно центру ТВЗ по x становить $\Delta x = \pm 0,5 H$ та по y відповідно $\Delta y = \pm 0,5 S$ або $\pm 0,25 S$. Координати восьми вузлових точок вздовж яких проходить ломана зовнішня границя АЗ приведено в Табл.3.

Фактичне значення координат вузлів обраховано на підставі значення розміру під ключ ТВЗ реактора ВВЕР-1000, яке становить $H = 235,1$ мм, з урахуванням міжкасетного зазору крок між ТВЗ 238 мм. Зовнішній діаметр вигордки становить 3485 мм.

Таблиця 3 – Координати вузлових точок зовнішньої границі АЗ

Координат	Номер вузлу							
	1	2	3	4	5	6	7	8
x	$6,5 H$	$7 H$	$7 H$	$6,5 H$	$6,5 H$	$6 H$	$6 H$	$5,5 H$
y	$0,25 S$	$0,5 S$	S	$1,25 S$	$1,75 S$	$2 S$	$2,5 S$	$2,75 S$

На підставі цих даних обраховано товщину вигордки в радіальному напрямку для вузлових точок (див. Табл.4). Мінімальна товщина вигордки становить 64 мм для вузлу номер 3.

Таблиця 4 – Геометричні характеристики вигордки (вузлові точки)

Координат	Номер вузлу							
	1	2	3	4	5	6	7	8
a , мм								
x	1547	1666	1666	1547	1547	1428	1428	1309
y	52	103	206	258	361	412	515	567
R	1548	1669	1679	1568	1588	1486	1518	1426
Товщина	195	73	64	174	154	256	224	316

Дані розрахунки підтверджують, що запропонована модифікація вигордки дозволяє збільшити кількість ТВЗ розташованих в АЗ реактора. За рахунок зменшення площі вигордки в реакторі розміщено додатково 18 малих ТВЗ ромбовидної форми, які по загальній площі еквівалентні 6 додатковим звичайним ТВЗ. Тобто кількість твелів в АЗ реактора зростає на 3,68 % порівняно з типовою конструкцією.

Вигордка служить для того, щоб захистити корпус реактора від потоку нейтронів. Цим вона ослаблює потік нейтронів, тобто опромінення корпуса зменшується за рахунок того, що вигордка поглинає частину нейтронів.

3.3 Модифікація конструкції вигордки

Розрахуємо скільки вийде об'єм активної зони, як результат модернізації вигордки

Визначаємо об'єм циліндра корпусу реактору. Тобто це множина пі на діаметр у квадраті на 4 з множиною цього дробу на висоту.

Об'єм активної зони збільшився на 3,68 %

Якщо об'єм активній зони збільшився, то пропорційно це можна збільшити паливо в активній зоні і при тих же нейтронно – фізичних характеристик можна отримати велику потужність реактора. Потік, якого дійде до корпусу буде послаблений за рахунок поглинання нейтронів вигородки внутрішньокорпусній шахти і розсіювання в опускном клапані заповненим теплоносієм.

Тобто, даний метод являється економічно вигідним.

3.4. Конструкція малої ТВЗ

Геометрія малої ТВЗ розробляється на підставі конструкції ТВЗ які вже використовуються, а саме ТВЗА та ТВЗW. Загальні характеристики типових ТВЗ приведені в Табл.1. З однієї великої ТВЗ потрібно сформувати три подібні малі ТВЗ і при цьому не повинно залишитися не використаних для них твелів. Кількість твелів в типовій ТВЗ становить 312 є кратна трьом, що дозволяє порівну їх поділити між трьома малими ТВЗ.

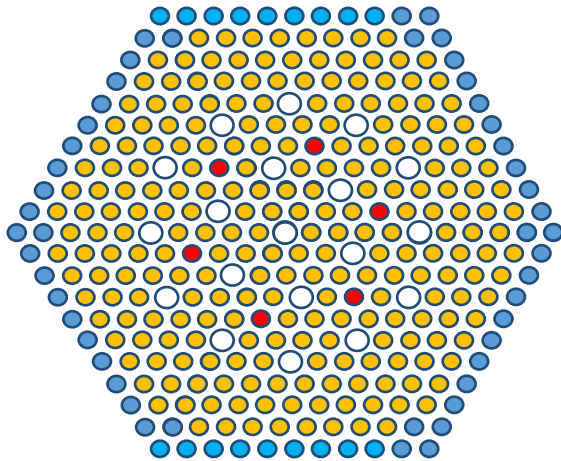


Рисунок 3 Перетин ТВСА 390GO і

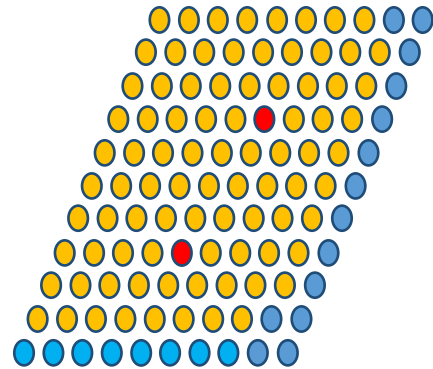


Рисунок 4 Перетин малої ТВЗ

4. Оцінка підвищення глибини вигорання периферійних ТВЗ за один рік

Подальший аналіз спрямований на те, щоб отримати оцінку того наскільки зростає глибина вигорання ТВЗ на останньому році знаходження палива в АЗ. На цей показник впливає радіус на якому розміщена ТВЗ та збагачення палива на початку кампанії. Розрахунки було проведено для трьох кампаній та результати представлено на Рис. 1-3.

Густина потоку нейтронів має радіальний розподілену з максимумом в центрі АЗ і знижується на периферії АЗ. Вигорання палива з однаковим, або близьким збагаченням залежить від густини потоку і отже від радіусу на якому розташована ТВЗ в АЗ. Для кожної ТВЗ було розраховано радіус на підставі координат ТВЗ – ряд та колонка. Радіус ТВЗ приймає дискретний ряд значень. Наприклад на Рис.1 показано, що усі ТВЗ четвертого року знаходяться на трьох радіусах. Однак зростання вигорання для ТВЗ на однаковому радіусі дещо відрізняються.

Для порівняння на рис. 5 приведено дані для ТВЗ-W першого року використання, які розміщено на периферії АЗ. Завдяки високому збагаченню свіжого палива зростання вигорання за рік для них майже в півтори раз більше в порівнянні ТВЗ четвертого року розміщених на близьких радіусах.

Реконструкція вигородки передбачає, що малі ТВЗ будуть розміщені на периферії АЗ і радіуси їх розміщення становлять 1567 та 1585 мм. Ці радіуси позначено на Рис. 5 двома зеленими пунктирними лініями.

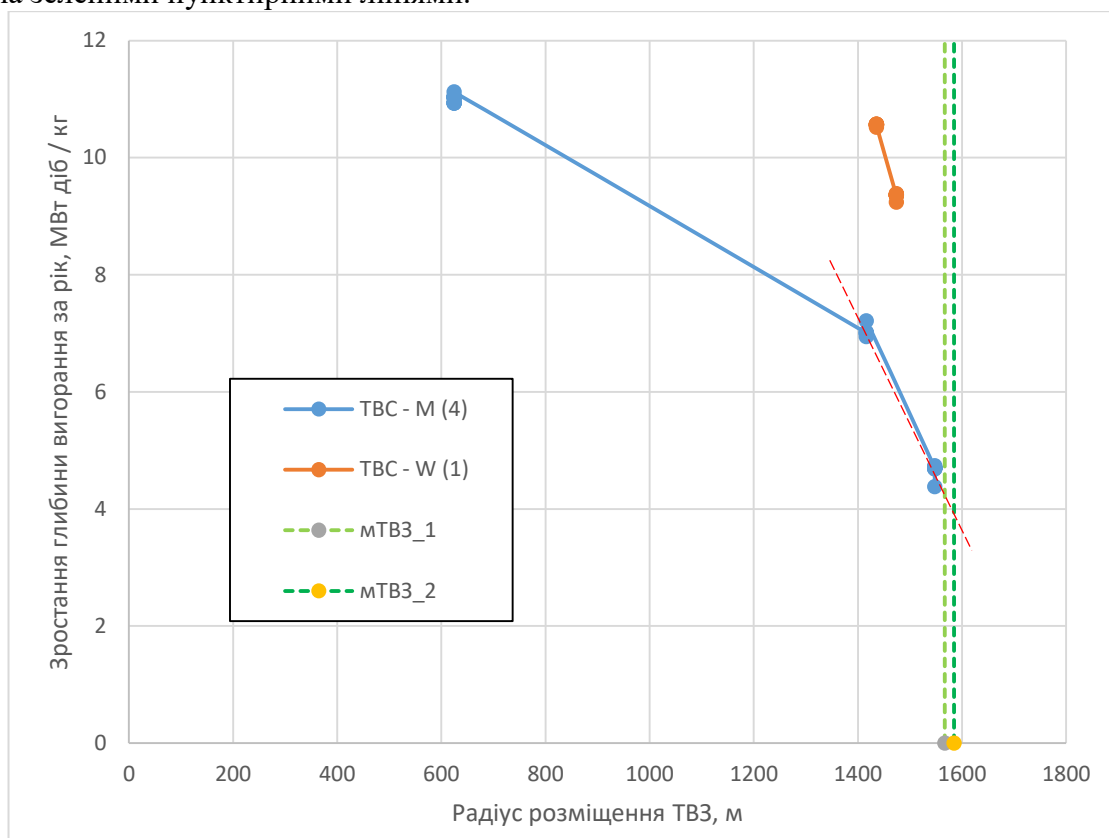


Рисунок 5 Радіальний розподіл зростання глибини вигорання протягом 22 кампаній

Оцінку того на скільки зросте вигорання малих ТВЗ протягом року отримали шляхом лінійної екстраполяції.

Таблиця 5 – Середнє зростання вигорання малих ТВЗ за рік

Кампанія	Тип ТВЗ	Зростання вигорання, МВт·діб / кг
22	ТВЗ-М	4,0
23	ТВЗ-А	4,0
24	ТВЗ-В	3,77

Дані представлені в Табл. 5 дозволяють розрахувати підвищення середнього вигорання за рахунок використання малих ТВЗ протягом п'ятого року. Але перед тим треба відібрати з ТВЗ що вивантажують наприкінці четвертого року використання шість ТВЗ з яких буде укладено 18 малих ТВЗ. Звісно що це повинні буди ТВЗ з най більшим кредитом вигорання серед партії ТВЗ що вивантажують.

Для оцінки наближення до максимальної припустимої глибини вигорання пропонується використовувати показник – кредит вигорання. Чим більше глибина вигорання палива що вивантажується (кінцеве вигорання a_k) до максимальної припустимої величини $a_{дон}$, ти менше залишок невикористаного вигорання, тобто кредит вигорання.

$$\text{Кредит вигорання} = \frac{a_{дон} - a_k}{a_{дон}} \cdot 100 \%$$

4.2. Підвищення середньої глибини вигорання палива

Підвищення глибини вигорання для трьох кампаній

Номер кампанії	Середня глибина вигорання до модернізації	Середня глибина вигорання після модернізації	Збільшення глибини вигорання, МВт*діб/кг	Відносне збільшення глибини вигорання
22	46,440	47,240	0,800	1,72%
23	46,053	46,625	0,571	1,24%
24	42,67418	43,35964	0,685	2%

Проведені розрахунки для трьох кампаній свідчать про те, що застосування запропонованого методу дозволяє підвищити середню глибину вигорання від 0,571 до 0,800. В середньому воно дорівнює значенню 0,6853

Висновки

Проведено аналіз тенденцій підвищення глибини вигорання та шляхів його забезпечення. Запропоновано оригінальний спосіб підвищення глибини вигорання, який не потребує підвищення збагачення палива. Запропоновано модернізувати вигородку реактора та застосувати малі ТВЗ. Основними результатами проведеного дослідження є наступне :

- Запропонована модифікація вигородки дозволяє збільшити кількість ТВЗ розташованих в АЗ реактора. За рахунок зменшення площі вигородки в реакторі розміщено додатково 18 малих ТВЗ ромбовидної форми, які по загальній площі еквівалентні 6 додатковим
- Використання 6 ТВЗ відпрацьованого палива для вироблення малих ТВЗ та застосування їх протягом п'ятого року дозволяє підвищити середню глибину вигорання на 0,685

Література

1. Very High Burn-ups in Light Water Reactors. NEA No. 6224. OECD 2006. – р. 58.
2. Эксплуатационные режимы водо – водяных энергетических реакторов, способы увеличения глубины ядерного топлива и длительности кампании реактора. 2008 – 2020 Электрические сети. - 41 с.
3. Альбом нейтронно-физических характеристик 22-ой топливной загрузки реактора энергоблока №3. ОЯБ Південно-Української АЕС. – 2011.
4. Альбом нейтронно-физических характеристик 23-й топливной загрузки реактора энергоблока №3 ОЯБ Південно-Української АЕС. – 2012.
5. Альбом нейтронно-физических характеристик 24-й топливной загрузки реактора энергоблока №3 ОЯБ Південно-Української АЕС. – 2013.
6. Ядерний реактор ВВЕР-1000. Учебный посібник. 00.УЦ,РЦ,Пс.259 - УТЦ ЗАЕС.
7. Проект углубленного анализа безопасности энергоблока №5 Запорожской АЭС. База данных по ядерной паропроизводящей установке. 2002 1 D L 1 1 R-DBA. – 2001.

Колиханов Віктор Миколайович,
Колиханов Виктор Николаевич,
Kolikhanov Victor,
Муромський Євгеній Олександрович,
Муромский Евгений Александрович,
Muromsky Eugene.