

П. М. Ворона, В. Ф. Разбудей

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

ВИЗНАЧЕННЯ ЖОРСТКОСТІ СПЕКТРА ЯК ПАРАМЕТРА НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ В ДОСЛІДНИЦЬКОМУ РЕАКТОРІ ВВР-М

Запропоновано розрахунковий метод визначення жорсткості спектрів нейтронів у реакторі на теплових нейтронах. Адекватність одержуваних розрахункових даних реальним величинам жорсткості спектрів підтверджено їхнім порівнянням з експериментальними даними, які було визначено з виміряних кадмієвих відношень у дослідницькому реакторі ВВР-М.

Ключові слова: дослідницький реактор, спектр нейтронів, потоки нейтронів, жорсткість спектра.

Вступ

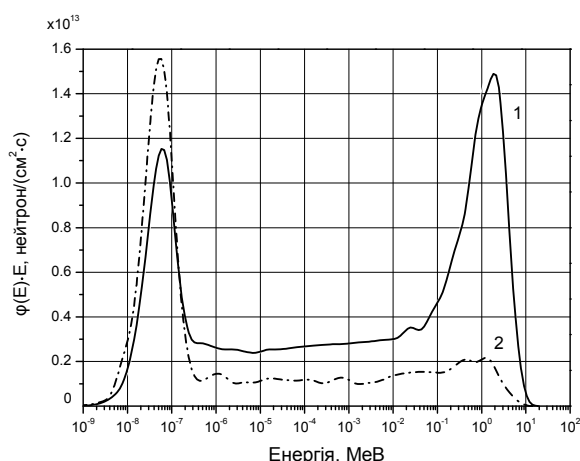
На дослідницькому реакторі ВВР-М Інституту ядерних досліджень НАН України проводиться широкий комплекс наукових досліджень та прикладних робіт із використанням нейтронів [1]. Для забезпечення потреб різнопланових експериментів необхідні нейтронні поля з різним спектральним складом. При виборі необхідних умов опромінення для загальної характеристики нейтронних спектрів у реакторах на теплових нейтронах використовується параметр, що характеризує відношення щільності потоку нейтронів резонансної і теплової частин спектра (жорсткість спектра) [2]. Експериментально жорсткість спектра може бути визначена з величини кадмієвого відношення в конкретних нейтронних полях. У даній роботі запропоновано альтернативний варіант розрахункового визначення величини жорсткості спектра нейтронів у реакторі з використанням для цього комп'ютерного коду MCNP-4C.

Розрахунки потоків та жорсткості спектрів нейтронів у реакторі

Спектри нейтронів, як відомо, навіть у реакторах на теплових нейтронах не є чисто тепловими. Вихідним (базовим) спектром у реакторі є спектр поділу ядер ^{235}U . У результаті подальшої трансформації вихідного спектра (уповільнення нейтронів) за рахунок взаємодії нейтронів із конструкційними матеріалами активної зони реактора (зокрема, з водою уповільнювача-теплоносія та берилієм відбивача) і технологічних конструкцій для опромінення мішеней спектри у реакторі охоплюють інтервал енергій нейтронів від 20 до 10^{-10} MeV. На реакторі ВВР-М реалізується технічна можливість створення всередині реактора виокремлених об'ємів, в яких формуються нейтронні поля з різним спектральним складом (з переважанням теплових, резонансних або швид-

ких нейтронів). Такі об'єми у вигляді вертикальних експериментальних каналів (ВЕК) або спеціальних опромінювальних касет (ОК) розміщуються в різних спектроформуючих середовищах усередині реактора: у берилієвому (Ве) відбивачі, а також безпосередньо в активній зоні (АКЗ) на місці вийнятих тепловиділяючих збірок (ТВЗ) [3]. Це дає змогу вибирати опромінювальні об'єми залежно від потреб конкретного експерименту.

Розрахункові величини жорсткості спектра в реакторі визначались із співвідношення $\gamma = \omega/\phi$, де ϕ – щільність потоку теплових нейтронів; ω – щільність потоку резонансних нейтронів в одиничному інтервалі летаргії. Потоки нейтронів, необхідні для цього, визначались із спектрів, розрахованих із використанням комп'ютерного коду MCNP-4C. Процедура розрахунків та детальні дані по спектрах нейтронів у різних середовищах та технологічних пристроях для роботи з нейтронами наведено в [4]. Для прикладу на рисунку показано розраховані спектри для двох середовищ у реакторі: в АКЗ реактора та Ве-відбивачі.



Спектри нейтронів у різних середовищах реактора (усереднено по об'ємах відповідних середовищ): 1 – спектр в АКЗ реактора; 2 – спектр в Ве-відбивачі.

© П. М. Ворона, В. Ф. Разбудей, 2012

Як видно, горизонтальна лінія на графіку (область резонансних нейтронів) між піками теплових (пік зліва) та швидких (пік справа) нейтронів для спектра в АКЗ реактора розташована суттєво вище, ніж для спектра в Ве-відбивачі.

Для кількісної оцінки $\gamma = \omega/\phi$ із розрахованих спектрів для величини ϕ взято ділянку спектра в інтервалі енергій нейтронів від 10^{-4} до 0,562 еВ, а для ω – від 0,562 еВ до 10 кеВ. Одержані результати аналізу спектрів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Розрахункові середні параметри нейтронного поля у ВЕК дослідницького реактора ВВР-М

Параметр нейтронного поля	Місце розташування та характеристики ВЕК реактора			
	Ве-відбивач		АКЗ	
	ВЕК – мокрий	ВЕК – сухий	ВЕК – мокрий	ВЕК – сухий
ω , нейтрон/(см ² · с) · од. летаргії	$7,37 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{12}$	$4,18 \cdot 10^{12}$	$4,05 \cdot 10^{12}$
ϕ , нейтрон/(см ² · с)	$3,85 \cdot 10^{13}$	$3,31 \cdot 10^{13}$	$7,40 \cdot 10^{13}$	$3,85 \cdot 10^{13}$
$\gamma = \omega/\phi$	0,020	0,033	0,057	0,11

Наведені в таблиці розраховані величини жорсткості спектра γ досить адекватно відображають загальну закономірність для спектрів у реакторах на теплових нейтронах. Як видно, значення γ , близьке до нуля, відповідає спектру у відбивачі нейтронів, а його збільшення – спектру в активній зоні реактора.

Експериментальні дослідження жорсткості спектрів нейтронів у реакторі

Як критерій адекватності розрахованих величин жорсткості спектра реальним величинам використано їхнє порівняння з експериментальними значеннями γ , одержаними з вимірювань кадмієвого відношення (R_{Cd}) у різних каналах реактора за допомогою активаційних детекторів (АКД). Величина R_{Cd} згідно з визначенням (відношення активності чистого активаційного детектора до активності детектора, опроміненого в кадмієвому екрані) описується співвідношенням

$$R_{Cd} = (\sigma_{\gamma}^0 + \gamma \cdot I) / \gamma \cdot I = (\sigma_{\gamma}^0 / \gamma \cdot I) + 1,$$

де σ – переріз при енергії $E = 0,025$ еВ; I – резонансні інтеграли від $E = 0,5$ еВ.

Звідси величина жорсткості спектра буде

$$\gamma = \sigma_{\gamma}^0 / I \cdot (R_{Cd} - 1).$$

Було проведено експериментальні дослідження параметрів нейтронного поля активаційним методом у різних спектроформуючих середовищах усередині реактора. В якості АКД використовувались тонкі фольги золота та міді. Фольги золота мали такі розміри: товщина 7 мкм, діаметр 6 мм; фольги міді – товщина 20 мкм, діаметр 5 мм. Кадмієвий екран мав товщину 0,34 мм. Для активації фольг вибиралось місце з максимальною величиною нейтронного потоку. З цією метою було проведено попередні дослідження розподілу нейтронних потоків по висоті АКЗ реактора за допомогою активації фольг міді (всього 21 фольга). Фольги для опромінення закріплювались з інтервалом 30 мм на штанзі із алюмінієвого сплаву САВ-1Т, що слабо активується. Активация здійснювалась при потужності реактора 20 кВт протягом 30 хв. Розподіл наведеної активності (по висоті) показав, що максимум нейтронного потоку знаходиться на відстані 180 - 230 мм від низу АКЗ.

Таблиця 2. Експериментальні дані досліджень жорсткості нейтронних спектрів у дослідницькому реакторі ВВР-М

Середовище та місце вимірювання в реакторі	Характеристики нейтронного поля		
	Кадмієве відношення при різних АКД		Жорсткість спектра
	Au	Cu	
АКЗ реактора:			
комірка 80/32	-	5	0,21
Ве-відбивач:			
ВЕК- 46/60	3,3	40	0,03
Графіт теплової колони:			
ВЕК-ТК-1	3,5	32	0,0265
ВЕК-ТК-2	7,25	80	0,0105
ВЕК-ТК-3	46,3	585	0,0014

Результати експериментальних вимірювань кадмієвих відношень та одержаних з них величин жорсткості нейтронних спектрів наведено в табл. 2.

Висновки

1. Запропонований метод розрахунку жорсткості спектра нейтронів у реакторі дає результати, адекватні реальним величинам, одержуваним з експериментальних вимірювань.

2. Розрахунковий метод дає змогу на стадії попередньої підготовки експерименту в активній зоні змодельовати його в цілому і вибрати оптимальні умови проведення (жорсткість спектра, потоки нейтронів та час опромінення).

3. Розрахунковий метод є менш трудомістким, що дає змогу оперативної й завчасно (навіть при зупиненому реакторі) відслідковувати заплановані перегрузки активної зони та їхній вплив на локальні умови для конкретного експерименту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *40 років* нейтронних досліджень на реакторі ВВР-М: Матеріали наук. конф. НЦ «ІЯД» НАН України. - К., 2000. - 57 с.
2. *Галанин А.Д.* Введение в теорию атомных реакторов на тепловых нейтронах. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 655 с.
3. *Ворона П.М., Разбудей В.Ф.* Розрахункові дослідження та аналіз характеристик дослідницького реактора ВВР-М як джерела нейтронів для вирішення наукових та прикладних задач // Ядерна фізика та енергетика. - 2010. - Т. 11, № 1. - С. 57 - 65.
4. *Ворона П.М., Разбудей В.Ф.* Вплив енергії нейтронів на утворення радіоізотопів при опроміненні мішеней у реакторі // Там же. - 2011. - Т. 12, № 3. - С. 235 - 241.

П. Н. Ворона, В. Ф. Разбудей

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ СПЕКТРА КАК ПАРАМЕТРА НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ ВВР-М

Предложен расчетный метод определения жесткости спектров нейтронов в реакторе на тепловых нейтронах. Адекватность расчетных данных реальным величинам подтверждена их сравнением с экспериментальными данными, которые были определены из измеренных кадмиевых отношений в исследовательском реакторе ВВР-М.

Ключевые слова: исследовательский реактор, спектр нейтронов, потоки нейтронов, жесткость спектра.

P. M. Vorona, V. F. Razbudey

DETERMINATION OF SPECTRUM HARDNESS AS A PARAMETER OF NEUTRON FIELD AT WWR-M RESEARCH REACTOR

New method for determination of spectrum hardness in thermal neutron reactors is proposed. Adequacy of received data to the real values of spectrum hardness had been confirmed by comparison with experimental data which were determined from cadmium relation measured at WWR-M research reactor.

Keywords: research reactor, spectrum of neutrons, fluxes of neutrons, hardness of spectrum.

Надійшла 06.11.2012

Received 06.11.2012