

УДК 621.039.53

СРАВНЕНИЕ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ ВВР-К С ВЫСОКООБОГАЩЕННЫМ И НИЗКООБОГАЩЕННЫМ ТОПЛИВОМ

Колточник С.Н., Сайранбаев Д.С., Чекушина Л.В., Гизатулин Ш.Х., Шаймерденов А.А.

РГП «Институт ядерной физики» Министерства энергетики РК, Алматы, Казахстан

ВВР-К – это исследовательский легководный гетерогенный реактор бакового типа. Эксплуатация реактора начата в 1967 году с обогащением 36 % по урану-235. В 2016 году осуществлен перевод реактора на низкообогащенное топливо (19,7 % по урану-235) с использованием ТВС типа ВВР-КН. Для эксплуатации реактора выбрана компактная конфигурация активной зоны, в которой, по мере выгорания топлива, боковой водяной отражатель нейтронов постепенно заменяется на бериллиевый. Кроме того, в новой активной зоне увеличено количество рабочих органов системы управления и защиты реактора.

Результаты измерения, плотности потока тепловых нейтронов в центре активной зоны, проведенные во время физического пуска, показали, что она удвоилась, достигнув значения $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Таким образом, с точки зрения экспериментальных возможностей, реактор после его конверсии стал более привлекательным.

Как известно, при делении урана образуются нейтроны с энергией в соответствии со спектром Уатта, т.е., пик приходится на нейтроны с энергией 0,7 МэВ, а средняя энергия нейтронов составляет 2 МэВ. В связи с увеличением содержания урана-238 в новой конструкции ТВС с низкообогащенным топливом, спектр нейтронов становится «жестче».

В настоящей работе с применением компьютерного кода MCNP рассчитаны спектры нейтронов в облучательных каналах активной зоны и проведено сравнение спектров нейтронов в активной зоне реактора ВВР-К с высокообогащенным и низкообогащенным урановым топливом.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства образования и науки Республики Казахстан № BR05236400.

ВВЕДЕНИЕ

Стационарная активная зона реактора ВВР-К с высокообогащенным урановым (ВОУ) топливом состояла из 77 ТВС с суммарной массой урана-235 ~9,1 кг.

В рамках поддержки программы нераспространения ядерного оружия и минимизации использования высокообогащенного урана, в 2016 году реактор был переведен на топливо пониженного обогащения [1]. Стационарная активная зона реактора ВВР-К с низкообогащенным урановым (НОУ) топливом содержит 28 ТВС с суммарной массой урана-235 ~6,2 кг. Во избежание снижения нейтронно-физических характеристик из-за уменьшения обогащения урана-235 в топливе, существенно увеличена плотность урана-235 в ТВС ВВР-КН. Благодаря компактности новой зоны, появилась возможность установить боковой бериллиевый отражатель, обеспечивающий снижение утечки нейтронов с периферии. Также в центре активной зоны с НОУ топливом расположены три облучательных канала с одинаковыми нейтронно-физическими условиями.

В настоящее время реактор ВВР-К применяется для широкого круга как научных, так и коммерческих работ, для которых, как правило, требуются облучательные каналы с максимальной плотностью потока нейтронов, а это будет приводить к максимальной скорости набора повреждающей дозы и необходимой наработке радиоизотопов за меньшее время облучения. Для правильных оценок повреждающих

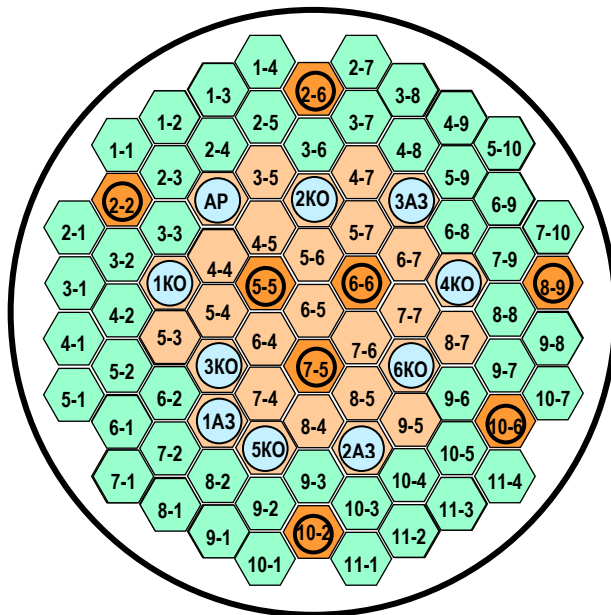
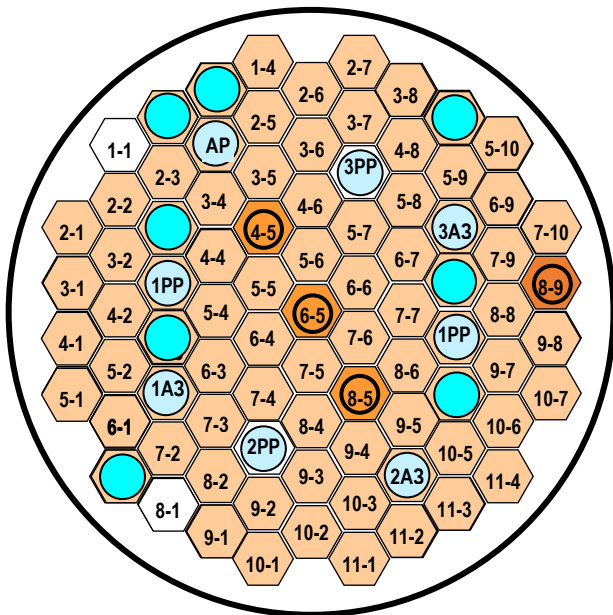
доз, времени облучения мишеней и др., важно знать пространственно-энергетическое распределение нейтронов в реакторе. В настоящей работе приводятся результаты расчетов методом Монте-Карло по определению пространственно-энергетического распределения нейтронов в активной зоне реактора ВВР-К с ВОУ и НОУ топливом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований является активная зона реактора ВВР-К с ВОУ и НОУ топливом. ВОУ топливо использовалось в реакторе ВВР-К до августа 2015 года. Активная зона с ВОУ топливом содержала 77 ТВС ВВР-Ц и водяной отражатель нейтронов [2]. Массовая доля урана-235 в ТВС составляла 56 %. Конфигурация активной зоны с ВОУ топливом показана на рисунке 1.

С 2016 года началась регулярная эксплуатация реактора ВВР-К с НОУ топливом. Компактная активная зона с НОУ топливом содержит 28 ТВС ВВР-КН и бериллиевый отражатель нейтронов. Массовая доля урана-235 в ТВС с НОУ топливом составляет 25 %. Конфигурация активной зоны с НОУ топливом показана на рисунке 2. Основные параметры ТВС ВВР-Ц и ВВР-КН приведены в таблице 1.

Расчеты спектров нейтронов проведены с применением компьютерного кода MCNP [3, 4] и использованием библиотеки сечений взаимодействия нейтронов с веществом ENDF/B-VII [5].



- ТВС 2-го типа с РО СУЗ
- ТВС 1-го типа
- Облучательный канал
- Бериллиевый блок
- РО СУЗ
- ТВС 2-го типа с центральной бериллиевой вставкой

Рисунок 1. Конфигурация активной зоны реактора ВВР-К с ВОУ топливом

Рисунок 2. Конфигурация активной зоны реактора ВВР-К с НОУ топливом

Таблица 1. Основные параметры ТВС исследовательского реактора ВВР-К

| Параметр | ТВС ВВР-Ц | ТВС ВВР-КН |
|---|---------------------|---------------------|
| Топливная композиция | UO ₂ +Al | UO ₂ +Al |
| Плотность урана, г/см ³ | 1,3 | 2,8 |
| Масса изотопа урана-235, г (средние значения) | | |
| 1-го типа | 110 | 245 |
| 2-го типа | 84 | 199 |
| Длина ТВС, мм | 815 | 880 |
| Высота активной части, мм | 600 | 610 |
| Толщина твэла, мм | 2,3 | 1,6 |
| Толщина топливного сердечника, мм | 0,9 | 0,7 |
| Толщина оболочки, мм | 0,7 | 0,45 |
| Количество твэлов | | |
| 1-го типа | 5 | 8 |
| 2-го типа | 3 | 5 |

Код предназначен для решения задач в области физики ядерных реакторов, радиационной защиты, дозиметрии, радиографии, радиационной медицины и ядерной безопасности. Код MCNP применяется для моделирования процессов взаимодействия нейтронов с веществом с использованием метода Монте-Карло. Пользователь имеет возможность моделиро-

вать геометрические трехмерные конфигурации, задавая математические уравнения ограничивающих их поверхностей первой, второй и четвертой степени, и их заполнение произвольным материалом, задавая концентрации ядер элементов, входящих в состав вещества.

Многолетний опыт расчетного сопровождения работ на реакторе ВВР-К показал хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными. Созданная расчетная модель активной зоны реактора ВВР-К верифицирована по многочисленным экспериментам, проведенным как на реакторе, так и на критическом стенде.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты проведены для центра и периферии активной зоны реактора ВВР-К. Результаты показаны на рисунках 3 и 4. Статистическая погрешность расчетов не превышает 5 %.

Как видно из рисунка 3, в центре активной зоны с НОУ топливом плотность потока нейтронов стала выше. На периферии активной зоны с НОУ топливом нейтроны термализуются при взаимодействии с бериллием, поэтому в этой области активной зоны спектр «мягче», по сравнению с ВОУ топливом.

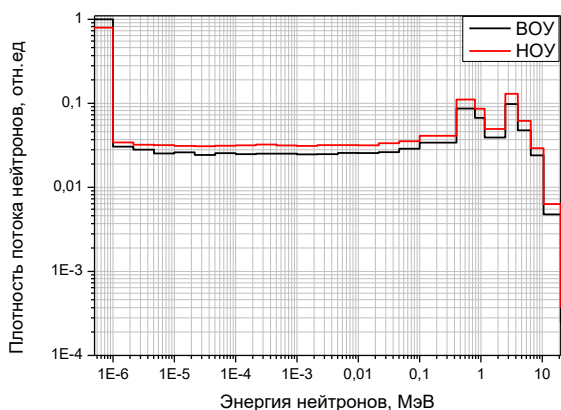


Рисунок 3. Спектр нейтронов в центре активной зоны с BOU и НОУ топливом

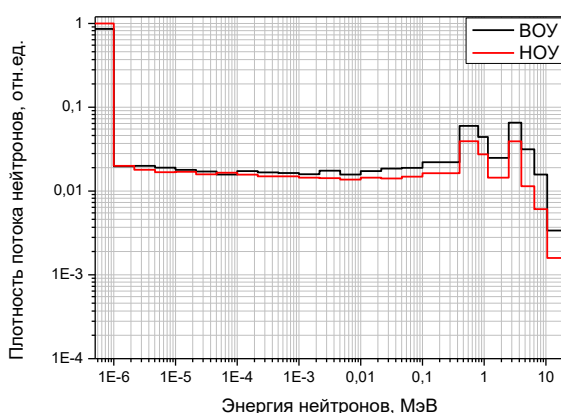


Рисунок 4. Спектр нейтронов на периферии активной зоны с BOU и НОУ топливом

В таблице 2 приведены абсолютные значения плотности потока нейтронов в активной зоне реактора ВВР-К с BOU и НОУ топливом. Таблица 2 также

ЛИТЕРАТУРА

1. Аринкин Ф.М., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Дюсамбаев Д.С., Колточник С.Н., Чақров П.В., Чекушина Л.В. Конверсия активной зоны исследовательского реактора ВВР-К. – Атомная энергия, 2017, т. 123, № 1 – с. 15–20.
2. Возобновление эксплуатации реактора ВВР-К. Сборник статей. Алматы, ИАЭ НЯЦ РК, 1998 – 248 с.
3. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. - Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987, 2008.
4. MCNP6 User’s Manual - Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, 2013
5. M.B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský, M.E. Dunn, Y. Danon, A.C. Kahler, D.L. Smith, B. Pritychenko, G. Arbanas, R. Arcilla, R. Brewer, D.A. Brown, R. Capote, A.D. Carlson, Y.S. Cho, H. Derrien, K. Guber, G.M. Hale, S. Hoblit, S. Holloway, T.D. Johnson, T. Kawano, B.C. Kiedrowski, H. Kim, S. Kunieda, N.M. Larson, L. Leal, J.P. Lestone, R.C. Little, E.A. McCutchan, R.E. MacFarlane, M. MacInnes, C.M. Mattoon, R.D. McKnight, S.F. Mughabghab, G.P.A. Nobre, G. Palmiotti, A. Palumbo, M.T. Pigni, V.G. Pronyaev, R.O. Sayer, A.A. Sonzogni, N.C. Summers, P. Talou, I.J. Thompson, A. Trkov, R.L. Vogt, S.C. van der Marck, A. Wallner, M.C. White, D. Wiarda, P.G. Young, "ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data", Nucl. Data Sheets 112(2011)2887.

демонстрирует количественное различие плотности потока нейтронов активной зоны реактора ВВР-К с BOU и НОУ топливом. В последнем столбце «BOU/НОУ» таблицы 2 приведены значения доли тепловых нейтронов в суммарном спектре.

Таблица 2. Плотность потока нейтронов в активной зоне реактора ВВР-К (см⁻²с⁻¹)

| Расположение | ΔE | BOU | НОУ |
|--------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Центр | <0,625 эВ | 1,4·10 ¹⁴ | 1,9·10 ¹⁴ |
| | 0,625 эВ – 0,1 МэВ | 5,7·10 ¹³ | 9,2·10 ¹³ |
| | (0,1–1,15) МэВ | 2,8·10 ¹³ | 4,2·10 ¹³ |
| | (1,15–20) МэВ | 3,1·10 ¹³ | 3,8·10 ¹³ |
| | K _r | 0,56 | 0,44 |
| Периферия | <0,625 эВ | 5,6·10 ¹³ | 8,9·10 ¹³ |
| | 0,625 эВ – 0,1 МэВ | 1,7·10 ¹³ | 1,9·10 ¹³ |
| | (0,1–1,15) МэВ | 8,3·10 ¹² | 6,0·10 ¹² |
| | (1,15–20) МэВ | 9,3·10 ¹² | 4,0·10 ¹² |
| | K _r | 0,72 | 0,62 |

Выводы

Результаты сравнительных расчетов с применением компьютерного кода MCNP показали на различие в пространственно-энергетическом распределении нейтронов (от 0 до 20 МэВ) в реакторе ВВР-К при разном обогащении по урану-235. Спектр нейтронов в активной зоне с НОУ топливом в центре стал «жестче», а на периферии – «мягче». Использование бериллиевого отражателя в активной зоне с НОУ топливом позволило не только уменьшить утечку нейтронов с периферии и тем самым немного увеличить плотность потока нейтронов, но и термализировать спектр нейтронов в периферийных облучательных каналах. Это еще раз доказывает, что бериллий не только эффективный отражатель нейтронов, но и эффективный замедлитель нейтронов.

ЖОҒАРЫ БАЙЫТЫЛҒАН ЖӘНЕ ТӨМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ОТЫНДЫ ССР-Қ РЕАКТОРЫНДА НЕЙТРОНДАР СПЕКТРІН САЛЫСТЫРУ

Колточник С.Н., Сайранбаев Д.С., Чекушина Л.В., Гизатулин Ш.Х., Шаймерденов А.А.

ҚР Энергетика министрлігінің «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

ССР-Қ – бұл жеңіл сулы, бак түріндегі гетерогенді, зерттеу реакторы. 1967 жылы уран-235 изотопы бойынша 36 % байытылған реактор өз жұмысын бастады. 2016 жылы ССР-ҚН типіндегі ЖБЖ пайдалана отырып, реакторды төмен байытылған отынға (уран-235 бойынша 19,7 %) көшіру жүзеге асырылады. Реакторды пайдалану үшін активті аймақтың шағын конфигурациясы таңдалып алынған, онда отынның жануына қарай нейтрондардың бүйірлік сулы шағылдырғышы біртіндеп бериллийлік шағылдырғышқа ауыстырылады. Бұдан басқа, жаңа активті аймақта реактордың басқару және қорғау жүйесінің жұмыс құралдарының саны артты.

Физикалық іске қосу кезінде активті аймақтың орталығында жүргізілген, жылулық нейтрондар ағынының тығыздығын өлшеу нәтижелері, оның $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ дейін ұлғайғанын көрсетті. Осылайша, эксперименттік мүмкіндіктер тұрғысынан қарағанда, конверсиядан кейін реакторға деген қызығушылық артты.

Уранның бөлінуі кезінде энергиясы Уатта спектріне сай нейтрондар пайда болатыны белгілі, яғни ең жоғарысы нейтрондар 0,7 МэВ энергиялы болады және нейтрондардың орташа энергиясы 2 МэВ құрайды. Төмен байытылған отынды ЖБЖ жаңа конструкциясында уран-238 мөлшерінің арттыруына қарай нейтрондардың спектрі «тым қатты» болады.

Осы жұмыста MCNP компьютерлік кодын қолдана отырып, активті аймақтың сәулеленуші арналарында нейтрондар спектрі есептелген, сондай-ақ жоғары байытылған және төмен байытылған уран отынды ССР-Қ реакторы активті аймағының нейтрондары спектрлеріне салыстыру жүргізілді.

Жұмыс Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің № BR05236400 бағдарламасының қаржылық қолдауы барысында орындалды.

COMPARISON OF NEUTRON SPECTRUM IN THE WWR-K REACTOR WITH LEU FUEL AGAINST HEU ONE

S.N. Koltchnik, D.S. Sairanbayev, L.V. Chekushina, Sh.Kh. Gizatulin, A.A. Shaimerdenov

RSE “Institute of Nuclear Physics” under the Ministry of Energy of the RK, Almaty, Kazakhstan

WWR-K is the research tank-type light-water heterogeneous reactor. Reactor operation started in 1967 with enrichment 36 % in uranium-235. In 2016 reactor conversion to low-enriched uranium fuel (19.7 % in uranium-235) was implemented with the VVR-KN-type fuel assemblies (FA). In view of reactor operation, compact configuration of the core was chosen, where, following fuel burning up, side water reflector is gradually changed by beryllium one. Besides, an amount of work elements of the reactor control and protection system is increased in the new reactor core.

Following results of measurement of the thermal neutron flux density, carried out in the core center in course of reactor physical startup, it has increased up to $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Thus, in terms of experimental capacities, reactor has gained after conversion in attractiveness.

As is known, uranium fission is accompanied by generation of neutrons, which energies obey the Watt’s spectrum, that is, the spectrum peak is associated with the neutrons having the energy 0.7 MeV, whereas the neutron average energy comprises 2 MeV. Due to an enhanced amount of uranium-238 in the new low-enriched uranium fuel FA, neutron spectrum is making «harder».

In the presented paper, neutron spectra in the core irradiation channels of re calculated by means of the computer code MCNP, and comparison of neutron spectra in the WWR-K reactor core with high-enriched uranium fuel against low-enriched fuel is conducted.

The work is implemented under financial support of the Republic of Kazakhstan Ministry of Education and Science program # BR05236400.