УДК 621.039.53

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ИР ВВР-К С НИЗКООБОГАЩЕННЫМ ТОПЛИВОМ ПРИ ПОСТЕПЕННОЙ ЗАМЕНЕ ВОДЯНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ НА БЕРИЛЛИЕВЫЙ

Сайранбаев Д.С., Колточник С.Н., Шаймерденов А.А., Накипов Д.А., Кенжин Е.А.

Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан

В 2015 году в рамках перевода реактора ВВР-К на топливо пониженного обогащения проведена модернизация основных систем реактора, включая полную замену СУЗ. Новая конфигурация активной зоны реактора стала компактной и более энергонапряженной; изменился характер выгорания топлива. Увеличилось количество рабочих органов СУЗ, изменились и их геометрические параметры.

Согласно концепции конверсии реактора BBP-К, в течение первого года эксплуатации будет производиться постепенная замена водяного отражателя на бериллиевый, что сопряжено с изменением нейтронно-физических характеристик реактора. Настоящая работа посвящена определению кинетических параметров реактора BBP-К, связанных с формированием бериллиевого отражателя. Для корректного вычисления реактивности новой аппаратурой СУЗ необходимо вводить в систему значения кинетических параметров активной зоны, такие как доли запаздывающих нейтронов и постоянные распада для шести групп. Определению значений этих параметров и динамике их изменения в ходе эксплуатации реактора посвящена настоящая работа.

Введение

Исследовательский реактор BBP-К, введенный в эксплуатацию в 1967 году [1], переведен на топливо пониженного обогащения по изотопу урана-235 [2, 3]. Номинальная тепловая мощность реактора 6 MBт. В 2016 году после проведенных физического и энергетического пусков началась его эксплуатация с низкообогащенным топливом [4].

Для сохранения высокой плотности потоков нейтронов в облучательных каналах активной зоны количество ТВС в зоне по мере выгорания топлива сохраняется неизменным, а боковой водяной отражатель, который образуют вытеснители с водой, постепенно замещают блоки бериллия. Изменение конфигурации активной зоны и выгорание топлива приводят к изменению нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора.

В ядерном реакторе за управление цепной ядерной реакцией деления отвечают рабочие органы (PO) СУЗ. К последним предъявляются повышенные требования правил ядерной безопасности, так как их работа напрямую влияет на безопасноюти, так как их работа напрямую влияет на безопасную эксплуатацию реактора. На исследовательском реакторе BBP-К в качестве материала поглотителя в PO СУЗ используется карбид бора с естественным изотопным составом.

Цель работы – исследовать динамические и кинетические процессы в реакторе ВВР-К при формировании бериллиевого отражателя с применением компьютерного кода MCNP [5, 6]. Знание кинетических параметров реактора поможет не только для обоснования безопасной эксплуатации реактора, но и для корректного вычисления реактивности аппаратурой СУЗ.

Описание активной зоны с НОУ топливом

В активной зоне исследовательского реактора (ИР) ВВР-К используются тепловыделяющие сборки типа ТВС ВВР-КН [4]: восьмитрубная (ТВС-1) и пятитрубная (ТВС-2). Топливом служит металлокерамическая композиция UO₂-Al с плотностью урана 2,8 г/см³ и обогащением по урану-235 19,7 %. Пятитрубная ТВС, имеющая внутри полость, предназначена для установки каналов РО СУЗ.

Сформированная во время физического пуска реактора исходная рабочая конфигурация активной зоны, с запасом реактивности ~7 % Дк/к, содержит 17 ТВС-1, 10 ТВС-2, восемь облучательных каналов и боковой водный отражатель из 50 вытеснителей с водой (см. рисунок 1, а, где она обозначена как «17+10»). Далее по мере выгорания топлива проводится постепенная загрузка в активную зону блоков бериллия, при этом количество ТВС остается неизмененным, а также нет перемещений ТВС внутри активной зоны. Постепенную замену вытеснителей с водой на блоки бериллия с неизменным количеством ТВС-1 и ТВС-2 иллюстрируют рисунки 1, б-д. После конверсии, эксплуатация реактора проводится рабочими циклами по 20 суток каждый (200 эффективных суток за год). В летний период проводится двухмесячный останов реактора на плановый предупредительный ремонт (ППР).

Количество элементов в последовательных конфигурациях активной зоны и аббревиатуры, используемые в тексте для обозначения конфигураций, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Количество элементов в конфигурациях активной зоны

Аббревиатура		TBC-1	TBC-2	облуч. канал	вытес- нитель	блок Ве
«17+10»	«0»	17	10	8	50	0
«17+10+10Be»	«1»	17	10	8	40	10
«17+10+16Be»	«2»	17	10	8	34	16
«17+10+23Be»	«3»	17	10	8	27	23
«17+10+49Be»	«4»	17	10	8	1	49



a) "17+10": Циклы 1–3. «Свежее» топливо. Водный отражатель.



Рисунок 1. Последовательные конфигурации активной зоны с увеличивающимся количеством блоков бериллия



Рисунок 2. Компьютерные модели восьмитрубной и пятитрубной TBC и активной зоны с бериллиевым отражателем

Для моделирования физических процессов в активной зоне реактора ВВР-К с использованием метода Монте-Карло применяется компьютерный код MCNP. В создаваемом пользователем файле исходных данных для работы с кодом МСNP моделируется детальная геометрия всех компонентов активной зоны реактора ВВР-К, включая РО СУЗ, а также все присутствующие в ней материалы. Концентрации ядер материала топлива задаются пользователем отдельно для каждой TBC, сначала – на основе данных паспортов TBC, а по мере определения выгорания топлива – используя выдачу файлов МСПР6, решающих задачу выгорания. Выгорание топлива определялось с учетом фактического времени работы реактора BBP-К на номинальной мощности 6 МВт. Здесь применяется гетерогенное описание ТВС: определен каждый твэл с его топливным сердечником и двумя оболочками из сплава САВ-1. Внутри ТВС определяется усредненное по ее объему выгорание. Описание ТВС иллюстрирует рисунок 2.

Ключевым физическим явлением, сопровождающим процесс деления тяжелых ядер, является испускание осколками деления вторичных быстрых нейтронов, иначе называемых мгновенными нейтронами, или нейтронами деления, в течение не более 10^{-13} секунд. Запаздывающие нейтроны – это нейтроны, которые испускаются осколками деления через некоторое время (от миллисекунд до нескольких минут). Для описания временного поведения реактора важно разделение вторичных нейтронов на мгновенные и запаздывающие нейтронов. Именно благодаря наличию запаздывающих нейтронов возможен контроль процессов ядерного деления в активной зоне.

Новая аппаратура СУЗ реактора ВВР-К – это комплекс ACУЗ-18Р, который состоит из многочисленных блоков контроля и отображения [7]. Вычисление реактивности осуществляется с использованием точечной модели реактора, где зависимость среднего количества нейтронов от времени N(t) описывается уравнениями:

$$\frac{dN}{dt} = (\rho - \beta_{eff}) \cdot \frac{N}{\Lambda} + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i C_i + Q$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{N\beta_{eff,i}}{\Lambda} - \lambda_i C_i$$
(1)

где N – среднее число нейтронов в реакторе; ρ – реактивность реактора; Λ – среднее время генерации нейтронов в реакторе, с; C_i – концентрация эмиттеров запаздывающих нейтронов *i*-й группы; λ_i – постоянная распада эмиттеров запаздывающих нейтро-

нов *i*-й группы; $\beta_{eff,i}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов *i*-й группы; β_{eff} – эффективная доля запаздывающих нейтронов.

Период разгона и реактивность ρ связаны с долей запаздывающих нейтронов β_i и постоянными распада дочерних нуклидов, образованных в результате деления урана, соотношением, которое иногда называют формулой обратных часов:

$$\rho = \frac{\Lambda}{Tk_{eff}} + \sum_{i} \frac{\beta_{eff,i}}{\lambda_i + T} , \qquad (2)$$

где Λ – время жизни мгновенных нейтронов, $\beta_{eff,i}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов *i*-й группы; λ_i – постоянная распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов *i*-й группы, c⁻¹; *T* – период реактора, с.

Период разгона реактора T – это время увеличения мощности реактора в e раз. Период удвоения мощности T(2) связан с периодом разгона T очевидным соотношением: $T(2)=T \ln 2$. Воспользовавшись формулой (2) и перейдя от $T \kappa T(2)$, найдем зависимость реактивности от периода удвоения мощности реактора (рисунок 3).

Результаты и их обсуждения

Код МСNP6 использует стандартное разделение запаздывающих нейтронов на шесть групп, каждая из которых характеризуется усредненной постоянной радиоактивного распада λ_i ядер-предшественников, испускающих их. Расчетные значения долей запаздывающих нейтронов и постоянных радиоактивного распада λ_i ядер-предшественников приведены в таблице 2.

Анализ таблицы 2 показывает, что по мере возрастания количества бериллия в активной зоне эф-

фективная доля запаздывающих нейтронов уменьшается, а время жизни мгновенных нейтронов увеличивается. Это объясняется тем, что бериллиевый отражатель служит также и источником фотонейтронов, образующихся в результате реакции (γ, n).

С использованием расчетных значений кинетических параметров для основных конфигураций активной зоны с бериллиевым отражателем построена зависимость реактивности реактора от периода удвоения мощности (см. рисунок 3). Эти данные были использованы при градуировке РО СУЗ методом асимптотического периода.

Оценено также влияние на эффективности РО СУЗ физических процессов, связанных с постепенной загрузкой блоков бериллия в активную зону. Рассчитанные с применением кода MCNP5 значения эффективности РО СУЗ для рассматриваемых конфигураций активной зоны приведены в таблице 3.



Рисунок 3. Зависимость реактивности активной зоны от периода удвоения мощности реактора BBP-К

Tаблица 2. Кинетические параметры пяти характерных загрузок активной зоны реактора $BBP-K^*$

загрузка	«17+10»	«17+10+10Be»	«17+10+16Be»	«17+10+23Be»	«17+10+49Be»
β1	0,00027	0,00024	0,00026	0,00026	0,00024
βı	0,00139	0,00136	0,00131	0,0013	0,00127
β3	0,00135	0,00125	0,00122	0,00123	0,00117
β4	0,00287	0,00289	0,00283	0,00274	0,0027
β5	0,00122	0,00127	0,00111	0,00112	0,0011
β6	0,00053	0,00048	0,00049	0,00074	0,00047
β _{eff,} %	0,763	0,749	0,728	0,713	0,695
λ ₁ , 1/c	0,01334	0,01334	0,01334	0,01249	0,01334
λ ₂ , 1/c	0,03272	0,03271	0,03268	0,03175	0,03267
λ ₃ , 1/c	0,12081	0,12076	0,12069	0,10943	0,12065
λ ₄ , 1/c	0,30312	0,30308	0,303	0,31740	0,30297
λ ₅ , 1/c	0,85097	0,85104	0,85119	1,35184	0,85127
λ ₆ , 1/c	2,85794	2,85743	2,85681	8,66765	2,85648
τ, ΜΚΟ	46,1	50,6	59	60,6	70,3
ρ, %	6,69	7,75	5,86	6,09	6,86

* Статистическая ошибка всех расчетов: запаздывающих нейтронов составляет менее 3,0Е-5,

постоянной распада – менее 1.,0Е-5, времени жизни мгновенных нейтронов – не более чем 1 мкс.

	Конфигурация активной зоны *						
РО СУЗ	Расчет (МСNР)	Энергопуск	Расчет (МСNР)				
	"1"		"2"	"3"	"4"		
AP	0,35	0,35	0,50	0,69	0,64		
1KO	1,39	1,17	1,73	2,08	2,22		
2КО	2,60	2,54	3,07	3,81	3,52		
ЗКО	2,82	2,99	2,77	2,72	3,14		
4KO	1,44	1,36	1,84	1,86	2,35		
5KO	1,80	1,82	2,1	2,00	2,46		
6KO	2,48	2,75	3,37	3,42	3,39		
1A3	1,18	1,22	0,84	1,09	1,52		
2A3	1,32	1,31	1,52	1,95	1,47		
3A3	1,23	1,23	1,75	1,90	1,42		

Таблица 3. Эффективности (\$) РО СУЗ последовательных конфигураций активной зоны со «свежим» и выгоревшим топливом

Обозначения конфигураций см. в таблице 1

Анализ таблицы 3 показывает, что суммарная эффективность РО СУЗ увеличивается по мере увеличения блоков бериллия в активной зоне, а значит, с точки зрения ядерной безопасности, реактор становится более безопасным.

Выводы

Получены эффективные доли запаздывающих нейтронов, постоянные распада, эффективности РО СУЗ для основных загрузок активной зоны, которые вносятся в систему ACУЗ-18Р для корректной оценки реактивности в течение, примерно, одного года работы реактора. Оценены также соответствующие эффективности РО СУЗ.

Показано, что с увеличением количества блоков бериллия в активной зоне эффективности РО СУЗ возрастают, тем самым улучшая ядерную безопасность реактора.

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

Литература

- 1. Возобновление эксплуатации реактора ВВР-К. Сборник статей, Алматы, А.о. ИАЭ НЯЦ РК, 1998 г. 248 с.
- Шаймерденов А.А., Накипов Д.А., Аринкин Ф.М., Гизатулин Ш.Х., Чакров П.В., Кенжин Е.А. 50 лет исследовательскому реактору ВВР-К – материалы Международного научного форума «Ядерная наука и технологии», посвященный 60-летию Института ядерной физики, 12–15 сентября 2017 года, Алматы, Республика Казахстан, с. 405
- Shaimerdenov A.A., Arinkin F.M., Chakrov P.V., Chekushina L.V., Gizatulin Sh.Kh., Koltochnik S.N., Nakipov D.A. Conversion of WWR-K Research Reactor. // Proceeding of 37th International Meeting RERTR-2016. Antwerp, Belgium. – 2016. – P.6.
- Аринкин Ф.М., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Дюсамбаев Д.С., Колточник С.Н., Чакров П.В., Чекушина Л.В. Конверсия активной зоны исследовательского реактора ВВР-К. – Атомная энергия, 2017, т. 123, №1 – с. 15–20.
- «Комплекс аппаратуры системы управления и защиты для исследовательского реактора ВВР-К АСУЗ-18р, РУНК.501319.075», СНИИП-Систематом, Москва, 2014.
- MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987, 2008.
- 7. MCNP6 User's Manual Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, 2013.

СУЛЫ ШАҒЫЛДЫРҒЫШТЫ БЕРИЛЛИЙЛІККЕ БІРТІНДЕП АУЫСТЫРУ КЕЗІНДЕ ТӨМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ОТЫНДЫ ССР-Қ ЗР АКТИВТІ АЙМАҒЫНЫҢ КИНЕТИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӨЗГЕРУ ДИНАМИКАСЫ

Д.С. Сайранбаев, С.Н. Колточник, А.А. Шаймерденов, Д.А. Накипов, Е.А. Кенжин

ҚР Энергетика министрлігінің Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

2015 жылы ССР-Қ реакторын төмен байытылатын отынға көшіру шеңберінде реактордың негізгі жүйелерін жаңғырту, оның ішінде БҚЖ толығынан ауыстыру жұмыстары жүргізілді. Реактордың активті аймағының жаңа конфигурациясы ықшам және барынша энергия кернеулі болды; отынның жану сипаты өзгерді. БҚЖ жұмыс органдарының саны ұлғайды, және де олардың геометриялық параметрлері өзгерді.

ССР-Қ реакторын конверсиялау тұжырымдамасына сәйкес, пайдаланудың алғашқы жылында сулы шағылдырғышты бериллийлікке біртіндеп ауыстыру жүргізіледі, ол реактордың нейтронды-физикалық

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ИР ВВР-К С НИЗКООБОГАЩЕННЫМ ТОПЛИВОМ ПРИ ПОСТЕПЕННОЙ ЗАМЕНЕ ВОДЯНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ НА БЕРИЛЛИЕВЫЙ

сипаттамаларының өзгеруімен тоғысатын болады. Бұл жұмыс бериллийлік шағылдырғыштың қалыптастырумен байланысты ССР-Қ реакторының кинетикалық параметрлерін анықтауға арналған. БҚЖ дұрыс жұмыс істеуі кешігуші нейтрондардың тиімді үлесі, лездік нейтрондардың өмір сүру уақыты сияқты активті аймақтың кинетикалық параметрлерін жүйеге енуін қарастырады. Сонымен бұл жұмыс осы параметрлердің мәндерін және реакторды пайдалану барысында олардың өзгеру динамикасын анықтауға арналған.

DYNAMICS OF CHANGES IN THE KINETIC PARAMETERS OF THE WWR-K RESEARCH REACTOR CORE WITH LOW-ENRICHED FUEL UNDER THE GRADUAL REPLACEMENT OF THE WATER REFLECTOR BY BERYLLIUM REFLECTOR

D.S. Sairanbayev, S.N. Koltochnik, A.A. Shaimerdenov, D.A. Nakipov, Y.A. Kenzhin

Institute of Nuclear Physics Ministry of Energy RK, Almaty, Kazakhstan

In 2015 the main reactor systems were modernized, including complete replacement of the control&instrumentation system within the conversion of the reactor WWR-K to low-enrichment fuel. The new reactor core configuration became compact and more energy-intensive; the character of fuel burn-up has changed. The number of C&I operating elements and their geometric parameters have been changed.

According to the concept of the reactor WWR-K conversion, the water reflector is planned to be gradually replaced by beryllium one during the first year of operation, which is associated with the change in the neutron-physical characteristics of the reactor. This paper is intended to determine the kinetic parameters of the reactor WWR-K associated with the formation of the beryllium reflector. The correct operation of C&I assumes the input of the core kinetic parameters values into the system, such as effective fraction of delayed neutrons, lifetime of instantaneous neutrons. This paper is devoted to determining the values of these parameters and the dynamics of their changes during the reactor operation.