

P13-2010-89

Р. Н. Мехтиева*, Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов,
Л. А. Тайыбов, Чжан Чан Мин

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЛИ
ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ
И ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ
В РЕАКТОРЕ **ИБР-2М**

Направлено в журнал «Атомная энергия»

*Институт радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана, Баку

Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов
и времени жизни мгновенных нейтронов в реакторе ИБР-2М

Проведен расчет основных параметров кинетики реактора ИБР-2М: эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$ и времени жизни мгновенных нейтронов τ . Расчет основывался на использовании двухмерной многогрупповой программы переноса нейтронов и программ SCALE4 с системой многогрупповых ядерных констант.

Для штатного режима работы ИБР-2М получены следующие значения параметров кинетики: $\beta_{эф} = 0,00216 \pm 0,00007$, $\tau = 6,5 \cdot 10^{-8}$ с, ценность запаздывающих нейтронов $\chi = 0,980$ и константа спада мгновенных нейтронов в критическом состоянии реактора $\alpha = 3,50 \cdot 10^4$ с⁻¹. Величины $\beta_{эф}$ и τ на $\sim 0,2$ и $\sim 5,0\%$ больше, чем для ИБР-2 ($\beta_{эф} = 0,00216$ и $\tau = (6,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ с).

Показано некоторое увеличение $\beta_{эф}$ и τ при уменьшении размеров активной зоны ИБР-2 в радиальном направлении.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Calculation of the Effective Delayed Neutron Fraction
and Prompt Neutron Lifetime in the IBR-2M Reactor

Calculation of main kinetic parameters for the reactor IBR-2M is carried out: the effective delayed neutron fraction and the prompt neutron lifetime. The calculation is based on the use of DORT, a two-dimensional multi-group program for resolving of neutron transport equation, and SCALE4 programs for generating multi-group nuclear cross-sections. Calculation values of kinetic parameters for IBR-2M in a regular mode of its work are obtained: $\beta_{eff} = 0.00216 \pm 0.00007$, $\tau = 6.5 \cdot 10^{-8}$ s, $\chi = 0.980$, $\alpha = 3.50 \cdot 10^4$ s⁻¹. The parameters β_{eff} and τ are $\sim 0.2\%$ and $\sim 5.0\%$ greater than for IBR-2 ($\beta_{eff} = 0.00216$ and $\tau = (6.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-8}$ s). It is shown that β_{eff} and τ increase with reduction of the size of the active zone. Also, it is noted that for calculation of prompt neutron lifetime it is necessary to use the S_{16} -approximation.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

ВВЕДЕНИЕ

В кинетике ядерных реакторов эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эф}}$ и время жизни мгновенных нейтронов τ являются одними из основных параметров. Для импульсных реакторов типа ИБР-2 величина τ определяет длительность импульса мощности и наряду с $\beta_{\text{эф}}$ используется в анализе условий безопасной работы реактора. Численные значения параметров кинетики зависят от состава и геометрии активной зоны. По сравнению с реактором ИБР-2 активная зона модернизированного реактора ИБР-2М более компактная. В то же время конструкция ИБР-2М такова, что экспериментальное измерение $\beta_{\text{эф}}$ и τ традиционными методами невозможно. Кроме того, как правило, эти параметры нельзя измерить отдельно. Качественно величину τ для ИБР-2М можно оценить из анализа формы импульса мощности, а $\beta_{\text{эф}}$ — из анализа шумов энергии импульсов [1, 2] при условии, что величина τ уже была оценена ранее. Отсюда расчет $\beta_{\text{эф}}$ и τ для ИБР-2М приобретает особое значение.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ, ОТНОСЯЩЕЙСЯ К РАСЧЕТУ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЛИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ И ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эф}}$, зависящая от состава и геометрии активной зоны, отличается от теоретической доли запаздывающих нейтронов β , определяемой как отношение числа запаздывающих нейтронов к числу всех нейтронов для данного делящегося ядра. Это связано с тем, что запаздывающие нейтроны испускаются с более низкими энергиями, чем мгновенные, и, следовательно, вероятность вызвать последующие деления (их ценность по отношению к делению) отличается от мгновенных нейтронов. Время жизни мгновенных нейтронов в реакторе определяется как величина, обратная вероятности исчезновения нейтрона в единицу времени из реактора вследствие любых процессов. В кинетике реактора используются также две связанные с $\beta_{\text{эф}}$ и τ величины: ценность запаздывающих нейтронов $\chi = \beta_{\text{эф}}/\beta$ — число, показывающее, во сколько раз величина эффективной доли запаздывающих нейтронов больше теоретической, и константа спада

мгновенных нейтронов, которая в критическом состоянии реактора выражается в виде $\alpha = \beta_{\text{эф}}/\tau$.

Во многих работах, например [3, 4], рассмотрены различные методы расчета $\beta_{\text{эф}}$ и τ . Из анализа этих работ следует, что наиболее приемлемый для ИБР-2 и ИБР-2М метод расчета $\beta_{\text{эф}}$ и τ есть метод, основанный на теории возмущений, в которой величины $\beta_{\text{эф}}$ и τ оцениваются из решения стационарного уравнения переноса нейтронов в виде

$$\beta_{\text{эф}} = \sum_A \beta_{\text{эф}}^A = \frac{1}{\text{ЦНД}} \nu_d \sum_A \int_V dV N_A \sum_{g=1}^G \chi_{D,g}^A \Phi_g^+(r) \sum_{l=1}^G \Sigma_f^A \Phi_l(r), \quad (1)$$

$$\text{ЦНД} = \int dV \sum_A N_A \sum_{g=1}^G \nu_f \Sigma_f^A \Phi_g(r) \sum_{l=1}^G \chi_l^A \Phi_l^+(r), \quad (2)$$

$$\tau = \frac{1}{\text{ЦНД}} \sum_k \int_V \int_{\Omega} \frac{1}{v_k} \Phi_k(\mathbf{r}, \Omega) \Phi_k^+(\mathbf{r}, -\Omega) dV d\Omega, \quad (3)$$

где ЦНД — ценность нейтронов деления, ν_d — число запаздывающих нейтронов на один акт деления, $\Phi_g(r)$ — плотность потока нейтронов в энергетической группе g , где $g = \overline{1, G}$, G — число энергетических групп, $\chi_{D,g}^A = \sum_i \chi_{D,g}^{A,i} a_i^{A,g}$ — доля спектра запаздывающих нейтронов в энергетической группе g , где $\chi_{D,g}^{A,i}$ — доля i -й группы запаздывающих нейтронов, испускаемых нуклидом A и попадающих в энергетическую группу g , $a_i^{A,g}$ — относительный выход i -й группы запаздывающих нейтронов, принадлежащих энергетической группе g , V — объем активной зоны, χ_l — доля спектра всех нейтронов деления в энергетической группе l , N_A — концентрация нуклида с номером A , Σ_f^A — макроскопическое сечение деления нуклида с номером A , $\Phi_l^+(r)$ — сопряженная функция потока нейтронов в энергетической группе $l = \overline{1, L}$, L — число энергетических групп, ν_f — число всех нейтронов на один акт деления, v_g — скорость нейтронов в энергетической группе g .

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА $\beta_{\text{эф}}$ И τ

Чтобы вычислять эффективную долю запаздывающих нейтронов и время жизни мгновенных нейтронов по указанным выше формулам, нужно с хорошей точностью знать прямые и сопряженные потоки нейтронов в активной зоне реактора. Для ИБР-2М, как следует из [5], для получения расчетной плотности потока нейтронов достаточно использовать двухмерный расчет по радиусу и высоте активной зоны. Кроме того, в работе [5] было отмечено, что для учета сложных неоднородностей в энергетическом спектре

нейтронов на периферии активной зоны, возникающих из-за влияния отраженных от реакторных конструкций нейтронов, необходимо использовать многогрупповое уравнение переноса нейтронов. Исходя из этих требований был выбран комплекс программ DORT [6] — двухмерный многогрупповой комплекс программ переноса нейтронов на базе метода дискретных ординат в S_n -приближении и комплекс программ SCALE4 [7] с системой многогрупповых ядерных констант. Основная идея метода дискретных ординат заключается в том, что угловое распределение потока нейтронов аппроксимируется функцией, определенной в дискретных узлах угловой переменной (S_n -приближение). Использование этих программ вызвано тем, что комплекс программ DORT не имеет своей системы групповых ядерных констант, а комплекс SCALE4 имеет, но только применительно к одномерной геометрии. Поэтому с помощью программы SCALE4 были подготовлены 16-групповые сечения для двухмерных многогрупповых нейтронно-транспортных расчетов по программам DORT. Это позволило вычислять распределение прямых и сопряженных плотностей потока нейтронов. Для учета анизотропии плотности потока нейтронов и сечения рассеяния использовалось транспортное P_1 -приближение. Тестовая проверка применения двухмерно-многогруппового комплекса программ переноса нейтронов DORT и одномерно-многогруппового комплекса программ SCALE4 с системой многогрупповых ядерных констант к расчету плотности потока нейтронов в реакторе ИБР-2М была проведена в более раннем исследовании [5]. Далее после вычисления прямой и сопряженной плотностей потоков нейтронов по формулам (1)–(3) вычисляются эффективная доля запаздывающих нейтронов и время жизни мгновенных нейтронов. Схема расчета представлена на рис. 1.

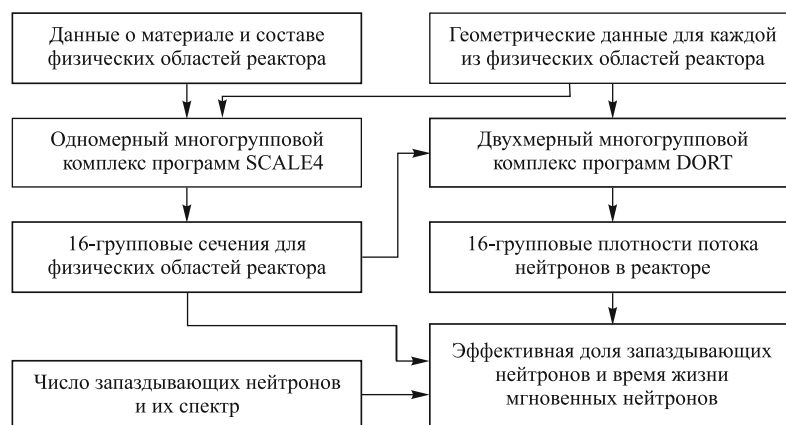


Рис. 1. Схема расчета эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов ИБР-2М

3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТОВ $\beta_{эф}$ И τ

Чтобы оценить точность расчета $\beta_{эф}$ и τ , выполненного по указанной выше методике, были проведены тестовые исследования по влиянию используемых приближений на расчетные величины. Для этого были проведены расчеты $\beta_{эф}$ и τ для различных систем, для которых имелись экспериментальные значения $\beta_{эф}$ или τ . В качестве объекта тестовых расчетов были выбраны реактор ИБР-2 с известным экспериментальным значением τ и критическая сборка ZPR-III-59 с измеренным значением $\beta_{эф}$. Реактор ИБР-2 близок к ИБР-2М по типу и составу активной зоны. Сборка ZPR-III-59 близка к реактору ИБР-2М по составу и геометрическим размерам твэлов [8]. Сборка ZPR-III-59 является быстрой критической сборкой с плутониевым топливом, замедлителем из графита и отражателем из свинца. Загрузка топлива в активной зоне ZPR-III-59 ~ 80 кг близка к загрузке зоны реактора ИБР-2М. На рис. 2 показаны спектры нейтронов в активной зоне ZPR-III-59 и ИБР-2М. Расчетный спектр нейтронов в ИБР-2 практически совпадает со спектром в ИБР-2М. Из рис. 2 видно, что графитовые замедлителы сборки ZPR-III-59 не сильно смягчают спектр быстрых нейтронов в активной зоне, и, соответственно, условия расчета параметров кинетики в ZPR-III-59 будут близки к расчету ИБР-2М.

3.1. Выбор сетки. В расчетах кинетических параметров по методу дискретных ординат, как правило, требуется брать более мелкую сетку, чем в расчетах в диффузионном приближении. В общем случае, чем выше приближение, тем мельче должна быть сетка. В среднем рекомендуется выбирать

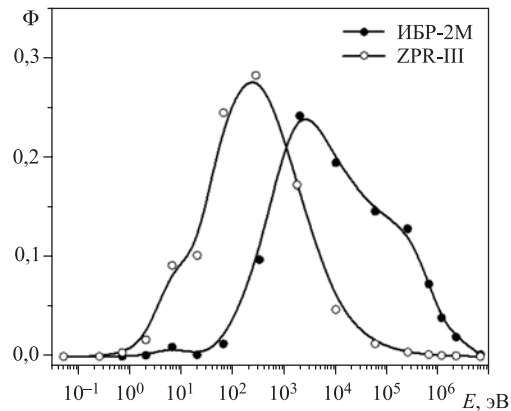


Рис. 2. Расчетный спектр нейтронов в активной зоне ИБР-2М и ZPR-III-59 в относительных единицах

два-три интервала на одну транспортную длину нейтронов [11]. Обычно расчетный интервал в цилиндрической и сферической геометриях выбирается из соотношения

$$h_R = \frac{1}{B} \min_g l_{tr}^g, \quad (4)$$

где $B = 2-3$, l_{tr}^g — транспортная длина нейтронов в g -энергетической группе.

Для ИБР-2 минимальное значение транспортной длины из всех групп с энергией нейтронов более 10 эВ составило $\sim 1,0$ см. С помощью (4) шаг расчетной сетки был оценен 0,3–0,5 см.

Полученное приближение шага сетки обеспечивает достаточно точное вычисление интегральных величин типа эффективного коэффициента размножения нейтронов $k_{эф}$, но может приводить к трудностям при расчете систем с сильно меняющимся спектром.

3.2. Влияние S_n -приближения. Число дискретных узлов угловой переменной (S_n -приближение) определяет точность расчета распределения потока нейтронов по углу. Чем больше анизотропия в реакторе, тем большее число узлов необходимо использовать. Для ZPR-III-59 и ИБР-2 были проведены оптимизационные расчеты $\beta_{эф}$ и τ в зависимости от числа узлов. Результаты расчета для ИБР-2 показаны на рис. 3. Видно, что при S_n выше 8 величина $\beta_{эф}$ мало меняется с номером приближения. Максимальное отличие расчетных данных по $\beta_{эф}$ в S_8 - и S_{16} -приближениях для ZPR-III-59 и ИБР-2 составляет $\sim 0,02$ и $\sim 0,01$ %. При оценке времени жизни увеличение номера приближения приводит к уменьшению этой величины. Из анализа данных отличие в использовании S_8 - от S_{16} -приближения при оценке времени жизни мгновенных нейтронов в ZPR-III-59 составляет $\sim 4,9$ %, для ИБР-2 — $\sim 4,5$ %.

Расчетные значения $\beta_{эф}$ и τ в зависимости от номера S_n -приближения для ИБР-2 представлены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что величина $\beta_{эф}$ слабо меняется от номера приближения, и для расчета эффективной доли запаздывающих нейтронов достаточно использовать приближение S_8 . Для оценки

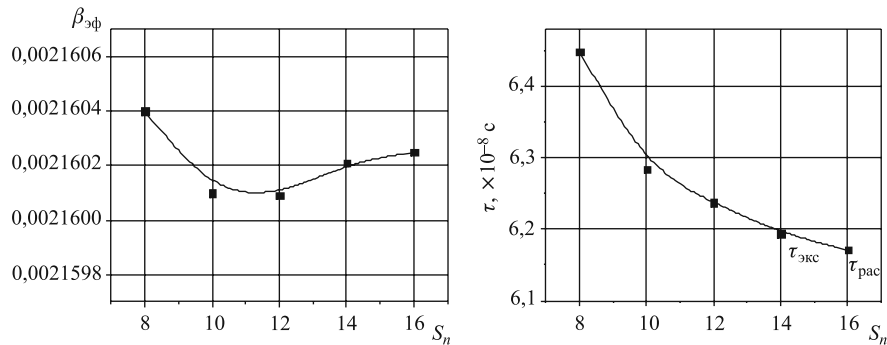


Рис. 3. Зависимости $\beta_{эф}$ и τ от номера S_n -приближения в ИБР-2

времени жизни необходимо использовать его асимптотическое с увеличением номера приближения значение. Это значение практически реализуется в S_{16} -приближении $\tau = 6,17 \cdot 10^{-8}$ с. Расчетное асимптотическое значение τ близко к измеренному $\tau = (6,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ с [9]. Отсюда было принято все расчеты по τ для ИБР-2М проводить в S_{16} -приближении.

3.3. Влияние констант на точность расчета $\beta_{эф}$ и τ . В настоящее время существует несколько библиотек по ядерным данным [10]. Данные по запаздывающим нейтронам для разных библиотек имеют различия, хотя и небольшие. В таблице показано сравнение расчетных значений эффективной доли запаздывающих нейтронов для ZPR-III-59 и ИБР-2, полученных с использованием разных библиотек ядерных данных (ν_d — число запаздывающих нейтронов на один акт деления, $\Delta\beta_{эф}$ — отличие от экспериментального значения $\beta_{эф}$). Там же приведены экспериментальные значения $\beta_{эф}$. Как видно из таблицы, расчетные значения $\beta_{эф}$ близки к экспериментальным. Из таблицы также можно видеть, что $\beta_{эф}$ достаточно сильно зависит от числа запаздывающих нейтронов на один акт деления. Для ZPR-III-59 максимальное отличие составляет +5,1% и для ИБР-2 +2,2%. В случае использования ν_d из работы [10] (Tuttle (1979)) получается значение $\beta_{эф}$, наиболее близкое к экспериментальному значению как для ZPR-III-59, так и для ИБР-2.

Расчетное значение $\beta_{эф}$, равное 0,00239 для ZPR-III-59, отличается от измеренного $0,00233 \pm 0,0001$ на +2,6% [8]. Для ИБР-2 расчетное значение $\beta_{эф} = 0,002160$ практически совпадает с экспериментальным $0,002167 \pm 0,000015$ [9]. Из анализа расчетных данных можно сказать, что погрешность расчетной оценки $\beta_{эф}$ для ИБР-2М будет не более $\pm 3\%$.

Сравнение расчетных значений $\beta_{эф}$ с использованием данных по запаздывающим нейтронам из разных библиотек с экспериментальными значениями $\beta_{эф}$ (S_{16} -приближение)

Доля запаздывающих нейтронов		ZPR-III-59		ИБР-2	
Библиотека	ν_d	$\beta_{эф}$	$\Delta\beta_{эф}, \%$	$\beta_{эф}$	$\Delta\beta_{эф}, \%$
ENDF/B-VII	0,00644	0,00244	+4,7	0,002208	+1,9
JENDL-3.3	0,00627	0,00238	+2,1	0,002150	-0,8
JEF-2.2	0,00646	0,00245	+5,1	0,002215	+2,2
Tuttle (1979)	0,00630	0,00239	+2,6	0,002160	-0,3
Эксперимент		0,00233 \pm 0,0001		0,002167 \pm 0,000015	

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Активная зона реактора ИБР-2М отличается от ИБР-2 ее размером. Загрузка ИБР-2М составляет 69 ТВС, загрузка ИБР-2 — 78 ТВС, т. е. загрузка ИБР-2М на 9 ТВС меньше. На рис. 4 показаны горизонтальные разрезы реакторов ИБР-2 и ИБР-2М.

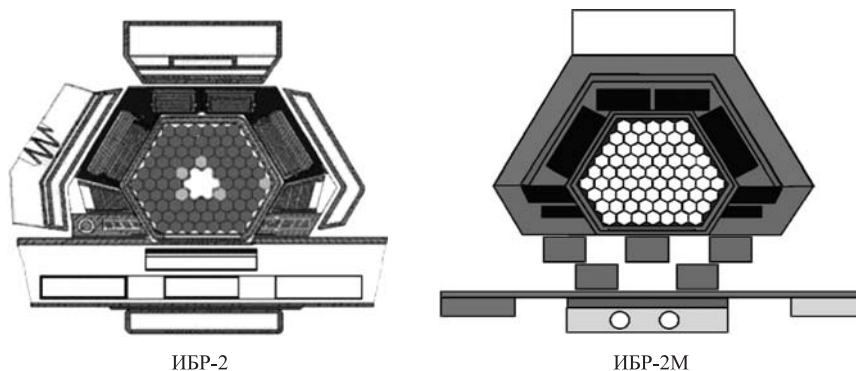


Рис. 4. Горизонтальные разрезы реакторов ИБР-2 и ИБР-2М

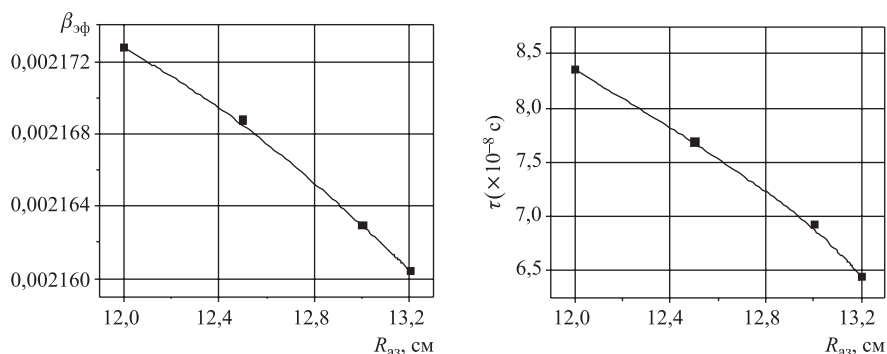


Рис. 5. Зависимости расчетных значений $\beta_{эф}$ и τ от радиуса $R_{аз}$ активной зоны ИБР-2 (S_8 -приближение)

С использованием S_{16} -приближения и оптимального шага сетки 0,5 см для штатного режима работы реактора ИБР-2М были получены следующие значения: $\beta_{эф} = 0,00216 \pm 0,00007$ и $\tau = 6,5 \cdot 10^{-8}$ с. Ценность запаздывающих нейтронов и константа спада мгновенных нейтронов в критическом состоянии ИБР-2М равны $\chi = 0,980$, $\alpha = 3,50 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ соответственно. Эффективная доля запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов на $\sim 0,2$ и $\sim 5,0\%$ соответственно больше, чем для ИБР-2 ($\beta_{эф} = 0,00216$ и $\tau = (6,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ с).

Покажем, почему в меньшей по размеру активной зоне ИБР-2М величина τ оказалась несколько большей, чем в ИБР-2. Для этой цели были проведены тестовые расчеты, в которых $\beta_{эф}$ и τ вычислялись в зависимости от радиуса активной зоны ZPR-III-59 и ИБР-2. Как видно из рис. 5, чем больше радиус активной зоны, тем меньше значения $\beta_{эф}$ и τ . Аналогичные выводы следуют

также из расчета $\beta_{эф}$ и τ для ZPR-III-59. Здесь следует отметить, что с точки зрения расчетной методики любое изменение радиуса или высоты активной зоны приводит к совершенно новому реактору. Поэтому данные, представленные на рис. 5, — это чисто иллюстративный материал, показывающий, что в указанной области изменения радиуса активной зоны проведенные расчеты параметров кинетики ИБР-2 и ИБР-2М правильно отражают суть изменений. Частично такое изменение значения τ с изменением радиуса активной зоны связано с тем, что близкое для ИБР-2 оптимальное отношение высоты активной зоны к диаметру после модернизации увеличилось. Это привело к тому, что в критическом состоянии реактора ценность мгновенных нейтронов уменьшилась, соответственно, значение τ увеличилось.

ВЫВОДЫ

Проведен расчет основных параметров кинетики реактора ИБР-2М: эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$ и времени жизни мгновенных нейтронов τ . Расчет основывался на использовании двухмерной многогрупповой программы переноса нейтронов и программ SCALE4 с системой многогрупповых ядерных констант.

Расчетные значения кинетических параметров ИБР-2М в штатном режиме его работы следующие: $\beta_{эф} = 0,00216 \pm 0,00007$, $\tau = 6,5 \cdot 10^{-8}$ с, $\chi = 0,980$, $\alpha = 3,50 \cdot 10^4$ с⁻¹. Величины $\beta_{эф}$ и τ на $\sim 0,2$ и $\sim 5,0$ % больше, чем для ИБР-2 ($\beta_{эф} = 0,00216$ и $\tau = (6,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ с).

Анализ тестовых расчетов для сборки ZPR-III-59 и реактора ИБР-2, близких по составу и геометрии к ИБР-2М, показал, что наблюдается заметное увеличение $\beta_{эф}$ и τ при уменьшении размеров активной зоны в радиальном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пепельшев Ю. Н.* Метод экспериментальной оценки эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни поколения нейтронов реактора ИБР-2. Препринт ОИЯИ Р13-2007-96. Дубна, 2007.
2. *Пепельшев Ю. Н., Смирнов В. С.* Измерение среднего времени жизни поколения нейтронов в реакторе ИБР-2. Препринт ОИЯИ Р13-2006-115. Дубна, 2006.
3. *Michalek S., Hascik J., Farkas G.* MCNP5 Delayed Neutron Fraction ($\beta_{эф}$) Calculation in Training Reactor VR-1 // J. of Electrical Engineering. 2008. V. 59, No. 4. P. 221–224.
4. *Зизин М. Н., Ярославцева Л. Н.* Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов для быстрых критических сборок // Тр. трехстороннего советско-бельгийско-голландского симпозиума по некоторым проблемам физики быстрых реакторов. Мелекес, февр. 1970 г. Т. 1. М.: ЦНИИАтоминформ, 1970.

5. *Чжан Чан Мин*. Влияние термомеханических перемещений реакторных конструкций на реактивность ИБР-2М. Сообщение ОИЯИ Р13-2009-166. Дубна, 2009.
6. *Johnson J. O.* DORT: A Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code, ORNL/TM-11778. ORNL, 1992.
7. *Greene N. M., Petrie L. M.* SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation. V. I–III, NUREG/CR-0200 (ORNL/NUREG/CSD-2/R6), 2000.
8. *Carpenter S. G., Gasidlo J. M., Stevenson J. M.* Measurements of the Effective Delayed-Neutron Fraction in Two Fast Critical Experiments // Nucl. Sci. Eng. 1972. V. 49. P. 236–239.
9. *Пепельшев Ю. Н., Смирнов В. С.* Измерение среднего времени жизни поколения нейтронов в ИБР-2 // АЭ. 2007. Т. 103, вып. 3.
10. *McKnight R. P.* Delayed Neutron Data for the Major Actinides. A Report by the Working Party, on International Evaluation Co-operation of the NEA Nuclear Science Committee. V. 6, NEA/WPEC-6, OECD, 2002.
11. *Зизин М. Н.* Расчет нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1978. 104 с.

Получено 26 июля 2010 г.

Редактор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 24.09.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,88. Тираж 305 экз. Заказ № 57097.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/