

P13-2005-185

Ю. Н. Пепельшев, А. К. Попов

ВЛИЯНИЕ БЛИЖАЙШЕГО ОКРУЖЕНИЯ
АКТИВНОЙ ЗОНЫ НА ДИНАМИКУ
ИМПУЛЬСА МОЩНОСТИ РЕАКТОРА **ИБР-2**

Направлено в журнал «Annals of Nuclear Energy»

Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.

P13-2005-185

Влияние ближайшего окружения активной зоны на динамику импульса мощности реактора ИБР-2

Выполнен анализ формы импульса мощности реактора ИБР-2, измеренного в полном динамическом диапазоне изменения нейтронного потока (10^4), т.е. от максимума импульса мощности до уровня фона между импульсами. Рассмотрены три варианта математической модели, описывающих динамику реактора в течение импульса мощности. Наилучшее приближение к экспериментальным данным получено при добавлении к шести уравнениям, описывающим влияние запаздывающих нейтронов на импульс мощности, двух аналогичных уравнений, описывающих влияние нейтронов, отраженных от элементов конструкции реактора. Показано, что наиболее вероятными источниками дополнительных групп нейтронов могут быть замедлители нейтронов, окружающие активную зону, а также ближайшие к активной зоне элементы биологической бетонной защиты. Дополнительные группы нейтронов оказывают существенное влияние на формирование импульса мощности.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005

Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.

P13-2005-185

The Influence of the Nearest Environment of the Active Zone on the Power Pulse Dynamics in the IBR-2 Reactor

An analysis of the IBR-2 reactor power pulse shape measured over the entire dynamic range of neutron flux variation (10^4), i.e., from the maximum pulse power to the background power between pulses, has been carried out. Three variants of the model describing the reactor dynamics during the power pulse have been investigated. The best approximation to the experimental data has been obtained by adding to the six equations describing the effect of delay neutrons on the power pulse of two analogous ones describing the effect of the neutrons reflected from the structural elements of the reactor. It is shown that the most probable source of additional groups of neutrons may be the neutron moderators enveloping the active zone as well as the elements of the biological concrete shielding that are closest to the active zone. These additional groups of neutrons influence essentially the formation of the power pulse.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005

ВВЕДЕНИЕ

В реакторе ИБР-2 с помощью модулятора реактивности создаются периодические импульсы мощности, в которых с периодом 0,2 с реактор на короткое время (примерно 400 мкс) выводится в надкритическое состояние на мгновенных нейтронах.

Форма импульса мощности является важной характеристикой импульсного реактора. Анализ формы импульса позволяет оценить параметры кинетики, ход изменения реактивности при движении подвижного отражателя (ПО), а также ряд других характеристик, важных для понимания динамики реактора.

Ранее форма импульса мощности ИБР-2 исследовалась на стадиях физического и энергетического пусков реактора [1]. Анализируемый диапазон изменения нейтронного потока в импульсе не превышал 10^2 . Для более детального анализа импульса необходимы исследования в полном диапазоне изменения нейтронного потока в импульсе, т. е. не менее 10^4 . Особый интерес представляет область на уровне 10^{-3} – 10^{-4} от максимума импульса. Охватить такой диапазон измерений ранее было достаточно сложно, поэтому некоторые характеристики реактора, которые, в принципе, можно «извлечь» из анализа формы импульса, не были определены. В работе даны основные результаты детального анализа импульса мощности, измеренного в полном динамическом диапазоне изменения нейтронного потока. Основная цель работы — дать более точное описание динамических свойств реактора в быстрых процессах, особенно во время действия импульса мощности.

1. ИСХОДНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Форма импульса измерялась для варианта подвижного отражателя ПО-3 по времени пролета быстрых нейтронов с помощью ионизационной камеры деления с ^{232}Th -конвертером [2]. Камера использовалась в счетном режиме и регистрировала нейтроны с энергией выше 1,2 МэВ. Детектор был установлен на 1-м нейтронном пучке на расстоянии 11,5 м от поверхности замедлителя. Быстродействие ториевой камеры с учетом времени пролета нейтронов до детектора было не хуже 0,5 мкс. Ширина временного канала составляла 4 мкс (во вспышке) и 64 мкс (в фоне). Для накопления данных использовалась

4096-канальная система временного анализа. Частота повторения импульсов мощности во всех измерениях была равна $4,97 \text{ с}^{-1}$. Измерения проводились на постоянной мощности в диапазоне от 200 до 1350 кВт. Для ПО-3 форма импульса в диапазоне до 10^{-2} от максимума хорошо аппроксимируется гауссовой зависимостью. На рис. 1 приведена форма импульса мощности, измеренная в полном динамическом диапазоне изменения нейтронного потока.

Дополнительно использовался токовый анализ с регистрацией импульса тока от ФЭУ с пластиковым сцинтиллятором по протонам отдачи. Детектор был установлен на 1-м наклонном канале на расстоянии 2 м от активной зоны и имел защиту от гамма-квантов и тепловых нейтронов. Статистическая точность измерений с ториевой камерой деления была достаточна для детального описания изменения мощности в области формирования основной вспышки, т.е. начиная с уровня 10^{-3} – 10^{-4} до максимума импульса. Это позволяло наблюдать очень «тонкие» быстрые эффекты реактивности, невидимые в статических измерениях. На рис. 2 представлены результаты измерений кривой реактивности подвижных отражателей, полученные в статических измерениях в подкритическом состоянии реактора [2].

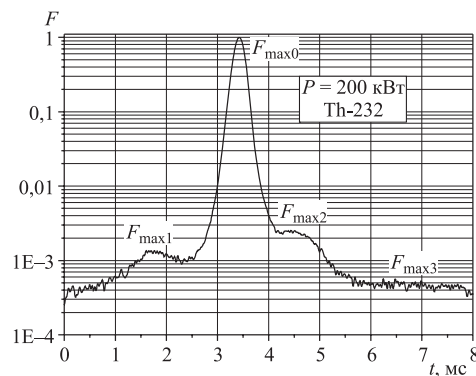


Рис. 1. Форма импульса мощности. Данные нормированы на максимум импульса. Измерения с помощью ^{232}Th -камеры. F — нормированный поток нейтронов, t — время

На рис. 1 обращает на себя внимание тот факт, что максимум второго дополнительного импульса $F_{\max 2}$ гораздо выше первого дополнительного $F_{\max 1}$. На этом уровне мощности реактор находится в глубоко подкритическом состоянии. Поэтому указанный факт, казалось бы, свидетельствует о существенной асимметрии в кривой реактивности при перемещении подвижных отражателей. С другой стороны, как видно из рис. 2, кривая реактивности

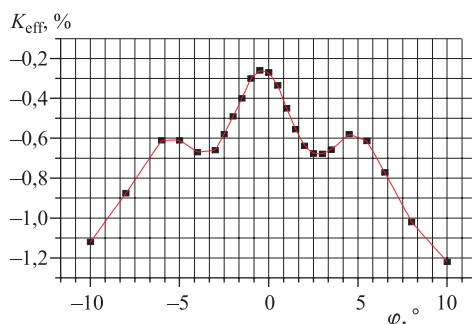


Рис. 2. Ход реактивности при смещении роторов ПО-3 в интервале $\pm 10^\circ$ основного подвижного отражателя (ОПО), полученный в статических измерениях. По оси абсцисс — смещение ОПО, по оси ординат — отклонение коэффициента размножения от единицы

ПО, полученная в статических измерениях (при медленном вращении ПО в подкритическом состоянии реактора), явно симметрична. Таким образом, из данных, приведенных на рис. 1 и 2, следует, что статические характеристики реактора не позволяют полностью описать его динамические свойства. Ниже приведен анализ полученного расхождения.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Обычно для анализа переходных процессов мощности и устойчивости реактора достаточно было учитывать шесть групп запаздывающих нейтронов и обратные связи по реактивности, постоянные времени которых лежат в диапазоне от десятых долей секунды и выше [3]. Анализ формы импульса мощности позволяет выявить более быстрые процессы в реакторе, проявляющиеся лишь в течение самого импульса мощности.

Зарегистрированные значения мощности импульса имели статистический разброс, поэтому для анализа кривая мощности сглаживалась путем усреднения логарифма мощности. Для этого определялся номер N_{\max} , соответствующий наибольшему значению мощности в импульсе. Чем меньше была зарегистрированная мощность P , тем по большему числу замеров велось усреднение $\ln P$. Если номеру замера N соответствовало неравенство $\Delta N = |N - N_{\max}| \leq 20$, то усреднение не проводилось. При $\Delta N \leq 30$ усреднение $\ln P$ проводилось по трем значениям, при $\Delta N \leq 40$ — по 7, при $\Delta N \leq 50$ — по 11, при $\Delta N \leq 60$ — по 15, при $\Delta N > 60$ — по 19 значениям.

При анализе в качестве исходных уравнений кинетики использованы уравнения одноточечной модели реактора, приведенные к следующему виду:

$$\tau \frac{dP}{dt} = P\varepsilon + S, \quad (1)$$

$$S = \sum_i S_i, \quad (2)$$

$$T_i \frac{dS_i}{dt} + S_i = \beta \mu_i P, \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, 6$ — номер группы запаздывающих нейтронов; P — мощность реактора; t — время; τ — эффективное время жизни мгновенных нейтронов; ε — реактивность на мгновенных нейтронах; $\beta_i, \beta = \sum_i \beta_i$ — соответственно доля запаздывающих нейтронов группы i и суммарная; $S_i, S = \sum_i S_i$ — соответственно нормированная интенсивность источников запаздывающих нейтронов группы i и суммарная; $\mu_i = \beta_i/\beta$, $T_i = 1/\lambda_i$, λ_i — соответственно относительная доля, постоянная времени и постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы i .

Мощность и интенсивность источников запаздывающих нейтронов выражены в относительных единицах.

Использованы следующие значения параметров: $\mu_i = 0,038; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035$; $\lambda_i = 0,0129; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21 \text{ с}^{-1}$ [2]; $\tau = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$; $\beta = 2,16 \cdot 10^{-3}$.

Начальное значение S , т.е. значение перед началом развития импульса мощности, вычислено по формуле

$$S^0 = \sum_i S_i^0 = \sum_i \left(\beta E^0 \frac{\mu_i \lambda_i \exp(-\lambda_i T_i)}{1 - \exp(-\lambda_i T_i)} + \beta \mu_i P_\Phi \right), \quad (4)$$

вытекающей из уравнений (1)–(3) и соответствующей работе реактора со стабильными импульсами мощности с энергией E^0 при фоновой мощности P_Φ . Мощность фона P_Φ вычислена как средняя мощность между импульсами. В формуле (4) T_i — период следования импульсов мощности. Для выявления особенностей динамики реактора в течение импульса мощности анализировали соответствующую ему зависимость реактивности от времени, вычисленную по формуле

$$\varepsilon = \left(\tau \frac{dP}{dt} - S \right) / P, \quad (5)$$

вытекающей из уравнения (1). Вычисленный ход реактивности при средней мощности реактора 200 кВт показан на рис. 3.

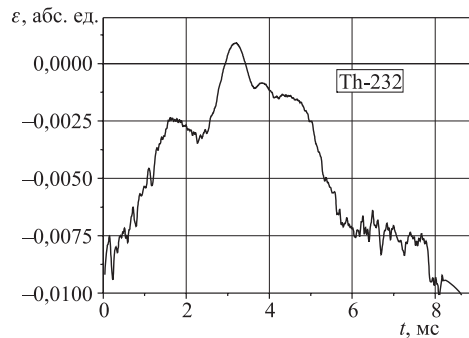


Рис. 3. Ход реактивности ε в зависимости от времени t вблизи мгновенной критичности. Решение обратного уравнения кинетики. Измерения с помощью ториевой камеры деления

Модулятор реактивности создает импульс реактивности практически симметричной формы относительно своего максимального значения (см. рис. 2). Однако форма импульса реактивности, вычисленная по формуле (5) при учете только шести групп запаздывающих нейтронов, явно несимметрична. Ниже рассмотрены три варианта объяснения такой несимметричности.

В первом варианте предполагалось, что в формировании импульса мощности, помимо общепринятых шести групп запаздывающих нейтронов, дополнительно участвуют нейтроны, отраженные от элементов конструкции реактора, так называемые «комнатные» нейтроны.

Во втором варианте предполагалось, что отраженные нейтроны не попадают в активную зону реактора и, следовательно, не участвуют в формировании импульса мощности, но они попадают в камеру, предназначенную для измерения мощности реактора.

В третьем варианте отраженные нейтроны не учитывались, но предполагалось, что существует сверхбыстрая мощностная обратная связь, проявляющаяся в течение импульса мощности.

Вариант 1. Предполагалось, что в формировании импульса мощности участвуют не только шесть групп запаздывающих нейтронов, но и нейтроны, отраженные от элементов конструкции реактора. Эти отраженные нейтроны описаны двумя дополнительными уравнениями того же вида, что и уравнения (3). Группы с номерами $i = 1, \dots, 6$ относятся к запаздывающим нейтронам, а группы с номерами $i = 7, 8$ — к отраженным.

Каждому набору параметров $\mu_7, \mu_8, \lambda_7, \lambda_8$ соответствует определенная форма реактивности ε , вычисленной по формуле (5). Ставилась задача подобрать значения этих параметров так, чтобы форма реактивности ε была как

можно более симметричной, т.е. как можно меньше отличалась от реактивности, обусловленной модулятором реактивности ε_{MP} . При этом полагали, что рост ε_{MP} до максимального значения ε_m совпадает с ε , а спад ε_{MP} после достижения максимума симметричен ее росту. Степень близости ε к ε_{MP} оценивали по среднеквадратическому отклонению

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_2 - N_{\varepsilon_m}} \sum_{N_{\varepsilon_m} + 1}^{N_2} (\varepsilon - \varepsilon_{MP})^2}, \quad (6)$$

где N_{ε_m} — номер замера, соответствующий максимальному значению ε_{MP} ; N_2 — номер, соответствующий правой границе анализируемого импульса реактивности.

Наименьшее среднеквадратическое отклонение спада ε от спада ε_{MP} , равное $\sigma = 3,71 \cdot 10^{-4}$, получено при следующих значениях параметров: $\mu_7 = 0,0138$; $\mu_8 = 0,078$; $\lambda_7 = 1710 \text{ c}^{-1}$ ($T_7 = 1/\lambda_7 = 0,585 \cdot 10^{-3} \text{ c}$), $\lambda_8 = 9700 \text{ c}^{-1}$ ($T_8 = 1/\lambda_8 = 0,103 \cdot 10^{-3} \text{ c}$).

Левой границе импульса реактивности соответствовали номер замера $N_1 = 12$, момент времени $t_1 = 0,048 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ и значение реактивности $\varepsilon_{MP1} = \varepsilon_1 = -9,279 \cdot 10^{-3}$; правой границе соответствовали значения $N_2 = 1569$, $t_2 = 6,276 \cdot 10^{-3} \text{ c}$, $\varepsilon_{MP2} = -8,006 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon_2 = -7,291 \cdot 10^{-3}$. Максимуму реактивности соответствовали значения $N_{\varepsilon_m} = 798$, $t_{\varepsilon_m} = 3,192 \cdot 10^{-3} \text{ c}$, $\varepsilon_m = 0,819 \cdot 10^{-3}$. Импульсы реактивностей ε и ε_{MP2} и мощности P показаны на рис. 4.

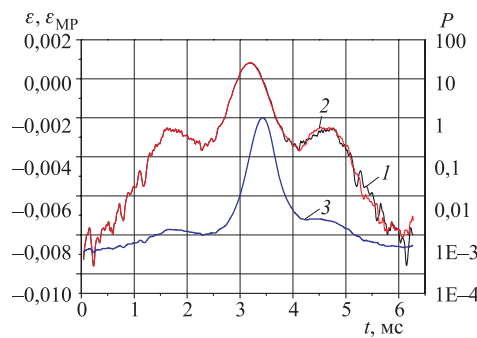


Рис. 4. Анализ с учетом дополнительных групп нейтронов, отраженных от элементов конструкции реактора обратно в активную зону. Зависимость от времени t реактивности модулятора ε_{MP} (1), реактивности реактора ε (2) и мощности P в относительных единицах (3)

Вариант 2. Предполагалось, что отраженные нейтроны не попадают в активную зону реактора и, следовательно, не участвуют в формировании им-

пульса мощности, но они попадают в камеру, предназначенную для измерения мощности реактора. Таким образом, предполагалось, что мощность реактора P измерялась с систематической ошибкой P_r , в результате чего мощность P_c , которую регистрировала камера, выше мощности реактора P на некоторую величину P_r , обусловленную отраженными в камеру нейтронами:

$$P = P_c - P_r. \quad (7)$$

Систематическая ошибка P_r описана двумя дифференциальными уравнениями первого порядка:

$$P_r = \sum_{j=1}^2 P_{rj}, \quad (8)$$

$$T_{rj} \frac{dP_{rj}}{dt} + P_{rj} = k_{rj} P,$$

где k_{rj} и T_{rj} — соответственно коэффициенты передачи и постоянные времени.

Для различных значений параметров k_{rj} и T_{rj} из уравнений (7), (8) и (2), (3) вычислялись мощность реактора P и интенсивность источников запаздывающих нейтронов S и по ним по формуле (5) вычислялась реактивность ε . Далее, как и в первом варианте, вычислялась реактивность модулятора реактивности ε_{MP} и по формуле (6) оценивалось отклонение ε от ε_{MP} .

Наименьшее среднеквадратическое отклонение $\sigma = 5,04 \cdot 10^{-4}$ получено при следующих значениях параметров: $k_{r1} = 0,013$; $k_{r2} = 0,153$; $T_{r1} = 0,45 \times$

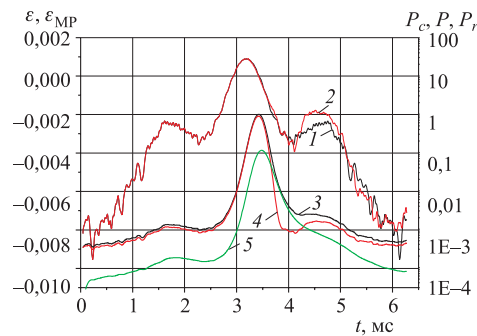


Рис. 5. Анализ с учетом нейтронов, отраженных от элементов конструкции реактора на детектор. Зависимость от времени t реактивности модулятора ε_{MP} (1), реактивности реактора ε (2), мощности, регистрируемой камерой, P_c (3), мощности реактора P (4) и систематической ошибки измерения камеры, обусловленной отраженными нейтронами, P_r (5). Все мощности в относительных единицах

10^{-3} с; $T_{r2} = 0,094 \cdot 10^{-3}$ с. При этом максимальное значение реактивности равно $\varepsilon_m = 0,895 \cdot 10^{-3}$.

Импульсы реактивностей ε и ε_{MP} и мощностей P , P_c и P_r показаны на рис. 5.

Вариант 3. В этом варианте отраженные нейтроны не учитывались. Однако предполагалось, что существует сверхбыстрая мощностная обратная связь, проявляющаяся в течение импульса мощности.

Рассмотрено следующее описание реактивности мощностной обратной связи ε_θ :

$$\varepsilon = \varepsilon_{MP} + \varepsilon_\theta,$$

$$\varepsilon_\theta = \sum_{j=1}^2 \varepsilon_{\theta j}, \quad (9)$$

$$T_{\theta j} \frac{d\varepsilon_{\theta j}}{dt} + \varepsilon_{\theta j} = k_{\theta j} P,$$

где $k_{\theta j}$ и $T_{\theta j}$ — коэффициенты передачи и постоянные времени двух составляющих мощностной обратной связи $\varepsilon_{\theta j}$ ($j = 1, 2$).

По формуле (5) вычисляли реактивность ε . Для различных значений параметров $k_{\theta j}$ и $T_{\theta j}$ по уравнениям (9) вычисляли ε_θ , а затем ε_{MP} .

С другой стороны, реактивность модулятора представляли в качестве симметричной функции $\tilde{\varepsilon}_{MP}$ относительно ее максимального значения: рост $\tilde{\varepsilon}_{MP}$ до максимума ε_{MP_m} принимали равным росту ε_{MP} , а спад $\tilde{\varepsilon}_{MP}$ — симметричным росту ε_{MP} .

Наименьшее значение среднеквадратического отклонения

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_2 - N_{\varepsilon m}} \sum_{N_{\varepsilon m}+1}^{N_2} (\tilde{\varepsilon}_{MP} - \varepsilon_{MP})^2} = 3,80 \cdot 10^{-4}$$

соответствовало следующим значениям параметров: $k_{\theta 1} = 1,09 \cdot 10^{-4}$ МВт $^{-1}$; $k_{\theta 2} = -0,23 \cdot 10^{-4}$ МВт $^{-1}$; $T_{\theta 1} = 1,29 \cdot 10^{-3}$ с; $T_{\theta 2} = 0,19 \cdot 10^{-3}$ с, т. е. при преобладании положительной составляющей обратной связи над отрицательной.

При этом наибольшее значение суммарной реактивности в импульсе равно $\varepsilon_m = 0,892 \cdot 10^{-3}$, а наибольшее значение ее составляющей, обусловленной модулятором реактивности, равно $\varepsilon_{MP_m} = 0,888 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 6 показан импульс мощности P и кривые реактивностей ε , ε_{MP} , $\tilde{\varepsilon}_{MP}$, ε_θ , а также $\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}_{MP} + \varepsilon_\theta$.

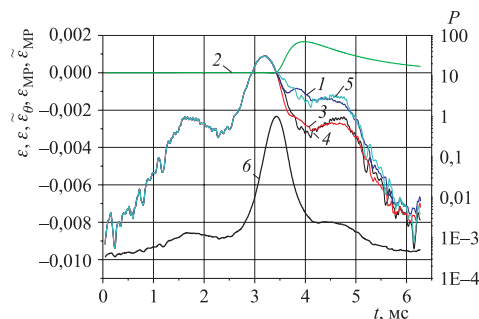


Рис. 6. Анализ с предположением о наличии сверхбыстрой мощностной обратной связи во время действия импульса мощности. Зависимость от времени t реактивности реактора ε (1), реактивности мощностной обратной связи ε_{θ} (2), реактивности модулятора ε_{MP} (3), реактивности модулятора как симметричной функции $\tilde{\varepsilon}_{MP}$ (4), реактивности реактора как суммы $\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}_{MP} + \varepsilon_{\theta}$ (5), мощности P реактора в относительных единицах (6)

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для анализа результатов *первого варианта* рассмотрим активную зону ИБР-2 (АЗ). Схематично АЗ изображена на рис. 7. Для защиты АЗ от обратного рассеяния тепловых нейтронов, вылетающих из замедлителей, последние отделены от АЗ тонкой прослойкой из карбида бора. Следовательно, основная доля нейтронов, вылетающих из замедлителей в сторону АЗ, поглощается карбидной прослойкой. Естественно, что полностью защитить АЗ от рассеянных в нее тепловых нейтронов невозможно. Например, в реальной конструкции АЗ в структуре стационарных отражателей, стоящих перед замедлителями со стороны АЗ, существует достаточно большое количество сквозных щелей, пазов и полостей, через которые тепловые нейтроны могут проникнуть в АЗ. Поэтому замедлители нейтронов можно рассматривать как один из реальных источников так называемых «комнатных» нейтронов. Кроме того, АЗ вместе с замедлителями окружены бетонной защитой первого кольца (на рис. 7 это не отражено). Технологически АЗ помещена в центр бетонной защиты в полость радиусом 50 см. Таким образом, окружающая АЗ бетонная защита — второй реальный источник «комнатных» нейтронов. Из геометрических характеристик АЗ можно оценить характерные времена пролета дополнительных групп тепловых нейтронов от их источника до поверхности активной зоны, где эти нейтроны в основном и поглощаются. Можно оценить также и соотношение интенсивности тепловых нейтронов от указанных источников на поверхности АЗ. Время пролета тепловых нейтронов в данном анализе складывается из времени формирования импульса тепловых

нейтронов (время термализации и диффузии) и собственно времени пролета до АЗ. Время диффузии тепловых нейтронов в водяном замедлителе и бетонной защите бралось, соответственно, равным 60 и 400 мкс.

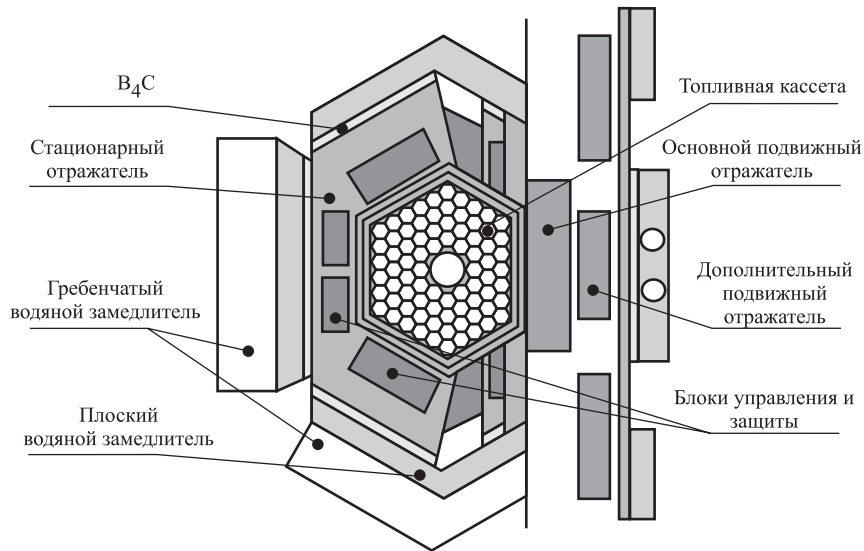


Рис. 7. Схематичный разрез активной зоны ИБР-2 с подвижным отражателем ПО-2М

В таблице приведены численные оценки параметров двух групп «комнатных» нейтронов, полученных из анализа формы импульса мощности и из анализа интенсивности обратного рассеяния нейтронов на замедлителе и бетонной защите. Расчетные значения получены из анализа формы импульса и геометрии активной зоны. $\mu_i = \beta_i/\beta$, $T_i = 1/\lambda_i$, λ_i — соответственно относительная доля, постоянная времени и постоянная распада источников «комнатных» нейтронов.

Параметры двух групп «комнатных» нейтронов

Параметр	Оценка из формы импульса	Оценка из геометрии АЗ
$T_7 = 1/\lambda_7$, с	$0,585 \cdot 10^{-3}$	$0,485 \cdot 10^{-3}$
$T_8 = 1/\lambda_8$, с	$0,103 \cdot 10^{-3}$	$0,109 \cdot 10^{-3}$
μ_7	0,0138	—
μ_8	0,078	—
μ_8/μ_7	4,3	4,9

Из таблицы видно, что замедлители, окружающие активную зону, и первый слой кольцевой бетонной защиты могут быть реальными источниками двух групп «комнатных» нейтронов. При этом не учитывается влияние разогрева реактора во время действия импульса мощности.

Второй вариант в данном анализе имеет чисто академический характер, поскольку в ^{232}Th -камере деления тепловые и резонансные нейтроны не могут быть зарегистрированы. Этот вариант обработки данных может быть использован в будущем для анализа процессов, зарегистрированных, например, с помощью токового сцинтилляционного детектора, где практически невозможно исключить гамма-компоненту тока детектора в смешанном реакторном излучении.

В третьем варианте анализа сделано предположение, что замедление спада реактивности обусловлено сверхбыстрой положительной обратной связью реактивности, описываемой двумя инерционными звеньями. Ранее сверхбыстрая связь не учитывалась, а если ее эффект и предполагался существенным, то только отрицательным, обусловленным, например, расширением топлива [4]. Причина возможного появления эффекта положительной обратной связи неясна. Он не может быть объяснен положительным эффектом Доплера, оценка которого для реактора ИБР-2 составляет всего лишь $2,5 \cdot 10^{-7}$ абсолютных единиц реактивности на 1°C . По сравнению с первым вариантом третий вариант менее вероятен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ формы импульса реактора ИБР-2, измеренной в полном динамическом диапазоне изменения нейтронного потока, позволяет сделать следующие выводы.

- Наилучшее описание динамики реактора в течение импульса мощности достигается в случае, когда к уравнениям кинетики, учитывающим шесть групп запаздывающих нейтронов, добавлены два аналогичных уравнения, описывающих влияние еще двух групп нейтронов, отраженных от элементов конструкции реактора. Наиболее вероятными источниками дополнительных групп нейтронов могут быть замедлители нейтронов, окружающие активную зону, и ближайшее к зоне кольцо биологической бетонной защиты.
- Несколько худшие результаты получены в модели, учитывающей влияние мощностной обратной связи в импульсе. Возможность проявления эффекта быстрой положительной обратной связи неочевидна и неясна, поэтому требует дополнительного изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пепельшев Ю. Н. и др.* Физический пуск реактора ИБР-2. Измерение формы импульса мощности. Сообщение ОИЯИ Р13-12194. Дубна, 1979.
2. *Ананьев В. Д. и др.* Пуск и исследования основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа. Сообщение ОИЯИ Р13-2004-156. Дубна, 2004.
3. *Кипин Дж. Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1967.
4. *Попов А. К.* Переходные процессы в реакторе ИБР-2 при самопроизвольном снижении скорости дополнительного подвижного отражателя. Сообщение ОИЯИ Р3-91-512. Дубна, 1991.

Получено 21 ноября 2005 г.

Корректор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 24.01.2006.

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

Усл. печ. л. 0,88. Уч.-изд. л. 1,07. Тираж 305 экз. Заказ № 55191.

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

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/