

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.039.526

АНАЛИЗ АЗИМУТАЛЬНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОЛЯ НЕЙТРОНОВ БН-600 ПО ИЗМЕРЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНОВ СУЗ

*Карпенко А.И., Тучков А.М., Широковских И.А.
(Белоярская АЭС им. И.В. Курчатова)*

Проектом БН-600 не предусмотрена система контроля неравномерности энерговыделения по активной зоне и в целом по реактору. Опыт эксплуатации показал, что, во-первых, нельзя обойтись без расчетного энерговыделения в отдельных ТВС, находящихся при рабочих условиях, близких к предельно допустимым, во-вторых, наблюдается изменяющаяся от микрокампании к микрокампании неравномерность энерговыделения по петлям первого контура (до 9%) [1] при отсутствии полного локального контроля температуры теплоносителя на выходе из ТВС из-за специфического расположения термоэлектрических преобразователей над активной зоной. Поэтому предлагается метод анализа неравномерности распределения плотности потока нейтронов (Φ) по азимуту активной зоны на основе измеренной эффективности органов СУЗ.

В работе [2] показано, что использование с этой целью относительных значений эффективности органов СУЗ упрощает задачу, так как дает возможность исключить из анализа функцию ценности нейтронов деления (Φ^*). Действительно, эффективность поглощающего органа ρ можно представить в виде $\rho = a\Phi^2 + \Delta\rho$, где a — коэффициент пропорциональности; $\Delta\rho$ — поправка к эффективности органа СУЗ, связанная с некорректностью перехода от $\Phi\Phi^*$ к Φ^2 .

При переходе к относительной эффективности органов с погрешностью $\sim 1\%$ [3] получим

$$\frac{\rho_i}{\rho} = \frac{a_i\Phi_i^2 + \Delta\rho_i}{a\Phi^2 + \Delta\rho} = \frac{\Phi_i}{\Phi} \sqrt{\frac{1 + \Delta\rho/a_i\Phi_i^2}{1 + \Delta\rho/a\Phi^2}} = \frac{\Phi_i}{\Phi} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta\rho_i}{a_i\Phi_i^2}\right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta\rho}{a\Phi^2}\right). \quad (1)$$

Вследствие того, что относительные погрешности измерения эффективности всех компенсирующих органов $\Delta\rho_i/\rho_i$ почти равны [4], можно записать соотношение $\Delta\rho_i/a_i\Phi_i^2 \sim \Delta\rho/a\Phi^2$.

Окончательно уравнение (1) можно представить в виде

$$\frac{\rho_i}{\rho} \sim \frac{\Phi_i}{\Phi} \left[1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta\rho}{a\Phi^2}\right)^2\right]. \quad (2)$$

Приняв $\Delta\rho = 0,1$, т.е. $\rho = a\Phi^2$ справедливо с систематической ошибкой 10%, можно убедиться, что соотношение (2) преобразуется в

$$\sqrt{\rho_i/\rho} = \Phi_i/\Phi \quad (3)$$

с погрешностью перехода 0,25%.

Эффективность органов СУЗ БН-600 измеряется реактиметром с абсолютной суммарной ошибкой для всех компенсирующих органов $\pm 0,35\% \Delta k/k$ [4], что определяет относительную ошибку $\sqrt{\rho_i/\rho}$, равную $\delta = 2,6\%$. Анализировали результаты всех измерений эффективности компенсирующих органов в начале и конце микрокампаний, полученные персоналом отдела ядерной безопасности и надежности. В течение анализируемого времени в БН-600 использовались плавные и экспериментальные компенсирующие органы. Для обеспечения возможности количественного сравнения распределения $\sqrt{\rho_i/\rho}$ в соответствующих компоновках их эффективность приводили к одному выгоранию и к одной начальной загрузке поглотителя в соответствии с паспортными данными.

По условиям эксплуатации БН-600 компенсирующие органы в активной зоне постоянно расположены почти на одном уровне по высоте, что обеспечивает идентичную депрессию плотности потока нейтронов в месте их расположения. Кроме того, симметричная компоновка в активной зоне и относительная однородность распределенных в ней ядер, входящих в ее состав, позволяют выбрать удобный для анализа распределения относительный метод в r, φ -геометрии. Компенсирующие органы разделены на две группы: внутреннюю из шести и внешнюю из 12 в соответствии с радиусом размещения относительно центра активной зоны. В основном изучали распределение внешней группы, так как на периферии активной зоны заметнее градиенты распределения плотности потока нейтронов и числа компенсирующих органов достаточно для представительности полученных результатов [5].

Большая часть данных об эффективности компенсирующих органов получена для начала микрокампании, что не позволило проанализировать изменение распределения $\sqrt{\rho/\rho}$ в течение межперегрузочного цикла. Все распределения были подвергнуты статистическому анализу. Стохастическую независимость результатов проверяли с помощью критерия квадратов последовательных отношений [6]. С доверительной вероятностью 0,95 все эти распределения неслучайны.

Одним из основных выводов, сделанных при анализе распределения $\sqrt{\rho/\rho}$ компенсирующих органов внешней группы [5], было свидетельство о наличии депрессии Φ в области расположения рабочего сурьяно-бериллиевого фотонейтронного источника, вблизи которого располагаются 13-й и 14-й компенсирующий орган. В зависимости от компоновки активной зоны топливом в этом районе относительная депрессия Φ в различных микрокампаниях составляла 6—11%. Следует отметить, что в период выполнения данной работы в методике расчета активной зоны эта депрессия не описывалась. Естественно, что такая аномальная деформация и методология, с помощью которой она получена, требовали экспериментальной проверки.

Исследование перераспределения плотности потока нейтронов в активной зоне при изменении местоположения фотонейтронного источника было проведено перед началом 21-й микрокампании в условиях критического состояния реактора: мощность реактора 0,1% номинальной и плотность потока нейтронов от фотонейтронного источника пренебрежимо мала в сравнении с Φ в активной зоне; при этом эффективность компенсирующих органов измеряли методами сброса и перекомпенсации для двух случаев размещения фотонейтронного источника: штатного в ячейке 21—26 и в ячейке 13—08, ячейка 21—26 натриевая, т.е. без установки в нее какой-либо сборки.

Относительную эффективность компенсирующих органов определяли методом перекомпенсации в качестве дополнительного независимого способа для исключения различной трактовки результатов измерения эффективности методом сброса в условиях измененной эффективной интенсивности внешних источников нейтронов и ценности нейтронов.

В эксперименте корректно фиксировали критическое состояние реактора: движением компенсирующих органов и автоматического регулятора только вверх, что обеспечивало примерно одинаковый люфт приводов исполнительных механизмов; вывод большинства компенсирующих органов на верхние концевые выключатели и нижние жесткие упоры позволил снизить ошибку оценки критического состояния за счет уменьшения неопределенности в положении органов СУЗ по высоте активной зоны до ± 5 мм. При выгрузке фотонейтронного источника из ячейки 21—26 суммарная эффективность компенсирующих органов и автоматического регулятора уменьшилась на 0,19%. Эффект реактивности за счет выгрузки штатного фотонейтронного источника из активной зоны при жесткой фиксации большинства компенсирующих органов близок к $0,1 \pm 0,07\beta$.

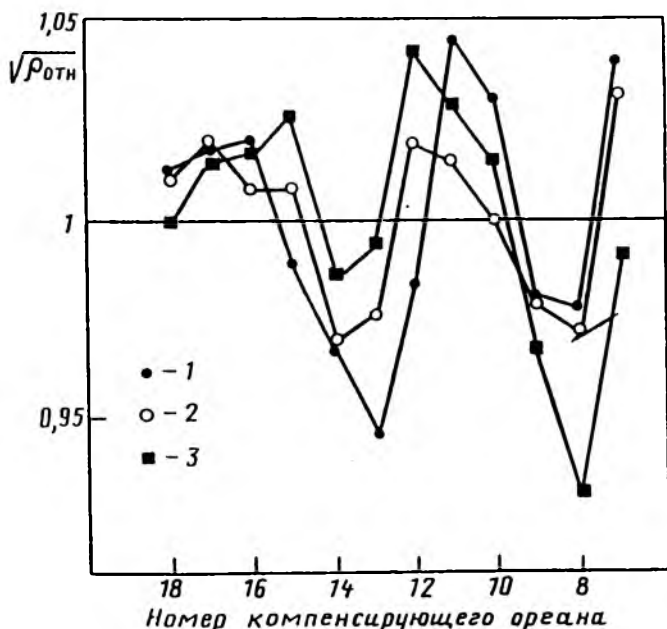
На рисунке показано относительное распределение эффективности компенсирующих органов внешней группы для различного местоположения фотонейтронного источника. Относительная депрессия поля нейтронов вблизи источника при штатном местоположении достигала 6% (кривая 1). Результаты измерения эффективности компенсирующих органов внешней группы после выгрузки источника из ячейки 21—26 показали, что деформация поля нейтронов в этом случае оказалась идентичной депрессии Φ при штатном положении (кривая 2). После перестановки фотонейтронного источника в ячейку 13—08 произошла деформация поля нейтронов таким образом, что вызвала депрессию Φ в месте его установки (8%), а на противоположной стороне активной зоны ее скомпенсировала (кривая 3).

Для реальных условий загрузки активной зоны в начале 21-й микрокампании и рассматриваемого в работе распределения был проведен расчет Φ с использованием комплекса программ ГЕФЕСТ [7]. Статистический анализ разности расчетного и экспериментального распределения показал, что с доверительной вероятностью 0,95 эта разность имеет случайный характер, т.е. в условиях БН-600 соотношение (3) справедливо.

Анализ результатов экспериментальных и расчетных исследований неравномерности плотности потока нейтронов в активной зоне БН-600 позволил сделать следующие выводы:

используемый метод анализа распределения плотности потока нейтронов в активной зоне по измеренной эффективности компенсирующих органов не требует больших трудозатрат и может быть использован для анализа возможных нештатных ситуаций, а также выявления возможных грубых ошибок в расчете компоновки активной зоны;

основным источником деформации плотности потока нейтронов при штатной нагрузке активной зоны является фотонейтронный источник в ячейке 21—26.



Измеренное азимутальное распределение относительной плотности потока нейтронов при перестановке фотонейтронного источника (начало 21-й микрокампании)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейнкман А.Г., Карпенко А.И., Лыжин А.А. и др. Исследование теплогидравлических характеристик реактора БН-600 Белоярской АЭС — Атомная энергия, 1987, т. 62, вып. 6, с. 375—379.
2. Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Экспериментальные методы физики реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Брошштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1986.
4. Баков А.Т., Евсеев А.Я., Иванов А.П. и др. Определение эффективности стержней СУЗ на реакторе БН-600. Информационные материалы. 4.1. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.
5. Блинов Ю.А., Карпенко А.И., Тучков А.М. Использование метода относительного взвешивания стержней СУЗ на БН-600 — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 1, с. 49—50.
6. Айвазян С.А. Статистические исследования зависимостей. М.: Металлургия, 1968.
7. Зизин М.Н. НФБН — комплекс программ для внештатных и эксплуатационных нейтронно-физических расчетов реакторов типа БН-600 в трехмерной геометрии. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1985, вып. 9, с. 56—62.

Поступило в Редакцию 23.11.92

УДК539.172.16

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ МЕТОДОМ АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРОФИЛЕЙ ТРАНСМУТАЦИОННЫХ НУКЛИДОВ

Дидик В.А., Малкович Р.Ш., Скорятин Е.А. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук), Козловский В.В. (НИИ «Гириконд»)

Облучение твердого тела высокоэнергетичными заряженными частицами приводит к формированию профилей трансмутационных нуклидов, возникающих в результате ядерных реакций между частицами и ядрами матрицы [1]. Форма и количественные характеристики таких профилей в существенной мере определяются энергетической зависимостью сечения ядерных реакций $\sigma(E)$ [2]. В настоящей работе профили трансмутационных радиоактивных нуклидов, образованных при облучении полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ (GaAs, GaP) [2] и сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) [3] ядрами ^4He , были использованы для определения зависимости $\sigma(E)$.

Облучение проводилось на циклотроне МГЦ-20 [4]. Использовали плоскопараллельные образцы, размещаемые на водоохлаждаемом латунном держателе. Диаметр пучка 1,1 см, энергия частиц 20 МэВ, плотность потока $6 \cdot 10^{11}$ или $1,2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, время облучения от 1 до 5 ч, монохроматичность пучка не хуже 5%. Профили находили путем механического снятия слоев толщиной от 2 до 10 мкм и измерения их γ -активности калиброванным гамма-спектрометром с Ge(Li)-детектором.

Исследовали профили ^{71}As , ^{72}As и ^{74}As в GaAs и GaP, а также ^{66}Ga и ^{67}Ga в YBCO (рис. 1), образованных по реакциям [5] $^{69}Ga(\alpha, 2n)^{71}As$ (порог реакции 16 МэВ), $^{69}Ga(\alpha, n)^{72}As$ (7,1 МэВ), $^{71}Ga(\alpha, n)^{74}As$ (5,2 МэВ), $^{63}Cu(\alpha, n)^{66}Ga$ (8,2 МэВ), $^{65}Cu(\alpha, 2n)^{67}Ga$ (15 МэВ).

Сечение определяли по соотношению $C(x) = N \Phi \sigma(x) \lambda^{-1} [1 - \exp(-\lambda t)]$, где $C(x)$ — концентрация радионуклида (в момент окончания облучения); N — концентрация стабильного изотопа матрицы; Φ — плотность потока частиц; λ — постоянная распада радионуклида; t — дли-

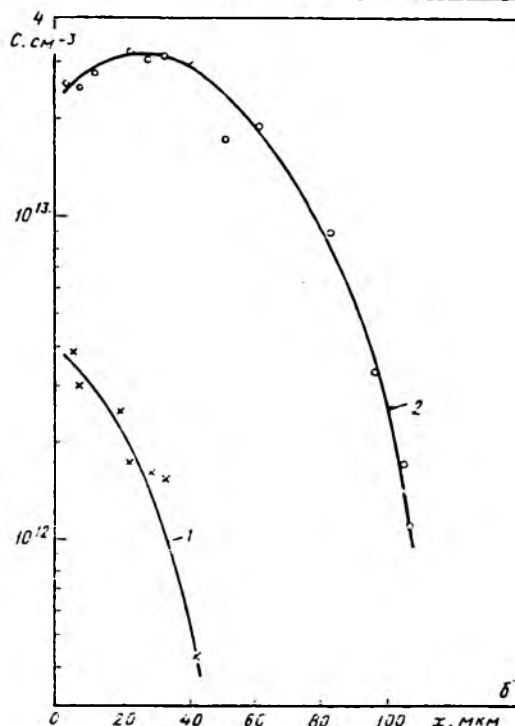
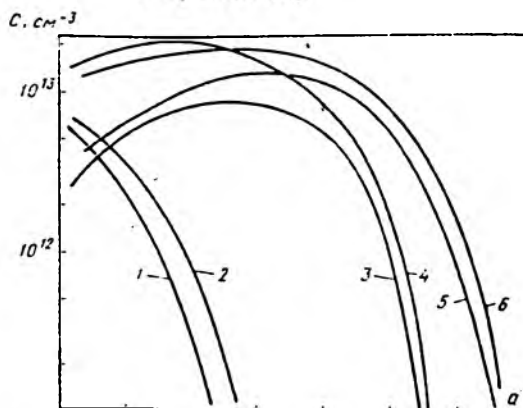


Рис. 1. Профили GaAs (1, 3, 4), GaP (2, 5, 6), ^{71}As (1, 2), ^{74}As (3, 5), ^{72}As (4, 6) (a) и YBCO (б): 1 — ^{67}Ga , 2 — ^{66}Ga