

использованный для усреднения $\nu\sigma_a$, вычисляется без учета отклонения от закона $1/v$.

Описанный метод может оказаться полезным с двух точек зрения. Во-первых, при разумном способе уточнения функций $Q_E(r)$ можно, по-видимому, получить весьма подробную информацию о пространственном, угловом и энергетическом распределении нейтронов в ячейке. Следует, однако, учитывать, что такой расчет требует значительных затрат машинного времени. С другой стороны, при расчете реактора основной интерес представляют интегральные характеристики тепловой группы, для получения которых можно попытаться использовать первое приближение. Необходимо лишь убедиться, что первое приближение дает приемлемый результат, если Q_E зависит от r так же, как и замедляющая способность. Последнее обстоятельство можно выяснить при помощи P_2 -приближения, в то время как при массовом счете задач (в первом приближении) для решения уравнений (7) разумнее использовать интегральные методы, т. е. метод Амуаяля — Бенуа — Горовица [5] и метод вероятности первого столкновения [6]. Интегральные методы в большинстве случаев дают более высокую точность (при меньших затратах времени), чем P_2 -приближение, однако их использование во втором и последующих приближениях невозможно, так как они не допускают пространственной неоднородности источников.

Следует отметить, что отношение плотности нейтронов в топливе и замедлителе является «студкой» функцией энергии, исключение составляет область резонанса. Поэтому, чтобы получить первое приближение, достаточно решить моноэнергетическое уравнение лишь в очень небольшом числе энергетических точек, а затем воспользоваться интерполяцией. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента

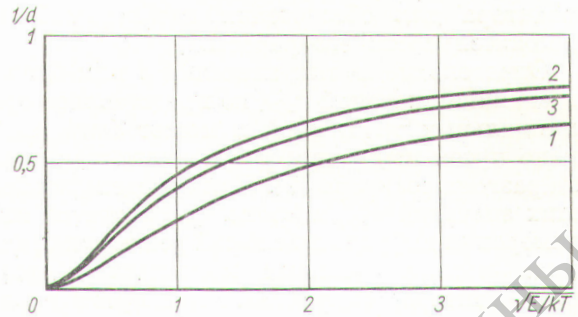


Рис. 2. Зависимость $1/d$ от E для трех ячеек (цифры у кривых указывают номера ячеек, приведенных в табл. 1).

проигрыша

$$d(E) = \frac{\psi_1(E) V_1}{\psi_0(E) V_0}$$

от энергии (V_1 и V_0 — объемы замедлителя и топлива) для первых трех вариантов.

В заключение автор выражает признательность Г. А. Бать за полезные дискуссии и Ю. П. Пущкаревой, С. В. Обуховой и А. С. Дроздовой за проведение расчетов.

Поступила в Редакцию 11/XI 1965 г.

В окончательной редакции 28/III 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Вейнберг, Е. Вигнер. Физическая теория ядерных реакторов. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
2. Н. Нонеск. Nucl. Sci. and Engng, 8, 49 (1964).
3. Г. А. Бать и др. Доклад № 373, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
4. Z. Weiss, I. Stammer. Nucl. Sci. Engng, 19, 374 (1964).
5. А. Амуаяль, П. Бенуа, Дж. Горовиц. В сб. «Некоторые вопросы ядерной энергетики». Под ред. М. А. Стариковича. М., Изд-во иностр. лит., 1959, стр. 237.
6. J. Fukai. Nucl. Sci. Engng, 13, 345 (1962).

Определение эффективного коэффициента размножения нейтронов по измеренной дифференциальной реактивности

Г. С. Лидейкин, Б. П. Шихин

УДК 621.039.51

Устанавливается соотношение между эффективным коэффициентом размножения нейтронов в реакторе и экспериментальным значением запаса реактивности, определенным по измерениям дифференциальной реактивности. Поправочные члены определены в интегральной форме.

Экспериментальная проверка эффективного коэффициента размножения нейтронов $k_{эфф}$ или запаса реактивности $\rho = 1 - \frac{1}{k_{эфф}}$ реактора является важной задачей, так как знание начального значения $k_{эфф}$ позволяет оценивать правительность выбранного состава активной зоны

реактора для обеспечения необходимой продолжительности его работы.

Определение малых значений ρ или близких к единице значений $k_{эфф}$ не представляет принципиальных трудностей и может быть выполнено путем измерения установившегося периода разгона реактора [1]. При определении больших значений $k_{эфф}$ широко используется метод измерения дифференциальной реактивности для ряда последовательных критических состояний реактора, осуществляемых путем изменения геометрии, состава активной зоны и т. д. В частности, широко используется такая постановка эксперимента, при которой измеряется дифференциальная реактивность, связанная с изменением высоты активной зоны $\left(\frac{d\rho}{dH}\right)$ [2].

При этом последовательные критические состояния реактора для разных значений высоты активной зоны обеспечиваются путем изменения ее радиуса или концентрации поглотителя. Однако достаточно строгий переход от измеренных значений дифференциальной реактивности к полному запасу реактивности или значению $k_{эфф}$ связан с принципиальными трудностями, так как промежуточные значения дифференциальной реактивности определяются, вообще говоря, для активной зоны, отличающейся от исследуемой по составу или геометрии [3].

В настоящей работе устанавливается связь экспериментальных значений дифференциальной реактивности по любому параметру компенсации с полным запасом реактивности или значением $k_{эфф}$ реактора и дается общий критерий оценки поправочных членов, учитывающих отличие активной зоны в промежуточных критических состояниях, в которых измеряется дифференциальная реактивность, от активной зоны, для которой необходимо определить $k_{эфф}$ или ρ . Анализируется величина поправочных членов при конкретных условиях эксперимента для «голового» реактора в одногрупповом диффузионном приближении. Параметрами компенсации z_i будем называть все величины, при изменении которых в процессе эксперимента может изменяться значение $k_{эфф}$ реактора (в частности, параметрами компенсации могут быть геометрический размер активной зоны, концентрация поглотителя, температура и т. д.). Очевидно, что $k_{эфф}$ и ρ можно рассматривать как функции указанных параметров компенсации:

$$k_{эфф} = k_{эфф}(z_i); \quad \rho = \rho(z_i).$$

Тогда набор параметров компенсации, при котором осуществляется критическое состоя-

ние реактора, может быть определен из уравнений

$$k_{эфф}(z_i) = 1; \quad \rho(z_i) = 0. \quad (1)$$

Дифференциальная реактивность по параметру компенсации определяется по формуле

$$\frac{d\rho(z_i)}{dz_k}$$

Как правило, в условиях реального эксперимента имеют дело с изменением двух параметров компенсации, по одному из которых измеряют дифференциальную реактивность, а за счет другого приводят реактор в новое критическое состояние. Так, например, при измерении $d\rho/dH$, где H — высота активной зоны, критичность для различных значений H достигается путем изменения радиуса активной зоны или концентрации поглотителя. В связи с этим при дальнейшем рассмотрении будем учитывать два параметра компенсации, хотя описываемая методика легко может быть распространена на случай любого числа параметров компенсации.

Запишем выражение для дифференциальной реактивности по параметру z_1 при учете только двух параметров компенсации z_1 и z_2 в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\rho(z_1, z_2)}{dz_1} &= \frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2)} \cdot \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2)}{\partial z_1} + \\ &+ \frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2)} \cdot \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2)}{\partial z_2} \cdot \frac{dz_2}{dz_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Из условий эксперимента по измерению величины $\frac{d\rho(z_1, z_2)}{dz_1}$ следует, что $\frac{dz_2}{dz_1} \equiv 0$, так как в процессе однократного измерения параметр компенсации z_2 остается постоянным. С учетом этого выражение (2) для измеряемой дифференциальной реактивности в однократном измерении можно записать в виде

$$\frac{d\rho(z_1, z_2)}{dz_1} = \frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2)} \cdot \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2)}{\partial z_1}. \quad (3)$$

Величина $\frac{d\rho(z_1, z_2)}{dz_1}$ может быть измерена для нескольких значений параметра z_1 в диапазоне его изменения от значения z_1^1 , определяемого условием

$$k_{эфф}(z_1^1, z_2^0) = 1, \quad (4)$$

до значения z_1^0 , определяемого из условия

$$k_{эфф}(z_1^0, z_2^1) = 1, \quad (5)$$

где z_1^0, z_2^0 — значения параметров z_1 и z_2 , соответствующие реактору, для которого опреде-

дается $k_{эфф}$. Значения параметра z_2 , соответствующие промежуточным значениям z_1 , которые используются при измерении величины $\frac{d\rho_0}{dz_1}(z_1, z_2)$, определяются из условия критичности

$$k_{эфф}(z_1, z_2) = 1. \quad (6)$$

Тогда экспериментальное значение полного запаса реактивности, связанное с изменением параметра z_1 в диапазоне $z_1^1 \div z_1^0$, будет равно

$$\rho_0 = \int_{z_1^1}^{z_1^0} \frac{d\rho_0(z_1, z_2)}{dz_1} dz_1. \quad (7)$$

С учетом (3) выражение (7) можно записать в виде

$$\rho_0 = \int_{z_1^1}^{z_1^0} \frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2)} \cdot \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2)}{\partial z_1} dz_1. \quad (8)$$

Разложим подынтегральную функцию в ряд Тейлора по степеням отклонения параметра z_2 от его значения, соответствующего исследуемому реактору $z_2 = z_2^0$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2)} \cdot \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2)}{\partial z_1} &= \frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2^0)} \times \\ &\times \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2^0)}{\partial z_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(z_2 - z_2^0)^n}{n!} \cdot \frac{\partial^n}{\partial z_2^n} \times \\ &\times \left[\frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2)} \cdot \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2)}{\partial z_1} \right]_{z_2=z_2^0}. \end{aligned} \quad (9)$$

Строгое доказательство применимости разложения (9) можно провести для любого конкретного эксперимента, если известна аналитическая зависимость $k_{эфф}$ от параметров компенсации.

Разложение (9) возможно в том случае, если остаточный член

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{(z_2 - z_2^0)^{n+1}}{(n+1)!} \cdot \frac{\partial^{n+1}}{\partial z_2^{n+1}} \times \\ &\times \left[\frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2)} \cdot \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2)}{\partial z_1} \right]_{z_2=\xi} \\ &(\xi \text{ между } z_2 \text{ и } z_2^0) \end{aligned}$$

стремится к нулю при $n \rightarrow \infty$. Подставив выражение (9) в (8) и проинтегрировав, получим

$$\rho_0 = \frac{1}{k_{эфф}(z_1^1, z_2^0)} - \frac{1}{k_{эфф}(z_1^0, z_2^0)} + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_n, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \rho_n &= \int_{z_1^1}^{z_1^0} \frac{(z_2 - z_2^0)^n}{n!} \cdot \frac{\partial^n}{\partial z_2^n} \times \\ &\times \left[\frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2)} \cdot \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2)}{\partial z_1} \right]_{z_2=z_2^0} dz_1 \end{aligned} \quad (11)$$

есть поправочный член n -го порядка.

Заметим, что в выражении (10) $k_{эфф}(z_1^0, z_2^0)$ является искомой величиной эффективного коэффициента размножения нейтронов исследуемого реактора, которую обозначим $k_{эфф}^0$. Тогда с учетом (4) получим соотношение для определения $k_{эфф}^0$ по измеренному запасу реактивности ρ_0 :

$$\rho_0 = \rho_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \rho_n, \quad (12)$$

где ρ_n — величина поправки n -го порядка, определяемая соотношением (11); $\rho_0 = 1 - \frac{1}{k_{эфф}^0}$. Рассмотрим выражение (11), определяющее величину поправочного члена ρ_n . Из (11) видно, что для оценки значения ρ_n в конкретном эксперименте необходимо знать закон изменения параметра z_2 при изменении z_1 в диапазоне $z_1^1 \div z_1^0$, а также величины

$$\frac{\partial^n}{\partial z_2^n} \left[\frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2)} \cdot \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2)}{\partial z_1} \right]_{z_2=z_2^0}. \quad (12a)$$

Закон изменения z_2 определяется непосредственно в процессе эксперимента с учетом условия критичности (6). Характер изменения выражения (12a) может быть получен из серии статических расчетов величины $k_{эфф}(z_1, z_2)$ при различных значениях параметра компенсации z_1 . Следует отметить, что соотношение (12) между экспериментальным значением запаса реактивности и расчетной величиной $k_{эфф}^0$, а также выражение для поправочных членов (11) справедливы для реакторов любого типа и не зависят от метода расчета $k_{эфф}^0$. В тех случаях, когда имеется явная аналитическая зависимость $k_{эфф}$ от параметров компенсации, определение поправочных коэффициентов существенно облегчается.

В качестве примера использования полученных результатов оценим величину поправочных членов для двух наиболее распространенных экспериментов по определению запаса реактивности реактора. Оба метода связаны с измерением дифференциальной реактивности в зависимости от высоты активной зоны. При

каждой новой высоте активной зоны критичность достигается либо путем изменения ее радиуса, либо за счет изменения концентрации поглотителя. Если предположить, что в рассматриваемом случае применима модель «голо-го» гомогенного реактора в одногрупповом диффузионном приближении, то выражение для $k_{эфф}$ можно представить в виде

$$k_{эфф} = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_c [1 + (\kappa_R^2 + \kappa_H^2) M^2]}, \quad (13)$$

где Σ_f , Σ_c — макроскопические сечения деления и поглощения нейтронов в реакторе; ν — выход нейтронов деления; κ_R^2 , κ_H^2 — радиальный и высотный геометрические параметры реактора; M^2 — площадь миграции нейтронов в реакторе.

Предполагается, что Σ_c не зависит от $\nu \Sigma_f$ в пределах тех изменений параметров реактора, которые осуществляются в процессе проведения эксперимента.

Если критичность реактора при каждой новой высоте активной зоны достигается изменением ее радиуса, то параметром компенсации z_1 является величина $\kappa_H^2 M^2$, а параметром компенсации z_2 — величина $\kappa_R^2 M^2$. Тогда (13) можно записать в виде

$$k_{эфф} = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_c (1 + z_1 + z_2)}. \quad (13a)$$

Так как из выражений (11) и (13a) следует, что $\rho_n = 0$, получаем соотношение для определения $k_{эфф}^0$

$$\rho_0 = \rho_a. \quad (14)$$

Если критичность обеспечивается изменением поглощения в активной зоне, то параметром компенсации z_1 по-прежнему остается $\kappa_H^2 M^2$, а z_2 — величина Σ_c . Тогда выражение (13) примет вид

$$k_{эфф} = \frac{\nu \Sigma_f}{z_2 (1 + z_1 + \kappa_R^2 M^2)}. \quad (13b)$$

С учетом (13b) получим

$$\frac{1}{k_{эфф}^2(z_1, z_2)} \cdot \frac{\partial k_{эфф}(z_1, z_2)}{\partial z_1} = -\frac{z_2}{\nu \Sigma_f}. \quad (15)$$

Первая производная от (15) по второму параметру компенсации равна $-\frac{1}{\nu \Sigma_f}$, а производные более высокого порядка равны нулю, т. е.

$$\rho_2 = \rho_3 = \dots = \rho_n = 0. \quad (15a)$$

Найдем с учетом условия (6) первый поправочный член ρ_1 :

$$\begin{aligned} \rho_1 = & - \int_{z_1^0}^{z_1^1} (z_2 - z_2^0) \frac{dz_1}{\nu \Sigma_f} = - \int_{z_1^0}^{z_1^1} \frac{dz_1}{1 + \kappa_R^2 M^2 + z_1} + \\ & + \frac{z_2^0}{\nu \Sigma_f} \int_{z_1^0}^{z_1^1} dz_1 = - \ln \frac{1 + \kappa_R^2 M^2 + z_1^1}{1 + \kappa_R^2 M^2 + z_1^0} + \\ & + \frac{z_2^0 (z_1^0 - z_1^1)}{\nu \Sigma_f} = \ln k_{эфф}^0 - \rho_0. \end{aligned} \quad (15b)$$

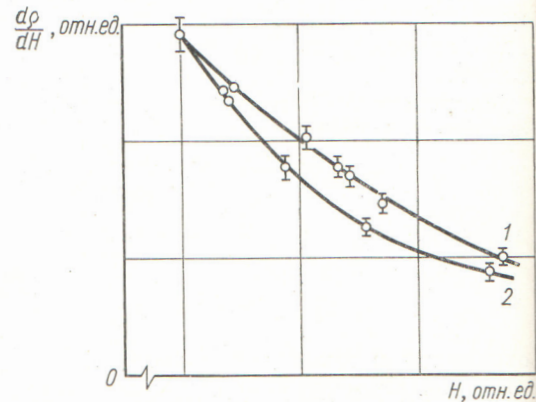
Тогда соотношение (12) для определения $k_{эфф}^0$ примет вид

$$k_{эфф}^0 = \exp \rho_a. \quad (16)$$

Таким образом, в зависимости от метода экспериментального определения полного запаса реактивности реактора получаются различные соотношения между расчетными и экспериментальными значениями.

Диффузионная одногрупповая модель гомогенизированного реактора нередко используется для трактовки экспериментальных результатов, связанных с определением реактивностей. При этом влияние отражателя, как правило, сводится к соответствующему увеличению размеров активной зоны реактора. В таком представлении выводы, полученные для «голо-го» реактора, можно распространить и на реакторы с отражателем.

Отмеченная выше зависимость экспериментальных результатов от способов компенсации избыточной реактивности наблюдается экспе-



Зависимость дифференциальной реактивности $d\rho/dH$ от высоты H уровня воды в активной зоне реактора:

1 — компенсация изменением равномерно распределенного поглотителя; 2 — компенсация изменением радиальной утечки нейтронов из активной зоны реактора.

риментально. На рисунке приводятся экспериментальные значения дифференциальной реактивности dp/dH от высоты уровня воды H в активной зоне реактора, обладающего сложным спектром нейтронов.

Согласно одногрупповой модели, запас реактивности реактора определяется интегрированием по кривой 2 [формула (14)]. Непосредственное интегрирование по кривой 1 дает завышенное значение запаса реактивности системы на 10—15%. Однако применение в данном случае формулы (16) позволяет получать результаты, совпадающие с результатом интегрирования по нижней кривой.

Поступила в Редакцию 12/V 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Liewers. Kernenergie, Н.8, 593 (1961).
2. С. Красик, А. Радковский. В кн. «Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955)». Т. 5. М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 248.
3. А. Ненгу. Nucl. Sci. and Engng, 3, 52 (1958).

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ

Рукописи для журнала должны удовлетворять перечисленным ниже требованиям. Материалы, не отвечающие этим требованиям, не принимаются. Отклоненные статьи не возвращаются.

1. Тексты и иллюстративные материалы представляются в трех экземплярах в окончательно отработанном для печати виде и должны быть подписаны всеми авторами.

После подписей авторов должны быть указаны: фамилия, имя и отчество полностью, домашний адрес и номер телефона.

2. Объем обзорных статей, как правило, не должен превышать 20—22 стр., оригинальных статей — 10—12 стр., аннотаций депонированных статей — 2 стр., писем в редакцию — 5 стр. машинописного текста (включая рисунки и список литературы).

3. Текст рукописи должен быть напечатан на машинке через два интервала на одной стороне листа, с полями с левой стороны не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

4. К статьям и письмам в редакцию прилагаются краткие авторефераты, в которых следует коротко и ясно сформулировать цель, результаты и область практического применения работы, а также перевод названия на английский язык.

5. Оформление текста (написание формул, выделение греческих и латинских, строчных и прописных букв, сокращение слов, оформление цитируемой литературы и т. д.) производится в соответствии с общими правилами, принятыми для научно-технических журналов. Трудноразличимые в рукописном обозначении буквы и знаки поясняются на полях.

Размерность всех приведенных величин должна соответствовать Международной системе единиц измерений. В отдельных случаях могут быть приведены пересчетные формулы.

6. Рисунки выполняются черной тушью на бумаге размером 15 × 20 см; фотографии должны иметь контрастное изображение; размер фотографий не менее 9 × 12 см. Подрисовочные подписи должны быть напечатаны на отдельном листе.