

функция зависимости выхода фотонейтронов (нейтр./с) на 1 кг UO_2 при энергонапряженности топлива 1 кВт/кг, содержании бериллия 10^{-4} масс.% и различных кампаниях топлива T . Временная зависимость выхода фотонейтронов при выдержке больше 5 сут обусловлена в основном активностью ^{140}La , а при выдержке свыше 60 сут активностью более долгоживущих радионуклидов ^{106}Rh и ^{144}Pr . Вследствие этого основное различие в ходе кривых для разных кампаний проявляется при $t > 60$ сут. Выход фотонейтронов за счет активации конструкционных материалов пренебрежимо мал.

На рис. 2 представлена зависимость отношения выходов нейтронов $Q_{\gamma,n}/(Q_{\alpha,n} + Q_f)$ [$Q_{\alpha,n}$, Q_f — соответственно выход нейтронов (α , n)-реакции и нейтронов спонтанного деления] для окисного топлива энергетического реактора типа ВВЭР-440 с энергонапряженностью топлива $P = 33$ кВт/кг в зависимости от выгорания топлива. Концентрация бериллия $10^{-4}\%$. Вклад фотонейтронов в собственное нейтронное излучение становится преобладающим при невысоком выгорании (≤ 2500 МВт·сут/т) и уменьшается с ростом выгорания. Это объясняется тем, что выход фотонейтронов обусловлен активностью продуктов деления, которая быстро достигает состояния насыщения, а выход нейтронов спонтанного деления и нейтронов (α , n)-реакции увеличивается с ростом выгорания топлива за счет накопления радионуклидов плутония. С увеличением выдержки после окончания облучения вклад фотонейтронов уменьшается вследствие распада продуктов деления.

Очевидно, влиянием выхода фотонейтронов при контроле воспроизводства плутония можно пренебречь, если концентрация примеси бериллия удовлетворяет неравенству

$$\rho_{Be} \leq 0,01 \frac{Q_{\alpha,n} + Q_f}{P_f(T, t)} \quad (3)$$

Упрощая его при малом выгорании, получаем удобное выражение для определения предельно допустимой концентрации бериллия:

$$\rho_{Be} \leq 5 \cdot 10^{-4} \frac{\sigma_c^8(E) \rho^8}{\sigma_f^5(E) \rho^5} \frac{T}{f(T, t)} \quad (4)$$

Здесь $\sigma_c^8(E)$, $\sigma_f^5(E)$ — соответственно эффективные сечения радиационного захвата ^{238}U и деления ^{235}U , усредненные по энергетическому спектру нейтронов реактора; ρ^8 , ρ^5 — концентрации ядер ^{238}U и ^{235}U ; T — длительность кампании, сут; ρ_{Be} — концентрация бериллия, выраженная в единицах 10^{-4} масс.%; функция $f(T, t)$ представлена на рис. 1.

Анализируя радиоизотопный состав топлива и эффективные сечения σ_c^8 и σ_f^5 для тепловых и быстрых

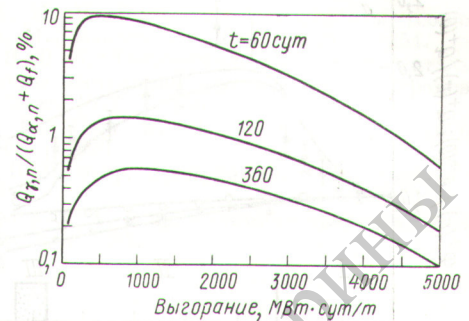


Рис. 2. Зависимость отношения выходов нейтронов при различном времени выдержки после окончания облучения

реакторов АЭС, приходим к заключению, что содержание примеси бериллия в двуокисных твэлах не должно превышать 10^{-4} масс.%. При этом время выдержки твэлов с точки зрения аналитического контроля на содержание плутония составляет ~ 3 месяца. Если же $\rho_{Be} \sim 10^{-3}$ масс.%, то время выдержки должно быть увеличено до двух лет.

В заключение авторы выражают благодарность Б. Г. Дубовскому за постановку задачи.

Поступило в Редакцию 10/IX 1975 г.
В окончательной редакции 26/II 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keepin G. e.a. In: Proc. IAEA Symp. «Safeguards Techniques». Karlsruhe, 6—10 July 1970, SM-133/49.
2. Христов В., Трифонов А. «Докл. Болг. АН», 1973, т. 26, с. 1611.
3. Ganivet M. e.a. In: Proc. IAEA Symp. «Analytical Methods in the Nuclear Fuel Cycle». Vienna, 26 Nov. — 3 Dec. 1971, SM-1493/44.
4. Rein J. e.a. Ibid., SM-149/39.
5. Займовский А. С., Калашников В. Н., Головин И. С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов. М., Атомиздат, 1966.
6. Jakobson M. «Phys. Rev.», 1961, v. 123, p. 229.
7. Бергельсон Б. Р., Зориков Г. А. Справочник по защите от излучений протяженных источников. М., Атомиздат, 1965.
8. Гусев Н. Г. и др. Радиационные характеристики продуктов деления. М., Атомиздат, 1974.
9. Martin M., Blichert-Toff P. «Nucl. Data», 1970, Tabl. A-8, v. 1-2.

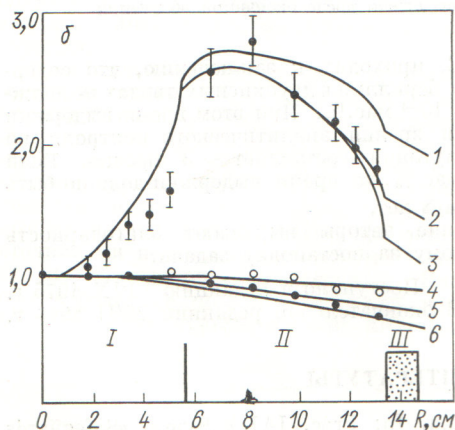
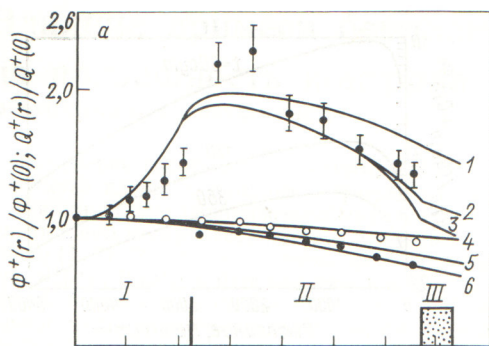
УДК 621.039.574

Распределение ценности нейтронов в реакторе с ловушкой

БЫКОВСКИЙ В. С., ЛАНЦОВ М. Н.

В настоящее время функции ценности широко применяются в реакторной физике в расчетах с использованием теории возмущений как первого, так и более высоких порядков. В связи с этим особый интерес представляет изучение влияния различных неоднородностей

в активной зоне реактора на пространственно-энергетическую зависимость ценности нейтронов и сравнение экспериментальных и расчетных результатов. Такой неоднородностью, например, является ловушка нейтронов в исследовательском реакторе.



Относительное радиальное распределение ценности нейтронов при $\rho_H/\rho_5 = 42$ (а) и 83 (б):

— расчет, ● и ○ — эксперимент; I — ловушка, II — активная зона, III — корпус; 1, 2, 3 — $\Phi^+(r)$; 4, 5, 6 — $Q^+(r)$ для бериллиевого, водяного и стального отражателей соответственно

Функция ценности, являющаяся решением условно-критического уравнения реактора вида

$$\hat{L}^+\Phi^+(r, E) + \frac{\nu_f \Sigma_f}{K_{эфф}} Q^+(r) = 0, \quad (1)$$

по своему физическому смыслу есть мера мощности, которая создается нейтроном с данной энергией, находящимся в данной точке реактора [1, 2]. В уравнении (1)

$$Q^+(r) = \int \Phi^+(r, E) \chi(E) dE \quad (2)$$

есть функция ценности нейтронов деления, где $\chi(E)$ — спектр нейтронов деления.

Если в любой точке реактора изменить поглощение нейтронов, сохраняя все другие процессы взаимодействия, то изменение реактивности по теории возмущений можно записать [1] так:

$$\frac{\Delta k}{k} = A \int \Phi^+(E) \sigma(E) \Phi(E) dE = A \bar{\Phi}^+ \int \sigma(E) \Phi(E) dE, \quad (3)$$

где A — нормировочный коэффициент; $\bar{\Phi}^+$ — функция ценности, усредненная по спектру поглощаемых нейтронов.

Подробный анализ методов измерения распределений функции ценности рассмотрен в работе [3]. Наиболее употребительны и достаточно простые метод разноточного источника с использованием спонтанного деления ^{252}Cf и метод возмущений. Эти методы и были применены в настоящей работе для экспериментального определения пространственно-энергетической зависимости ценности нейтронов в реакторе с ловушкой. Эксперименты проводились на критической сборке, представляющей собой аналог модуля секционированной активной зоны исследовательского реактора [4]. В центре модуля располагалась легководная ловушка нейтронов. Результаты получены при двух отношениях концентраций ядер замедлителя к ядрам топлива ($\rho_H/\rho_5 = 83$ и 42). В качестве отражателей использовались бериллий, легкая вода и нержавеющая сталь.

Измерялось радиальное распределение ценности нейтронов. Ценность нейтронов деления ^{252}Cf определялась при подкритичности сборки $0,2-0,3 \beta$. Мощность источника $\sim 10^6$ нейтр./с. Линейные размеры капсулы источника достаточно малы, и возмущение, вносимое капсулой, незначительно. Для измерения распределений ценности поглощаемых нейтронов применялись медные индикаторы, которые позволяют определить непосредственно функцию ценности, а не коэффициенты реактивности, получаемые при использовании бора или кадмия [3]. Эти измерения были проведены в надкритическом состоянии следующим образом: по периоду реактора определялся эффект реактивности при замене медных индикаторов на алюминиевые имитаторы одинаковых размеров. При этом принималось, что различие в сечениях рассеяния нейтронов медью и алюминием незначительно и изменения реактивности происходят только за счет изменения поглощения. После измерения реактивности медные индикаторы активировались в тех же точках реактора, и по результатам измерения реактивности и активации определялся функционал

$$\bar{\Phi}^+(r) = \frac{\Delta k/k}{\int \sigma_{ак}(E) \Phi(E) dE}, \quad (4)$$

где $\sigma_{ак}(E)$ — сечение активации меди в зависимости от энергии нейтронов. Поскольку измерялось относительное распределение ценности нейтронов, поправка на депрессию потока нейтронов в индикаторах не учитывалась.

Экспериментальные результаты сравнивались с расчетами, которые проводились в P_1 -приближении по 18-групповой одномерной программе. Константы тепловой группы были получены с учетом эффектов термализации нейтронов в P_3 -приближении, при этом реактор разбивался на пять пространственных зон. Расчеты были получены функционалы аналогичные (2) и (4), но вместо сечения активации меди принималось сечение поглощения. Форма спектра деления ^{252}Cf была взята из работы [5].

На рисунке представлены экспериментальные распределения функции ценности нейтронов деления для бериллиевого и водяного отражателей и функции ценности поглощаемых нейтронов для водяного отражателя. Распределения нормированы на значения ценности в центре ловушки.

Таким образом, расчетное распределение функции ценности нейтронов деления хорошо согласуется с экспериментом. Ловушка существенным образом деформирует поле ценности поглощаемых нейтронов, в то время как на поле ценности нейтронов деления она оказывает слабое влияние. Принятый способ расчета достаточно

прост и качественно правильно описывает распределение ценности поглощаемых нейтронов. Наблюдающееся различие в области, прилегающей к границе раздела между ловушкой и активной зоной, обусловлено, вероятно, тем, что область влияния ловушки в действительности больше, чем это учитывается в расчете. По-видимому, при расчете констант тепловой группы необходимо разбивать реактор на большее число пространственных зон.

Авторы выражают благодарность В. И. Антоновой за помощь в проведении расчетов.

Поступило в Редакцию 23/X 1975 г.

УДК 539.165

Измерение относительной вероятности электронного захвата при распаде ^{244}Am

ГАБЕСКИРИЯ В. Я., ЧЕТВЕРИКОВ А. П., ГРЫЗИНА В. В., ТИХОМИРОВ В. В.

В качестве стартового материала при накоплении тяжелых изотопов трансплутониевых элементов в атомных реакторах широко используется ^{243}Am (см. рисунок). Как видно из схемы, в результате захвата нейтронов из ядер ^{243}Am образуются составные ядра ^{244}Am в основном (^{244m}Am) и изомерном (^{244g}Am) состояниях. В результате электронного захвата ^{244m}Am может перейти в ^{244}Pu . До настоящего времени выполнена одна работа [7], посвященная определению отношения вероятности электронного захвата к β -распаду ядер ^{244}Am . Это отношение, равное $0,039 \pm 0,003\%$, авторами получено в результате измерения выходов ^{244}Pu и ^{244}Cm , образующихся при облучении мишени ^{243}Am . Для определения относительной вероятности электронного захвата ^{244}Am в настоящей работе был применен метод, аналогичный использованному в работе [8] для измерения относительной вероятности β -распада ^{242}Am .

Мишень с ^{243}Am была облучена в реакторе СМ-2 в течение 6,8 сут флюенсом $2 \cdot 10^{19}$ нейтр./см². Доза облучения выбиралась с таким расчетом, чтобы выгоранием

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усачев Л. Н. В сб.: Реакторостроение и теория реакторов. М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 251.
2. Пупко В. Я. В сб.: Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов. М., Атомиздат, 1972, с. 166.
3. Greenspan E., Cady K. «J. Nucl. Energy», 1970, v. 24, N 11, p. 529.
4. Антонова В. И. и др. Препринт ФЭИ-502. Обнинск, 1974.
5. Александрова З. А. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 4, с. 282.

^{244}Pu (0,01%) и ^{244}Cm (0,06%) можно было пренебречь. Облученная мишень выдерживалась 160 сут, часть ^{244}Cm за счет α -распада перешла в ^{240}Pu . После выдержки мишень растворяли и выделяли плутоний для масс-спектрометрического анализа, в результате которого получено отношение ^{244}Pu к ^{240}Pu , равное $0,0206 \pm 0,0006$ (доверительная вероятность $P = 0,95$). С учетом времени облучения и выдержки, а также известного значения периода полураспада ^{244}Cm ($18,099 \pm 0,15$ лет) [6] по измеренному отношению ^{244}Pu к ^{240}Pu рассчитывалась относительная вероятность электронного захвата ^{244}Am (k). Полученное $k = 0,0361 \pm 0,0013\%$ ($P = 0,95$) в пределах погрешности совпадает с результатом работы [7]. При расчете k учитывалась поправка на образование ^{240}Pu за счет захвата нейтронов ^{239}Pu . Последний всегда присутствует в мишени как дочерний продукт α -распада ^{243}Am . Неточность этой поправки и погрешность масс-спектрометрического анализа вносили основной вклад в погрешность измерения k . В стартовом продукте содержалось 3% ^{241}Am , однако накопление ^{244}Pu и Cm из ^{241}Am было небольшим и соответствующие поправки были значительно меньше погрешности измерения.

Поступило в Редакцию 4/XII 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qaim M. «Nucl. Phys.», 1966, v. 84, p. 411.
2. Brown L., Propst R. «J. Inorg. and Nucl. Chem.», 1968, v. 30, p. 2591.
3. Полюхов В. Г. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 4, с. 357.
4. Chiorso A. e.a. «Phys. Rev.», 1954, v. 94, p. 1081.
5. Vandeubosch S., Day P. «Nucl. Phys.», 1962, v. 30, p. 177.
6. Bentley W. [2], p. 2007.
7. Fields P. e.a. «Phys. Rev.», 1955, v. 100, N 1, p. 172.
8. Габескирия В. Я. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 2, с. 177.

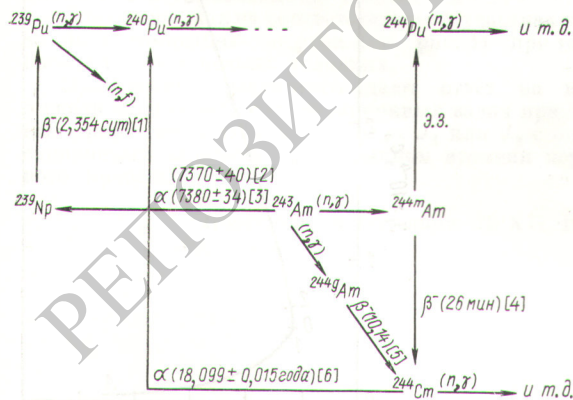


Схема ядерных превращений в реакторе при облучении ^{243}Am