

ствия протонов, например, изменяется вдоль траектории вследствие изменения энергии. В результате вероятность протону пройти путь, на котором его энергия изменяется от начальной  $E_0$  до некоторой  $E$ , равна

$$\exp \left[ - \int_{E_r}^{E_0} \frac{\mu(E')}{dx} dE' \right] = e^{-\varphi(E_0) + \varphi(E)}. \quad (11)$$

Если представить  $e^{\varphi(E)}$  в виде

$$e^{\varphi(E)} = \sum_{i=1}^n b_i e^{\beta_i x}, \quad (12)$$

то вероятность заряженной частице пройти без взаимодействия при среднем пути в материале  $x$  равна:

$$e^{-\varphi(E_0)} \sum_{i=1}^n b_i \exp \left\{ - \frac{x}{\delta} \left( 1 - \int_0^{\infty} e^{\beta_i \delta} f_1(\delta) d\delta \right) \right\}. \quad (13)$$

УДК 539.125.517.3.162.3

## Исследование нейтронно-физических параметров решетки типа ВВЭР с обогащением урана 6,5%

ЮРОВА Л. Н., ПОЛЯКСВ А. А., РУХЛО В. П., ТИТАРЕНКО Ю. Е., БОБРОВ С. А.

Экспериментальные исследования нейтронно-физических параметров  $(\delta^{28}, \delta^{25}, \frac{\langle \sigma_c^{28} \rangle}{\langle \sigma_f^{25} \rangle})$  уран-водной системы,

представляющей собой модель топливной кассеты ВВЭР, проводили на подкритической сборке, установленной в физическом зале ИРТ МИФИ-2000 (рисунок).

Использование горизонтального канала реактора в качестве источника нейтронов существенно расширяет возможности экспериментальных исследований на подкритических системах и позволяет получить поток тепловых нейтронов в системе  $\sim 5 \cdot 10^8$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . С помощью графитовой призмы был преобразован горизонтальный пучок нейтронов в вертикальный [1].

Экспериментальная установка размещалась на верхней грани графитовой призмы и представляла собой систему из двух коаксиальных баков: внешнего диаметром 1500 мм, выполненного из дюралюминия, и внутреннего диаметром 235 мм, изготовленного из нержавеющей стали. Высота обоих баков 1700 мм. Внутри малого бака с шагом решетки 12,7 мм размещались 253 твэла, закрепленные тремя дистанционирующими гексагональными решетками: верхней и нижней — из алюминия, средней — из плексигласа. Твэлы изготовлены из цилиндрических таблеток двуокиси урана, с обогащением 6,5% по  $^{235}\text{U}$  диаметром 7,65 мм и плотностью  $\sim 10,2$  г/см<sup>3</sup>, помещенных в циркониевые трубки с внешним диаметром 9,1 мм. Экспериментальные образцы помещали в твэлы, имеющие разборную конструкцию, и облучали в области: установившимся спектром нейтронов, который соответствовал спектру нейтронов в критической системе аналогичных параметров. Критерием определения области измерений в исследуемой топливной решетке служит: постоянство кадмиевых

Для протонов с энергией  $E_0 \leq 500$  МэВ достаточно принять в (12)  $n=3$ , чтобы воспроизвести  $e^{\varphi(E)}$  с точностью до 3%.

Поступило в Редакцию 27/IV 1977 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольчужкин А. М., Учайкин В. В. «Изв. вузов. Физика», 1971, № 3, с. 65.
2. Лапо А. В. и др. В кн.: Статистическое моделирование в математической физике. Под ред. Г. И. Марчука. Новосибирск, изд. СО АН СССР, 1976, с. 17—26.
3. Грибов Б. С. и др. «Космические исследования», 1977, т. XV, с. 2.
4. Руководство по радиационной защите для инженеров. Т. 2. Пер. с англ. Под ред. Д. Л. Бродера и др. М., Атомиздат, 1973, с. 216.

отношений для резонансного детектора  $^{115}\text{In}$  и  $1/v$  детектора  $^{165}\text{Dy}$ ; одинаковые в пределах экспериментальных погрешностей кадмиевые отношения по  $^{232}\text{Th}$  в исследуемой подкритической системе ( $R_{\text{Cd}}^{\text{Th}} = 1,28 \pm 0,04$ ) и в критической системе такого же состава и геометрии ( $R_{\text{Cd}}^{\text{Th}} = 1,24 \pm 0,03$ )\*.

Значения  $\delta^{28}, \delta^{25}$  и  $\frac{\langle \sigma_c^{28} \rangle}{\langle \sigma_f^{25} \rangle}$  определяли активационным методом, интенсивность  $\gamma$ -излучения облученных образцов измеряли на Ge(Li)-детекторе.

Значение  $\delta^{28}$  было получено из сравнения интенсивностей  $\gamma$ -излучения изотопа  $^{140}\text{La}$  ( $E_\gamma = 1596,4$  кэВ), являющегося продуктом деления ядер в фольгах различного изотопного состава. В экспериментах использовали фольги из природного и обедненного металлического урана ( $\sim 11$ -кратное обеднение по  $^{235}\text{U}$  диаметром 7,65 мм и толщиной 100 мкм).

Отношение концентраций ядер  $^{235}\text{U}$  в этих фольгах установили по интенсивности  $\gamma$ -излучения  $^{143}\text{Ce}$  ( $E_\gamma = 293,26$  кэВ), образующегося в результате деления при одновременном облучении образцов, которое проводили в тепловой колонне реактора тяжеловодного реактора ИТЭФ.

Для определения  $\delta^{25}$  измеряли кадмиевое отношение по  $^{235}\text{U}$ . Образцы были изготовлены из сплава алюминия и металлического урана ( $\sim 90\%$ -ное обогащение по  $^{235}\text{U}$ ) в виде фольг толщиной 100 мкм и диаметром 7,65 мм. Концентрация  $^{235}\text{U}$  в них соответствовала концентрации  $^{235}\text{U}$  в природном металлическом уране.

\* Эксперименты выполнены в ИАЭ им. И. В. Курчатова.

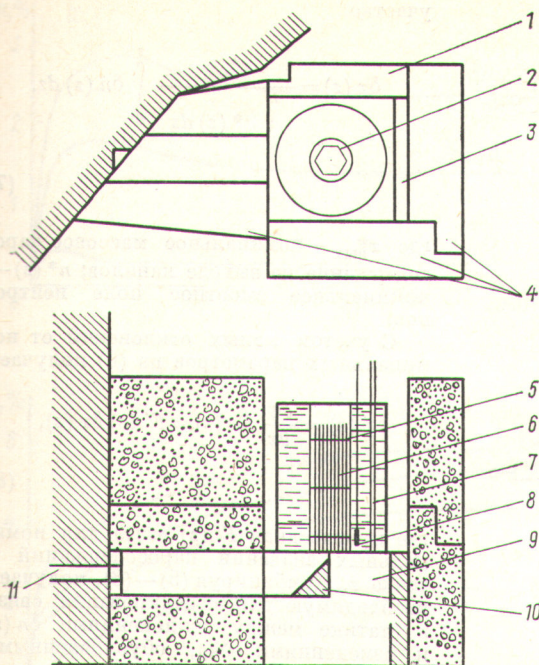


Схема экспериментальной установки:

1 — защитная стенка из парафина; 2 —  $UO_2-H_2O$ -сборка; 3 — защитная стенка из свинца; 4 — защитные блоки из бетона; 5 — дистанционирующие решетки; 6 —  $UO_2$ -твэлы; 7 — канал для монитора; 8 —  $BF_3$ -счетчик; 9 — графитовая призма; 10 — рассеиватель; 11 — ГЭК ИРТ МИФИ

При облучении в кадмиевом чехле использовали кадмиевые фильтры толщиной 500 мкм. От экспериментальных образцов кадмиевые фильтры отделяли топ-

ливными таблетками из двуокиси урана толщиной 5 мм. Скорость деления тепловыми и надкадмиевыми нейтронами определяли по интенсивности  $\gamma$ -излучения изотопа  $^{143}Ce$ . «Взвешивание» образцов осуществлялось по интенсивности  $\gamma$ -излучения  $^{235}U$  с  $E_\gamma = 185,72$  кэВ.

Функционал  $\frac{\langle \sigma_c^{28} \rangle}{\langle \sigma_f^{25} \rangle}$  измеряли путем сравнения интенсивностей  $\gamma$ -излучения изотопов  $^{239}Np$  ( $E_\gamma = 277,6$  кэВ) и  $^{143}Ce$  ( $E_\gamma = 293,26$  кэВ) в образце, изготовленном из двуокиси урана с обогащением 6,5% по  $^{235}U$ , толщиной 500 мкм и диаметром 7,65 мм. Для определения отношения эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов этих энергий  $\left( \frac{a_\gamma^{293,26}}{a_\gamma^{277,6}} \right)$  проводили калибровку образцов в тепловой колонне. Время облучения в ней соответствовало времени облучения в  $UO_2-H_2O$  подкритической сборке. Сечения  $\sigma_c^{28}$  и  $\sigma_f^{25}$  в тепловой области были приняты равными  $\sigma_c^{28} = 2,73 \pm 0,04$  б,  $\sigma_f^{25} = 580,2 \pm 1,8$  б [2, 3].

В результате измерений были получены следующие значения:  $\delta^{28} = 0,0537 \pm 0,0015$ ;  $\delta^{25} = 0,266 \pm 0,006$ ;  $\frac{\langle \sigma_c^{28} \rangle}{\langle \sigma_f^{25} \rangle} = 0,0239 \pm 0,0011$ .

Поступило в Редакцию 4/VI 1977 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрова Л. Н. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 4, с. 279.
2. Neutron Cross Sections. BNL-325, 1973.
3. In: Proc. IAEA Symp. «Nucl. Data for Reactors». Helsinki, 1970, p. 134, 287.

УДК 621.039.515

## Трехмерное аналоговое моделирование реактора с учетом теплопереноса

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ФИЛИПЧУК Е. В., ПОТАПЕНКО П. Т., КРЫЛОВ В. М.

Математическая модель реактора в задачах регулирования может базироваться на одгрупповом диффузионном приближении\*:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k_\infty - 1}{r} n + \frac{M^2}{r} \nabla^2 n - \sum_{i=1}^6 \frac{dC_i}{dt}; \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{k_\infty \beta_i}{r} n - \lambda_i C_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (2)$$

Здесь  $n$  — плотность нейтронного потока;  $k_\infty$  — коэффициент размножения;  $\tau$  — время жизни нейтронов;  $C_i$ ,

$\beta_i$ ,  $\lambda_i$  — концентрация, доли и постоянные распада источников запаздывающих нейтронов;  $M^2$  — площадь миграции.

Локальное изменение коэффициента размножения  $\Delta k$  представляется в виде

$$\Delta k = \delta k + \delta k_T + \delta k_P, \quad (3)$$

где  $\delta k$  — внешнее воздействие (регулирующие стержни и внешние возмущения  $k_\infty$ );  $\delta k_T$  — эффект изменения  $k_\infty$  вследствие изменения температуры топлива (доплер-эффект);  $\delta k_P$  — локальное изменение  $k_\infty$  вследствие изменения объемного паросодержания ф.

Уравнение для изменения  $\delta k_T$  представляется в виде

$$T_T \frac{d\delta k_T}{dt} + \delta k_T = K_T \delta n, \quad (4)$$

где  $\delta n$  — локальное отклонение плотности нейтронного потока;  $T_T$  — постоянная времени топлива;  $K_T$  — отрицательный коэффициент обратной связи по топливу.

\* Потапенко П. Т., Винтисенко И. Т., Косилов А. Н. В кн.: Аналоговая и аналого-цифровая вычислительная техника. Вып. 6. М., «Сов. радио», 1973, с. 102.