

падает (отмечено стрелкой на рис. 3). Применение прокладок из пиролитического графита оказалось весьма эффективным: с помощью экрана и шайб из пиролитического графита, изолирующих образцы от стенок ампулы, температуру облучения удалось поднять от 140 до 400—500 °С.

В каналах отражателя образцы облучались в алюминиевых ампулах, конструкция которых изображена на рис. 4. Без дистанционирования образцов температура графита не превышала 140—200 °С. Размещение образцов в медных кассетах с зазором 1 мм от стенки до ампулы позволило поднять температуру графита до 500—550 °С. В канале за бериллиевым отражателем вследствие низкой интенсивности потока абсолютное изменение параметра решетки алмаза невелико. Поэтому не удалось определить температуру облучения методом алмазных индикаторов. Можно ожидать, что использование в этом случае материалов с более значительным расширением кристаллической решетки, например природного графита, окажется эффективнее.

УДК 539.125.5.173.162.3

## Структура потока нейтронов вблизи резонанса поглощения

ДОДЬ А. И., КИСИЛЬ И. М., МАРКЕЛОВ И. П.

Известно [1], что при замедлении нейтронов от дельта-образного источника в бесконечной упругорассеивающей среде возникают затухающие с энергией колебания плотности столкновений около ее асимптотического значения — осцилляции Плачека. Если в качестве возмущения взять отрицательный источник — резонанс поглощения конечной ширины, то это приведет к усредненному по ширине резонанса эффекту осцилляций. Кроме того, если отрицательный источник локализован, как это наблюдается в ячейке гетерогенного реактора, то эффект осцилляции будет затухать по мере удаления от источника.

В настоящей работе описываются результаты экспериментального и расчетного изучения отклонения потока нейтронов первого столкновения от асимптотического в уран-графитовой решетке в области энергий ниже резонанса  $^{238}\text{U}$  при энергии 6,68 эВ.

В экспериментах учитывалось, что в уран-графитовой решетке для нейтронов с энергией 6,68 эВ максимальная потеря энергии при рассеянии на углеводе переводит нейтрон в область энергии основного резонанса золота при 4,9 эВ. Это позволяло по активации золотых индикаторов регистрировать распределение по радиусу ячейки потока нейтронов в области энергии первого столкновения после резонанса  $^{238}\text{U}$  при 6,68 эВ. Распределение потока нейтронов асимптотического спектра ниже резонанса  $^{238}\text{U}$  при 6,68 эВ измерялось по активации  $^{115}\text{In}$  с основным резонансом при 1,49 эВ.

Эксперименты выполнялись на уран-графитовом реакторе с шагом решетки  $20 \times 20$  см и топливными стержнями из природного металлического урана диаметром 3,5 см [2]. Между ураном и графитом имелся зазор толщиной 4,5 мм, частично заполненный алюминием. По полученным распределениям активации  $^{115}\text{In}$  и  $^{197}\text{Au}$  определялся коэффициент  $K_{\Pi}^3$ , характеризующий уменьшение потока нейтронов в области энергии первого столкновения после резонанса  $^{238}\text{U}$  при 6,68 эВ по сравнению с потоком асимптотического

Таким образом, показано, что при облучении углеродных материалов в реакторе ВВР-М применение простых конструктивных элементов — вкладышей, экранов, теплоизолирующих прокладок из пиролитического графита — позволяет легко получить в одном ампульном устройстве температуру от 70—90 до 800 °С без вакуумирования образцов.

Поступило в Редакцию 15/I 1975 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правдюк Н. Ф. и др. В сб.: Действие ядерных излучений на материалы. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 34.
2. Snerpvangers I. RCN-INT 65-095, Petten, 1965.
3. Карлухин В. И., Николаенко В. А. Измерение температуры с помощью облученного алмаза. М., Атомиздат, 1971.

спектра на различных расстояниях  $r_i$  от топливного стержня:

$$K_{\Pi}^3 = \frac{[A(r_i)/A(r_0)]_{\text{In}} - [A(r_i)/A(r_0)]_{\text{Au}}}{[A(r_i)/A(r_0)]_{\text{In}}}, \quad (1)$$

где  $r_0$  — расстояние от центра уранового стержня до границы ячейки.

Для учета влияния поглощения нейтронов в  $^{235}\text{U}$  на измерявшиеся величины эксперименты выполнялись со стержнями с содержанием  $^{235}\text{U}$ , составлявшим 2 и 0,71%, и из частично обедненного урана. Затем значения  $A(r_i)/A(r_0)$  в каждой точке измерений графически экстраполировались на «нулевое» содержание  $^{235}\text{U}$ . Измерения с ураном 2%-ного обогащения и обедненным ураном выполнялись на вставках высотой 240 мм, которые помещались в центральную ячейку в составе стержня из природного урана. Индикаторы диаметром 14 мм при облучении окружались кадмиевым покрытием диаметром 20 и толщиной 0,5 мм. Толщина индикаторов из  $^{197}\text{Au}$  и  $^{115}\text{In}$  составляла соответственно 1,3 и 1 мг/см<sup>2</sup>. Распределение активаций  $^{115}\text{In}$  и  $^{197}\text{Au}$  по радиусу ячейки для урана «нулевого» обогащения, а также значения  $K_{\Pi}^3$  приводятся на рис. 1.

Теоретическая оценка величины неасимптотических отклонений потока нейтронов в уран-графитовой ячейке, вызванных отрицательным источником — резонансом  $^{238}\text{U}$  при 6,68 эВ, определена по разности активаций золотых индикаторов по гетерогенной ячейке в потоках нейтронов, рассчитанных с учетом и без учета конечности сброса энергии на углеводе. Для нахождения потока нейтронов по ячейке использовался метод определения пространственно-энергетического распределения нейтронов [3]. Его суть состоит в решении интегральных уравнений замедления для многих слоев, связь между которыми осуществляется посредством вероятностей



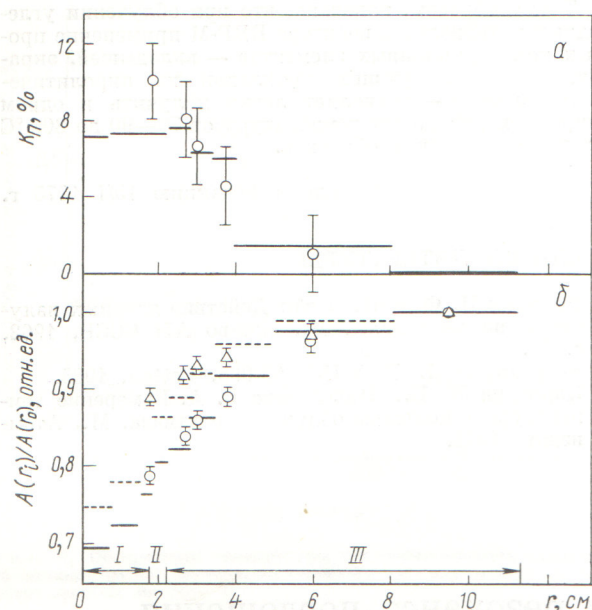


Рис. 1. Относительное распределение активации золотых и индиевых индикаторов и коэффициентов  $K_{II}$  по радиусу ячейки: а — значения коэффициента Плачека: — — —  $K_{II}^p$ ;  $\circ$  —  $K_{II}^a$ ; б — распределение активаций по ячейке. Расчет: — и — — — точное и водородоподобное ядра рассеяния соответственно. Эксперимент:  $\circ$  — золото;  $\Delta$  — индий; I — уран; II — зазор; III — графит

первых столкновений. Энергетическая структура сечений взаимодействия во всей области энергии восстанавливается по известным разрешенным и средним статистическим параметрам резонансов. Для каждой ячейки с указанным выше обогащением урана расчет проводился дважды: с точным ядром рассеяния на углероде и с водородоподобным ядром. Полученные данные экстраполировались на «нулевое» обогащение урана. На рис. 1 показаны расчетные распределения активаций золотых индикаторов с точным и водородоподобным ядрами рассеяния для урана «нулевого» обогащения и значение  $K_{II}^p$ , определенное по этим активациям.

На рис. 2 даны отношения разности потоков нейтронов с водородоподобным  $\Phi_{вп}$  и точным  $\Phi_{точ}$  ядром рассеяния к потоку нейтронов с водородоподобным ядром рассеяния на углероде для разных слоев ячейки.

Из полученных результатов видно, что неасимптотическое отклонение потока нейтронов первого столкновения в уран-графитовой решетке, обусловленное резонансом поглощения  $^{238}\text{U}$  при энергии 6,68 эВ, приводит к уменьшению потока нейтронов, а следовательно, к активации золота примерно на 10% вблизи топливного стержня и внутри его. По мере удаления от стержня наблюдаемое отклонение спадает к нулю. Истинное отклонение надо считать большим, как это следует из рис. 2, ввиду того что максимум сечения захвата в резонансе золота несколько смещен относительно минимума эффекта неасимптотических отклонений потока.

Таким образом, результаты экспериментов и расчетов показывают сложность структуры потока нейтронов в гетерогенной среде вблизи резонанса поглощения. Кроме прямого «выедания» нейтронов резонанса

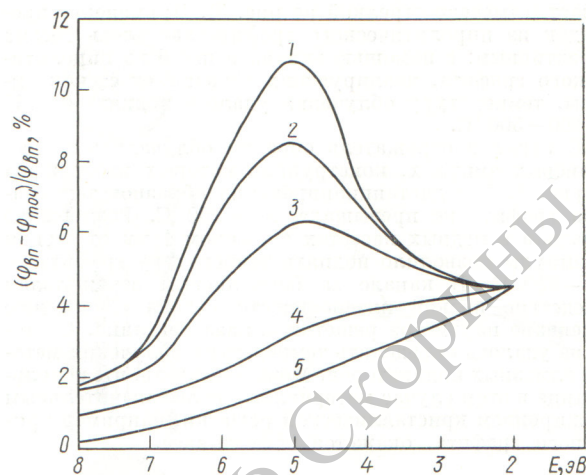


Рис. 2. Зависимость относительной разности потоков нейтронов с точным и водородоподобным ядрами рассеяния от энергии в слоях замедлителя, находящегося на разном расстоянии от центра ячейки:

1 — 2,2 — 2,8 см; 2 — 2,8 — 3,4 см; 3 — 3,4 — 4,9 см; 4 — 4,9 — 8,0 см; 5 — 8,0 — 11,3 см

ных энергий блоком и депрессии их вблизи блока существует депрессия потока за резонансом по ячейке вследствие резкого уменьшения источников замедляющихся нейтронов.

Неасимптотические отклонения потока нейтронов первого столкновения после резонанса  $^{238}\text{U}$  при 6,68 эВ необходимо учитывать при интерпретации результатов измерений с помощью золотых индикаторов в гетерогенных решетках, содержащих в качестве замедлителя кислород, углерод или бериллий и  $^{238}\text{U}$  в составе топлива.

Для решеток с замедлителями, при рассеянии на которых сброс энергии нейтрона сравним с эффективной шириной резонансов  $^{238}\text{U}$ , неасимптотические отклонения существуют и в пределах резонанса, вызывая уменьшение потока нейтронов в нем и его резонансного интеграла. По нашим расчетам, в уран-графитовом реакторе с шагом решетки  $20 \times 20$  см и топливными стержнями из природного металлического урана диаметром 3,5 см уменьшение эффективного резонансного интеграла резонанса  $^{238}\text{U}$  при 6,68 эВ вследствие неасимптотического отклонения потока нейтронов в пределах резонанса составляет 9%. При необходимости можно исключить влияние неасимптотических отклонений на измеряемый эффективный резонансный интеграл уранового блока, окружив блок полостью [4].

Авторы выражают благодарность Б. Г. Дубовскому за помощь в организации экспериментов, Е. В. Пугачевой за помощь в расчетах, В. В. Орлову и Г. Я. Румянцеву за полезные обсуждения.

Поступило в Редакцию 4/V 1975 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Plackek G. «Phys. Rev.», 1946, v. 69, N 9, 10, p. 423.
2. Глазков Ю. Ю. и др. «Атомная энергия», 1961, т. 11, вып. 1, с. 5.
3. Додь А. И. «Изв. АН БССР, сер. физ.-энерг. наук», 1972, № 3, с. 5.
4. Hellstrand E. «J. Appl. Phys.», 1957, v. 28, p. 1493.