

УДК 621.039.55

Ампульные устройства реактора ВВР-М для облучения углеродных материалов

ВАСИЛЬЕВ Г. Я., ВИРГИЛЬЕВ Ю. С., МАКАРЧЕНКО В. Г., СЕМЕНОВ Ю. П.

Широкое использование воздействия реакторного облучения на материалы для оценки возможности их применения в реакторостроении, а также при изучении строения вещества сделало необходимым создание различных ампульных устройств и специальных каналов для облучения образцов. Такие устройства применяются в отечественной и зарубежной экспериментальной технике [1, 2].

В настоящей статье описаны ампульные устройства реактора ВВР-М и приведены результаты определения в них условий облучения. Ампульные устройства разработаны для облучения графитовых образцов в активной зоне, вертикальных каналах бериллиевого отражателя (В-2БС) и в воде за бериллиевым отражателем (В-15С). Максимальная плотность потоков тепловых ($n_{тв}$) и быстрых нейтронов ($\Phi_б$), в каналах которых облучались образцы, приведена в табл. 1.

Эти устройства позволяют сравнительно просто создавать в них одновременно несколько температурных зон. Разогрев образцов происходит за счет поглощения графитом γ -излучения и рассеяния нейтронов. В опытах температура образцов составляла от 70—90°С до 800—850°С. Регулирование температуры достигалось применением зазора между образцами и стенками ампулы, а также введением теплозащитного стального экрана между ними. При этом не ставилась задача получения какой-либо точной температуры.

Экраны из стали центрируются внутри корпуса ампулы тремя шпильками сверху и снизу. Внутри экранов (если без них — сразу в корпусе ампулы) помещаются полые цилиндры с дном из плотного графита, имеющие пояски на наружной поверхности, — вкладыши, обеспечивающие их центровку с заданным зазором. Внутри таких вкладышей располагаются слоями исследуемые образцы (рис. 1). По высоте ампулы между вкладышами создавали зазор. В ряде случаев вкладыши изолировали пластинами толщиной 2—8 мм из ширлитического графита, теплопроводность которого в направлении, перпендикулярном к плоскости осаждения, близка нулю.

Плотность потока нейтронов в реакторе ВВР-М, нейтр./(см²·с)

Канал или ячейка	$n_{тв}$	$\Phi_б$ ($E_б > 1$ Мэв)	$\Phi_б$ ($E > 0,18$ Мэв)
Активная зона, ячейки б-1, л-1	$7 \cdot 10^{13}$	$(5,1-6,4) \cdot 10^{13}$	$(10,6-13,4) \cdot 10^{13}$
Канал В-2БС в бериллиевом отражателе	$4 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{12}$	$5,5 \cdot 10^{12}$
Канал В-15С в воде за отражателем	$5 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$2,6 \cdot 10^{11}$

Температура облучения определялась методом алмазных индикаторов [3]. Для этого в графитовой капсуле, имеющей размеры образца (диаметр 4, длина 40 мм), высверливали отверстие, куда помещали несколько десятков миллиграммов порошка алмаза. Такие образцы располагали в разных точках ампульного устройства. Облученный порошок подвергали изохрональному отжигу при последовательно повышающейся температуре и измеряли параметр кристаллической решетки алмаза. Съемку проводили по методу Дебая на K_{α} -излучении кобальта в камерах ВРС и РКУ диаметром 143 и 114 мм соответственно. Погрешность определения параметра составляла $\pm 0,005 \text{ \AA}$.

Вместо алмаза индикатором температуры могут служить природный графит или материал, отформованный на его основе, которые позволяют непосредственно измерить температуру образца. Например, температура образца, измеренная с помощью природного графита и алмазного индикатора, составила соответственно 160 и 190°С. Отличие температур обусловлено некоторым их градиентом по ампуле. Оно наиболее существенно

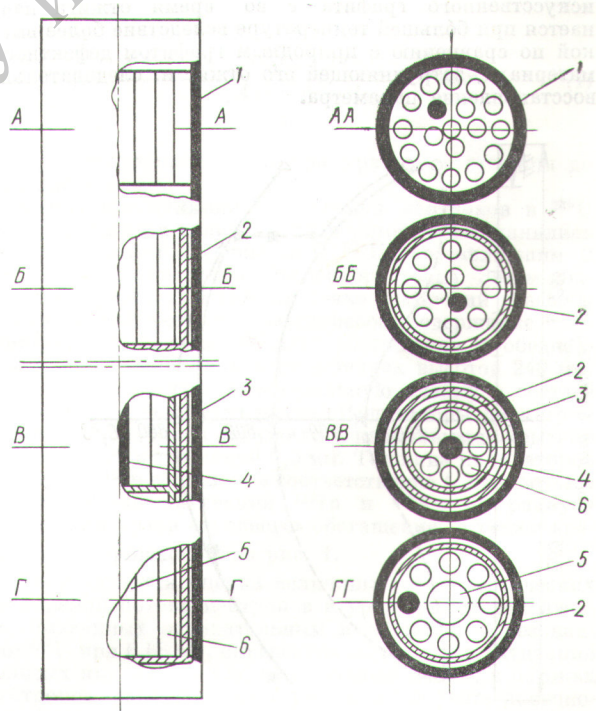


Рис. 1. Ампульное устройство для облучения в активной зоне реактора ВВР-М образцов графита при различных температурах: 1 — корпус ампулы; 2 — графитовый вкладыш; 3 — теплозащитный экран; 4 — алмазный индикатор; 5 — внутренний сплошной вкладыш; 6 — испытываемые образцы

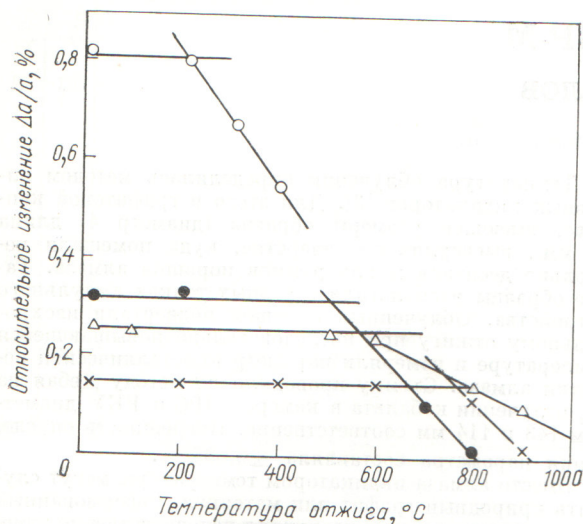


Рис. 2. Определение температуры облучения методом алмазного индикатора для случаев, соответствующих внутренней компоновке ампулы на рис. 1:

○ — А, 200°; ● — Б, 500°; △ — Г, 570°; × — В, 760°С

при низкотемпературном облучении. В то же время восстановление параметра кристаллической решетки искусственного графита с во время отжига начинается при большей температуре вследствие более высокой по сравнению с природным графитом дефектности материала, затрудняющей его отжиг и, следовательно, восстановление параметра.

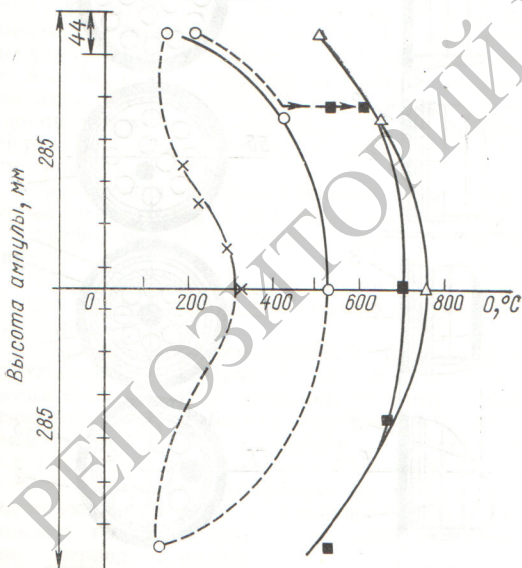


Рис. 3. Распределение температуры по высоте ампульного устройства, отличающихся внутренней конструкцией, при облучении в активной зоне:

× — без экранов и вкладышей; ○ — с вкладышами; ■ — с вкладышами и экраном; △ — то же с вакуумированием (слева указана высота ампулы и одного вкладыша)

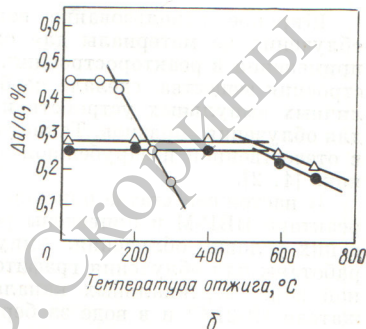
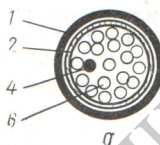
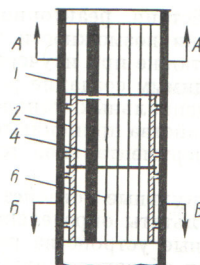
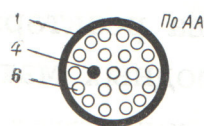


Рис. 4. Ампульное устройство для облучения в отражателе реактора ВВР-М образцов графита (а) (обозначения те же, что на рис. 1) и изменение параметра решетки алмазного индикатора при отжиге (б):

○ — А, 150°; △, ● — Б, 500 и 550°С

Некоторые из полученных в работе результатов показаны на рис. 2 и 3. С использованием этих и других экспериментальных данных построено распределение температуры по высоте различных вариантов ампульного устройства. Симметричность поля облучения реактора и расположение образцов в ампуле позволили ограничить число индикаторов. Их, как правило, помещали только на одной половине высоты ампулы.

На рис. 1 приведена схема, показывающая различную внутреннюю компоновку используемого ампульного устройства с неизменными внешними габаритами. При размещении образцов по высоте ампулы без каких-либо зазоров (сечение АА, рис. 1) температура образцов изменялась от 140 на периферии реактора до 325 $^{\circ}\text{C}$ в средней плоскости активной зоны. Применение вкладышей, дистанционирующих образцы от охлаждаемых водой реактора стенок ампулы, заметно повышает температуру образцов (до 500 $^{\circ}\text{C}$). Помещая в центре вкладыша массивный стержень из плотного графита (сечение ГГ, рис. 1), можно увеличить температуру на 50—70 $^{\circ}\text{C}$. Введение дополнительного стального экрана между стенкой ампулы и вкладышем повысило температуру в центре ампулы до 760 $^{\circ}\text{C}$. Попытка более значительного повышения температуры с помощью экрана в виде герметичного цилиндра, в котором создан технический вакуум в атмосфере аргона с давлением 10^{-1} — 10^{-2} мм рт. ст., дала увеличение температуры в центре активной зоны всего на 40—60 $^{\circ}\text{C}$. Таким образом, при температуре 600 $^{\circ}\text{C}$ и выше вакуумирование не эффективно.

Распределение рабочей температуры по высоте ампульного устройства с различной внутренней компоновкой, определенное методом алмазных индикаторов, показано на рис. 3. Если экран поставлен не на всю высоту ампулы, то вне экрана температура резко

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}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 углероде 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}U при 6,68 эВ. Распределение потока нейтронов асимптотического спектра ниже резонанса ^{238}U при 6,68 эВ измерялось по активации ^{145}In с основным резонансом при 1,49 эВ.

Эксперименты выполнялись на уран-графитовом реакторе с шагом решетки 20×20 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 ^{145}In и ^{197}Au определялся коэффициент K_{Π}^3 , характеризующий уменьшение потока нейтронов в области энергии первого столкновения после резонанса ^{238}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. Карпухин 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}U на измерявшиеся величины эксперименты выполнялись со стержнями с содержанием ^{235}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}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}Au и ^{145}In составляла соответственно 1,3 и 1 мг/см². Распределение активаций ^{145}In и ^{197}Au по радиусу ячейки для урана «нулевого» обогащения, а также значения K_{Π}^3 приводятся на рис. 1.

Теоретическая оценка величины неасимптотических отклонений потока нейтронов в уран-графитовой ячейке, вызванных отрицательным источником — резонансом ^{238}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 углероде. 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