

Измерение эффектов реактивности материалов в быстром реакторе

НАРГУНДКАР В. Р., БАЗУ Т. К., ЧАНДРАМОЛЕСВАР К., ДЖОБ П. К., СУББА РАО К.
ОТДЕЛ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ АТОМНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА ИМ. БАБА В ТРОМБЕЕ (ИНДИЯ)

Установка PURNIMA (Plutonium Reactor for Neutronic Investigations in Multiplying Assemblies) [1—3] предназначена для изучения физических параметров реактора KPFR [4]. Твэл (рис. 1) этой сборки представляет столб таблеток PuO_2 высокой плотности, который помещен в оболочку из нержавеющей стали. Столб

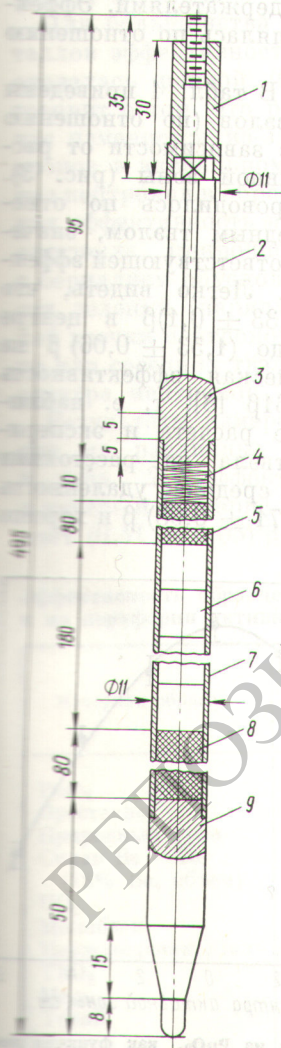


Рис. 1. Тепловыделяющий элемент:

- 1 — гайка; 2 — конус $1^\circ 12'$;
- 3 — стальная верхняя пробка;
- 4 — стальная пружина; 5 — молибден;
- 6, 8 — таблетки PuO_2 ;
- 7 — стальная оболочка (0,3 мм);
- 9 — стальная нижняя пробка

таблеток высотой 18 см ограничен с обоих концов торцевыми молибденовыми отражателями толщиной 8 см каждый. Твэлы жестко закреплены сверху в опорной решетке. Активная зона выполнена в форме неправильного шестигранника. Толщина медного отражателя, окружающего активную зону, 17 см, стального экрана 23 см. В нерабочем состоянии активная зона полностью удалена из области, окруженной отражателем.

Эффективность твэла как функция его положения в зоне измерялась для оценки возможности его применения в качестве органа защиты (как и в реакторе ИБР [5, 6]). Сравнительный анализ измерений эффектов реактивности образцов различных материалов внутри зоны также выполнялся с целью возможного их использования в качестве органов защиты реактора KPFR. Такой же анализ проводился для случая, когда образцы помещались в определенное место внутри медного отражателя. Это делалось для оценки эффективности материалов как органов регулирования реактора KPFR.

Методика измерений. Нейтронными детекторами для измерения умножения нейтронов подкритической системой служили:

счетчик делений, содержащий 10 мг ^{235}U и имеющий форму твэла (расположен в центре активной зоны);

счетчик нейтронов с 1,6 г ^{235}U , окруженный парафином (размещен у внешней границы стального экрана);

счетчик нейтронов с 180 мг бора, находящийся внутри медного отражателя.

Для увеличения скорости счета в активную зону вводились шесть $Pu - Be$ -источников интенсивностью $\sim 10^7$ нейтр./с, также выполненных в форме твэлов. Схематический план расположения детекторов и источников показан на рис. 2.

Измерения умножения проводились с помощью заранее откалиброванного эталонного стержня [7]. Эффективная доля запаздывающих нейтронов принималась равной 0,002. Подкритичность реактора Δk в состоянии, когда активная

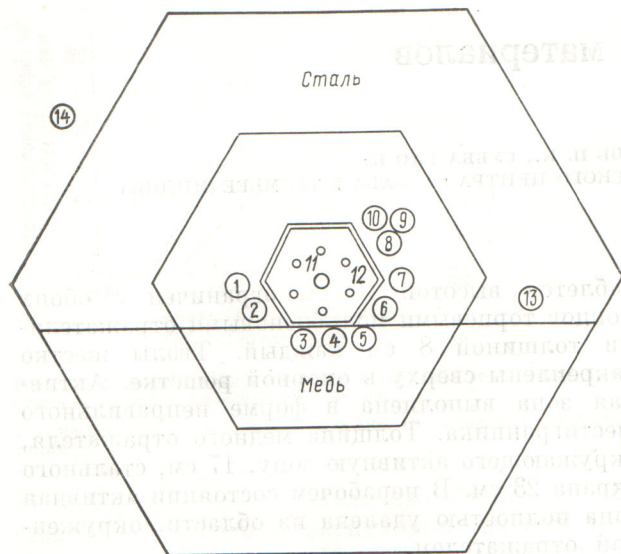


Рис. 2. Схема сборки PURNIMA I:

1—4, 6, 7 — стержни аварийной защиты; 5 — измерительный канал для образцов; 8 — грубый регулятор; 9 — тонкий регулятор; 10 — эталонный стержень; 11 — счетчик делений для внутризонных измерений; 12 — Pu—Be-источник нейтронов; 13 — счетчик BF₃; 14 — счетчик делений

зона окружена медным отражателем (рабочее состояние), определялась по соотношению

$$\Delta k = \rho_{\text{shim}} \frac{C_{\text{shim}}}{C_{\text{shim}} - C_{\text{core}}},$$

где ρ_{shim} — эффективность эталонного стержня; C_{shim} — скорость счета в рабочем состоянии, когда эталонный стержень введен в активную зону; C_{core} — скорость счета (в рабочем состоянии активной зоны) при выведенном эталонном стержне. Эффективность любого исследуемого образца определялась по формуле

$$W = (\Delta k)_T - (\Delta k)_0.$$

Здесь $(\Delta k)_T$ и $(\Delta k)_0$ — подкритичность в отсутствии эталонного стержня при наличии исследуемого образца и без него соответственно.

При измерении эффективности твэлов активная зона извлекалась из отражателя и перемещалась к перегрузочному устройству. Твэл заменялся на «холостой» из меди, и активная зона возвращалась на прежнее место. Неопределенность измерения реактивности, обусловленная необходимостью такой операции, была найдена ранее экспериментально и составила $\pm 0,05\beta$.

Для оценки эффективности исследуемых материалов использовался разборный стержень в форме стандартного твэла со съемной верхней пробкой. Испытываемый образец высотой

18 см (как и столб таблеток) помещался между верхним и нижним молибденовыми пробками высотой 8 см каждая. Таким образом определялась эффективность всего стержня, включая молибденовые пробки.

Для измерения эффективности материалов регулирующих стержней нет необходимости транспортировать активную зону. Для смены образцов она лишь опускалась до положения, обеспечивающего выключение реактора. Возврат активной зоны в исходное состояние обуславливает в этом случае ошибку $\pm 0,01\beta$. Большинство испытываемых образцов имело стандартные для «контрольного стержня» размеры: диаметр 4 см, высота 18 см. Образцы фиксировались в вертикальном направлении внутри сквозного канала в медном отражателе нейтронов специальными держателями. Эффективность образцов определялась по отношению к пустому каналу.

Результаты измерений. В табл. 1 приведены данные эффективности твэлов (по отношению к состоянию без твэла) в зависимости от расстояния до центра активной зоны (рис. 3). Поскольку измерение проводилось по отношению к состоянию с медным твэлом, значения получены с учетом соответствующей эффективности медного твэла. Легко видеть, что эффективность твэла $(3,33 \pm 0,1)\beta$ в центре активной зоны спадает до $(1,53 \pm 0,06)\beta$ на ее периферии. Теоретическая эффективность периферийного твэла $1,61\beta$ [8], т. е. наблюдается хорошее согласие расчета и эксперимента. Эффективность твэла на расстоянии 3,8 см, характеризующем среднюю удаленность от центра зоны, равна $(2,71 \pm 0,08)\beta$ и хорошо

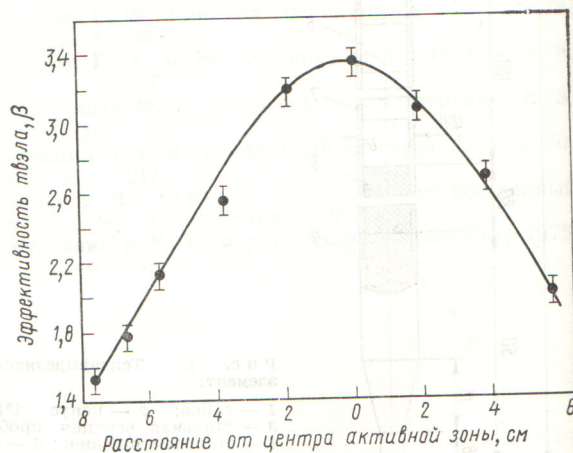


Рис. 3. Эффективность стержня из PuO₂, как функция расстояния от центра активной зоны сборки PURNIMA I

Радиальная зависимость эффективности Таблица 1
 данные из PuO_2 в активной зоне PURNIMA I

Расстояние от центра активной зоны, см	Эффективность твэла в единицах		Расстояние от центра активной зоны, см	Эффективность твэла в единицах	
	β	относительных		β	относительных
0	$3,33 \pm 0,10$	1,00	5,7	$2,04 \pm 0,06$	0,61
1,9	$3,13 \pm 0,10$	0,94	6,6	$1,76 \pm 0,06$	0,53
3,8	$2,71 \pm 0,08$	0,81	7,6	$1,53 \pm 0,06$	0,46

согласуется с усредненной эффективностью твэла 2,77 β , которая рассчитана исходя из критической загрузки в 180 твэлов.

Для большинства неделящихся тяжелых металлов эффективность в центре активной зоны оказалась равной $(0,45 \pm 0,05) \beta$. Этот факт говорит о том, что реактивность в данном случае изменяется из-за уменьшения утечки нейтронов в аксиальном направлении, а поглощение нейтронов в образцах невелико. Более высокая эффективность в центре активной зоны для оргстекла, природного урана и сплава меди с бериллием обусловлена возрастанием плотности делений (наряду с уменьшением аксиальной утечки нейтронов) непосредственно в образце или соседних твэлах в результате изменения спектра нейтронов.

Результаты измерений эффективности образцов из различных материалов представлены в табл. 2. Эффективность медного образца в центре и на периферии активной зоны составляет $(0,41 \pm 0,05) \beta$ и $(0,51 \pm 0,05) \beta$ соответ-

Эффективность образцов в центре и на периферии активной зоны Таблица 2

Материал образца	Масса, г	Эффективность в единицах β	
		в центре	на периферии
PuO_2	142	$3,33 \pm 0,10$	$1,53 \pm 0,06$
Оргстекло	13,8	$0,99 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$
Природный уран	257	$0,98 \pm 0,05$	—
Сплав Ве — Си (18% Ве, объем)	65	$0,76 \pm 0,05$	—
UO_2	138	$0,72 \pm 0,05$	$0,59 \pm 0,05$
Молибден	141	$0,52 \pm 0,05$	$0,59 \pm 0,05$
Нержавеющая сталь	106,6	$0,47 \pm 0,05$	—
ThO_2	121	$0,46 \pm 0,05$	—
Медь	123,6	$0,44 \pm 0,05$	$0,51 \pm 0,05$
Торий	156	$0,40 \pm 0,05$	—

ственно. Для молибдена эти значения равны $(0,52 \pm 0,5) \beta$ и $(0,59 \pm 0,05) \beta$. Рост эффективности в направлении от центра к периферии обусловлен хорошими рассеивающими свойствами материалов. В случае двуокиси природного урана и оргстекла эффективность уменьшается от $(0,72 \pm 0,05) \beta$ и $(0,99 \pm 0,05) \beta$ в центре зоны до $(0,59 \pm 0,05) \beta$ и $(0,75 \pm 0,05) \beta$ на ее периферии соответственно. Спад эффективности двуокиси урана объясняется уменьшением плотности делений, а оргстекла — поглощением отраженных и замедлившихся нейтронов на периферии активной зоны.

Из результатов измерений эффективности имитаторов регулирующих стержней длиной 18 см, диаметром 4 см (табл. 3) видно, что образцы из бериллия и природного урана дают максимальный эффект при данных размерах. Большой отрицательный эффект образца из фторопласта обусловлен поглощением отраженных и замедлившихся нейтронов.

Выводы. Установлено, что эффективность твэлов вполне достаточна, чтобы использовать их в качестве стержней быстрой аварийной защиты (вывод согласуется с опытом, накопленным в ходе проектирования и эксплуатации реактора ИБР). Стержни могут выбрасываться из активной зоны реактора KPFR с помощью

Эффективность имитаторов регулирующих стержней стандартного размера по отношению к воздуху Таблица 3

Материал	Масса, кг	Эффективность в единицах β	Эффективность, $10^{-2} \beta / (г \cdot моль)$
Ве (высота $H = 20$ см) *	0,470	$1,42 \pm 0,04$	2,72
Природный уран ($H = 16,8$ см, диаметр 3,5 см) *	3,000	$1,00 \pm 0,04$	7,85
Молибден	2,295	$1,07 \pm 0,03$	4,51
Медь	1,990	$1,05 \pm 0,03$	3,37
Графит	0,410	$1,04 \pm 0,03$	3,05
Нержавеющая сталь	1,785	$1,01 \pm 0,03$	3,16
Эльмет (вольфрамовый сплав $H = 20$ см) *	4,500	$1,00 \pm 0,03$	1,05
Мягкая сталь	1,770	$0,84 \pm 0,03$	2,62
Алюминий	0,605	$0,68 \pm 0,03$	3,05
Титан	1,015	$0,62 \pm 0,03$	2,83
Карбид бора	0,324	$-0,29 \pm 0,04$	-4,93
Оргстекло	0,272	$-0,35 \pm 0,04$	-12,9
Фторопласт	0,210	$-0,99 \pm 0,03$	-47,0

* Нестандартный размер.

сжатых пружин. Показано, что реактивность можно уменьшить посредством быстрого удаления одного стержня из бериллия или оргстекла, как предусматривается в реакторе KPFR. Стандартные по размерам стержни из бериллия или природного урана могут быть использованы в качестве обычных органов регулирования и защиты. Большой отрицательный эффект фторопласта дает возможность использовать последний в качестве дополнительного материала в органах защиты для увеличения эффекта реактивности.

Авторы благодарят Шри М. Шринивасана за полезные обсуждения и Шри К. С. Пасупа-си за помощь в проведении эксперимента.

Поступила в Редакцию 15/XI 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Iyengar P. e. a. In: Proc. of Indo-Soviet Seminar on Fast Reactors. Kalpakkam (India), 1972, p. 249.
2. Iyengar P. In: Proc. of IAEA Symp. on Irradiation Facilities for Research Reactors. Teheran, 1973, p. 375.
3. Nargundkar V. e. a. PURNIMA-PuO₂ fuelled Zero Energy Fast Reactor. (Будет опубликовано).
4. Iyengar P. Workshop on Intense Neutron Sources. BNL, May, 1973.
5. Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я. «Атомная энергия», 1959, т. 7, вып. 5, с. 417.
6. Блохин Г. Е. и др. Там же, 1961, т. 10, вып. 5, с. 437.
7. Das S., Srinivasan M. «Atomkernenergie», 1976, Bd 27, S. 18.
8. Iyengar P. e. a. BARC/I-134, 1971.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

В 1977 году к 60-летию Великой Октябрьской социалистической революции выйдет в свет книга

Блохинцев Д. И. Рождение мирного атома. М., Атомиздат, 1977 (IV кв.), 5 л., 50 000 экз., 20 к.

Автор книги — крупный ученый в области ядерной физики, Герой Социалистического Труда Дмитрий Иванович Блохинцев. В течение девяти лет с момента создания занимал пост директора Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне (с 1956 по 1965 г.). Ныне он руководит лабораторией теоретической физики в этом институте. Имя Д. И. Блохинцева связано с созданием Первой в мире атомной электростанции. В 50-х годах, будучи директором Физико-энергетического института, автор книги руководил работами по проектированию и сооружению Первой в мире АЭС. С позиций непосредственного участника он рассказывает об этом великом событии, о первых попытках мирного применения ядерной энергии, о первой мирной атомной стройке.

Книга написана живым языком и переносит читателя в трудное и увлекательное время, в общество интереснейших людей и захватывающих научных проблем. Читатель сам ощутит атмосферу напряженного творческого поиска, испытает радость победителя.

Книга рассчитана на самый широкий круг читателей и будет интересна как школьникам, так и специалистам.

Заказы принимают все книжные магазины, распространяющие научно-техническую литературу. В Москве обращайтесь по адресу: 121019 Москва Г-10, проспект Калинина, 26, книжный магазин № 26, отдел «Книга — почтой».

А Т О М И З Д А Т