

УДК 621.039.524.2.034.44

## Экспериментальное изучение резонансного поглощения в решетках РБМК

КАМАНИН П. М., КАЧАНОВ В. М.

Активная зона РБМК имеет весьма сложный состав. Крупная гетерогенность ячеек в сочетании с большим количеством внутриканального замедлителя, наличие дополнительных поглотителей (ДП) в начале кампании и топлива с различным обогащением в режиме непрерывной перегрузки — все это вызвало необходимость систематического экспериментального изучения физики активной зоны РБМК, в том числе резонансного поглощения. В качестве параметров, характеризующих резонансное поглощение, измеряли эффективный резонансный интеграл поглощения в  $^{238}\text{U}$  и относительный коэффициент конверсии.

Эксперименты выполнены на критических и подкритических сборках с шагом решетки 25 см. Резонансные интегралы измеряли в решетках с однородной топливной загрузкой из макетных кассет с двуокисью природного и обогащенного до 2,0% урана, а также в полирешетке с шахматным расположением таких кассет. Сборки собирали на подкритическом стенде РБМК размером  $175 \times 175 \times 180$  см (49 ячеек), установленном на нейтронном пучке уран-графитового реактора Ф-1. Измерения относительного коэффициента конверсии в однородных решетках проводили как на подкритическом стенде, так и на критических сборках. В экспериментах с однородной решеткой из кассет с двуокисью природного урана критичность достигалась с помощью блоков с обогащенным ураном. Параметры штатных топливных кассет изучены на критической сборке, представляющей собой фрагмент начальной загрузки РБМК [1], окруженный блоками из обогащенного урана. Картограммы критическихборок показаны на рис. 1. Отметим, что графитовый отражатель, в котором находились органы регулирования, имел практически бесконечные размеры. Из рис. 1 видно, что в полячейке РБМК имеются четыре

типичных канала, отличающихся местоположением. Измерения резонансных интегралов проводили в каналах трех типов (1—3); относительный коэффициент конверсии измерен в канале 1. Геометрия и состав изученных кассет представлены на рис. 2.

Все измерения проведены с водой и без воды в каналах с топливными кассетами. В экспериментах на штатной полирешетке каналы с ДП и стержнями СУЗ были всегда заполнены водой, а каналы с извлеченными стержнями СУЗ (незагруженные каналы) — обезвожены.

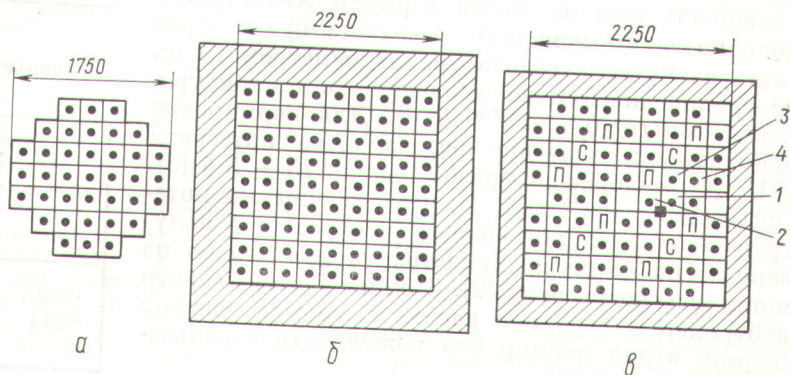
Во всех экспериментальных сборках измеряли макрораспределения отношений активаций детекторов нейтронов различных энергетических групп:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ . Эти измерения показали, что внутриборок, в том числе в фрагменте штатной полирешетки, имеется достаточно большая область (не менее  $100 \times 100 \times 100$  см) с асимптотическим спектром нейтронов, характерным для изучаемых систем. Эффективный резонансный интеграл  $J_{\text{эф}}$ , по определению, есть коэффициент пропорциональности между реальным поглощением в образце и невозмущенным потоком:

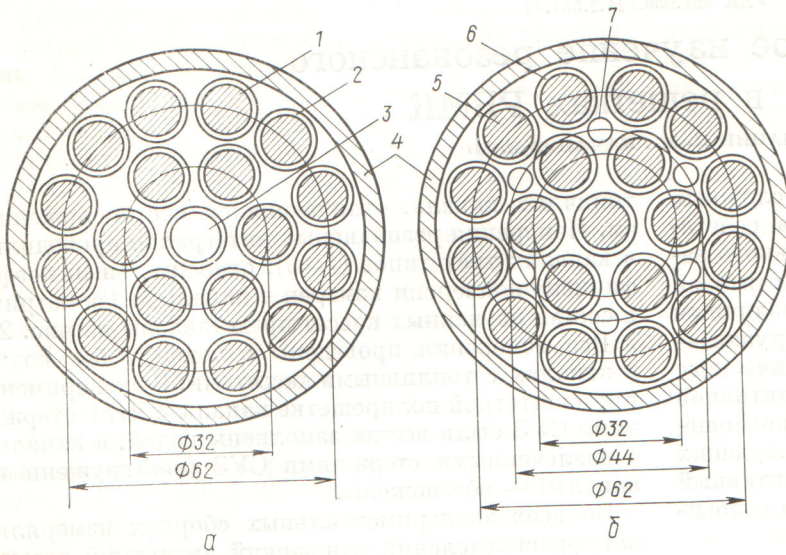
$$\int_{V_0} dV \int_{E_1}^{E_2} \Sigma(E) \Phi(E, r) dE = N_0 V_0 \bar{\Phi} J_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где  $N_0$  и  $V_0$  — ядерная концентрация поглотителя и его объем в ячейке;  $\Sigma(E)$  — сечение поглощения  $^{238}\text{U}$ ;  $\Phi(E, r)$  — поток нейтронов в резонансной области энергии в топливе;  $\bar{\Phi}$  — асимптотический (невозмущенный поглощением в топливе) поток нейтронов;  $E_1, E_2$  — пределы интегрирования от энергии кадмиевой границы до  $\infty$ .

Резонансный интеграл кассет измеряли по отношению к одиночному твэлу-стандарту, идентичному твэлам кассеты. При этом экспериментальная

Рис. 1. Картограммы критическихборок: а — кассеты с обогащением урана 2%, высота активной зоны  $H = 1,5$  м; б — кассеты из двуокиси природного урана,  $H = 2,1$  м; в — фрагмент штатной полирешетки РБМК,  $H = 3,5$  м; ● — ячейка с тепловыделяющей сборкой (ТВС); С — ячейка со стержнем СУЗ; П — ячейка с ДП; □ — незагруженная ячейка, ▨ — зона из обогащенных урановых блоков; ■ — положение стержня-стандарт при измерениях резонансного интеграла; 1—4 — типичные топливные ячейки в полирешетке





Р и с. 2. Геометрия и состав кассет: *a* — штатная кассета; *b* — макетная ТВС РВМК; 1 — твэл, плотность  $\rho_{UO_2}$ ,  $\rho = 10,4$  г/см<sup>3</sup>, обогащение  $\epsilon = 1,8\%$ ,  $\phi = 11,5$  мм; 2 — оболочка размером  $13,6 \times 0,9$  мм из сплава Zr + 1% Nb; 3 — стержень из сплава Zr + 1% Nb,  $\phi = 15,0$  мм; 4 — труба размером  $88 \times 4$  мм из Al; 5 — твэл,  $\rho = 10,4$  г/см<sup>3</sup>,  $\epsilon = 2$  или  $0,71\%$ ,  $\phi = 11,0$  мм; 6 — оболочка размером  $13,5 \times 1$  мм из Al; 7 — стержень из Al,  $\phi = 6,0$  мм

формула на основании определения (1) принимает вид

$$J_{эф} = J_{ст} \frac{\sum_i n_i (U_i/M_i)}{\sum_i n_i} \left/ \frac{U_{ст}}{M_{ст}} \right. \quad (2)$$

Здесь  $U_i$  и  $U_{ст}$  — активности урановых детекторов, пропорциональные поглощению «надкadmиевых» нейтронов в  $i$ -м твэле кассеты и в твэле-стандарте соответственно;  $M_i$  и  $M_{ст}$  — активность детекторов невозмущенного потока;  $n_i$  — число твэлов в  $i$ -м кольце кассеты;  $J_{ст}$  — резонансный интеграл твэла-стандарта. Твэл-стандарт устанавливали на границе ячейки в ее углу, где спектр замедляющихся нейтронов близок к спектру Ферми. При этом нормировку результатов для твэлов из  $UO_2$  осуществляли по формуле Хеллстранда [2]:

$$J_{ст} = 5,60 + 26,3 \sqrt{S/M}, \quad (3)$$

где  $S$  и  $M$  — поверхность и масса топлива. Эта формула определяет включающий  $1/v$ -компонент резонансный интеграл с погрешностью  $\pm 3,5\%$  для одиночных твэлов из  $UO_2$ . Для проверки правильности использования формулы Хеллстранда дополнительно измеряли резонансный интеграл твэла из металлического урана диаметром 10 мм на границе ячейки по отношению к тонкой урановой фольге ( $0,5$  мг  $^{238}U/cm^2$ ). Для нормировки использовали значение резонансного интеграла  $^{238}U$  для бесконечного разбавления  $275 \pm 5$  б [3]. Опыты показали (табл. 1), что резонансный интеграл в пределах погрешностей совпадает с полученным по формуле Хеллстранда для твэлов из металлического урана [2]. Таким образом, спектр нейтронов на границе ячейки близок к спектру Ферми, и для нормировки может быть использована формула (3).

В качестве детекторов невозмущенного потока нейтронов применяли молибденовые и таллиевые детекторы (табл. 2). Анализ энергетической зависимости сечений и параметров резонансов показал, что эти нуклиды можно использовать в качестве детекторов невозмущенного потока: их главные, т. е. дающие основной вклад в активацию, резонансы не перекрываются с резонансами  $^{238}U$ , а вклад  $1/v$ -компонента невелик —  $2\%$  для  $^{100}Mo$  и  $6\%$  для  $^{205}Tl$ .

Таблица 1

Резонансные интегралы для твэла и металлического урана в различных решетках

Тип решетки и обогащение урана	Наличие воды в каналах	$J_{эф}^*$ , б (эксперимент)
Однородная, 2%	Нет	$16,6 \pm 0,5$
	Есть	$16,5 \pm 0,6$
Полирешетка, 2% и 0,71%	Нет	$16,5 \pm 0,4$
	Есть	$16,0 \pm 0,4$
Однородная, 0,71%	Нет	$16,4 \pm 0,5$
	Есть	$16,4 \pm 0,5$

\* Расчетное значение интегралов для всех типов решеток равно  $16,7 \pm 0,6$ .

Таблица 2

Основные характеристики детекторов невозмущенного потока нейтронов [3]

Детектор	Энергия главных резонансов, эВ	Сечение при $0,0253$ эВ, б	Резонансный интеграл активации ( $J_{акт}$ ) выше $0,5$ эВ, б	Доля резонансного компонента в $J_{акт}$
$^{100}Mo$	364 и выше	$0,199 \pm 0,003$	$3,75 \pm 0,15$	0,98
$^{205}Tl$	2794 3042	$0,10 \pm 0,03$	$0,7 \pm 0,2$	0,94

В серийных экспериментах применяли молибденовые фольги, а таллиевые детекторы использовали лишь в контрольных опытах, которые показали, что оба детектора дают одинаковые результаты, несмотря на существенное различие в положении их резонансов на энергетической шкале. Для примера на рис. 3 представлены типичные распределения активаций детекторов невозмущенного потока. В решетках без воды поток нейтронов при энергии, отличающейся от энергии резонанса  $^{238}\text{U}$ , пространственно однороден в пределах ячейки. В то же время в решетке с водой наблюдается уменьшение невозмущенного потока в канале. Этот эффект можно объяснить различием замедляющей способности и энергетической зависимости сечения рассеяния водорода и графита при энергии выше 10 кэВ. Для сравнения приведены распределения резонансных активаций  $^{197}\text{Au}$ , полученные путем вычитания  $1/v$ -компонента с помощью детекторов из  $^{235}\text{U}$  и  $^{55}\text{Mn}$ . Видно, что эти распределения в каналах с водой и без воды значительно отклоняются от плоских из-за того, что при 6,7 эВ резонанс  $^{197}\text{Au}$  находится в области влияния резонанса  $^{238}\text{U}$  [4].

Скорости поглощения в  $^{238}\text{U}$  измеряли с помощью металлических фольг толщиной 0,1 мм из обедненного в 9 раз урана. Активность фольг определяли на сцинтилляционном спектрометре по  $\gamma$ -излучению  $^{239}\text{U}$  в пике, соответствующем энергии 74 кэВ. Отметим, что благодаря кадмиевым фильтрам фон продуктов деления не превышал 1%.

Таким образом, серийные измерения резонансных интегралов заключались в одновременном облучении заэкранированных кадмием урановых и молибденовых фольг в типичных твэлах исследуемых кассет и в твэле-стандарте на границе ячейки. Схема расположения детекторов в твэле-стандарте показана на рис. 4. Контрольные опыты показали, что при такой постановке эксперимента отпадает необходимость в поправках, связанных с наличием кадмиевых фильтров и отличием детекторов по составу от материала твэла.

Результаты измерения  $J_{\text{эф}}$  приведены в табл. 3—5. Из табл. 3 следует, что в пределах погрешности опыта резонансные интегралы в кассетах с различным обогащением урана одинаковы, это обусловлено небольшим отличием в содержании  $^{238}\text{U}$  для этих решеток. Замена центрального твэла на алюминиевый стержень такого же диаметра не влияет на резонансный интеграл.

В табл. 4 приведены средние по топливу резонансные интегралы для кассет в однородных решетках и шахматной полирешетке;  $1/v$ -вклад принимался равным  $1,2 \pm 0,1$  б для кадмиевой границы 0,55 эВ. Резонансные интегралы в полирешетке и однородных сборках одинаковы в пределах погрешностей опыта. Эффект воды в каналах составляет ~30%.

Резонансные интегралы для кассет различных типов в макрочайке одинаковы в пределах погрешностей опыта, несмотря на наличие поглотителей, а также незагруженных ячеек. Резонансные интегралы для ТВС в штатной полирешетке совпадают в пределах погрешностей с резонансными интегралами в однородных сборках (см. табл. 5). В целях более детального изучения эффекта воды в каналах с ТВС измеряли резонансные интегралы для кассет с различной геометрией пучка, а именно в кассетах с двуокисью природного урана из 19 твэлов с различным шагом  $S$  твэлов решетки (рис. 5, а). Результаты этих опытов

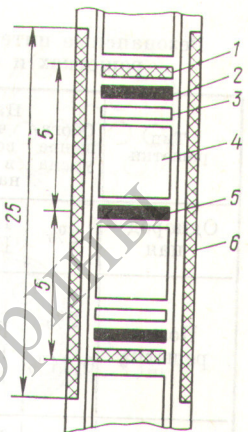


Рис. 4. Расположение детекторов в твэле при измерениях резонансного интеграла: 1 — фильтр, Cd, толщина  $\delta = 0,5$  мм; 2 — детектор, Mo,  $\delta = 0,2$  мм; 3 — прокладка, Al,  $\delta = 0,1$  мм; 4 — таблетка  $\text{UO}_2$ ; 5 — детектор, U,  $\delta = 0,4$  мм; 6 — фильтр, Cd,  $\delta = 0,5$  мм. Размеры на рисунке даны в мм

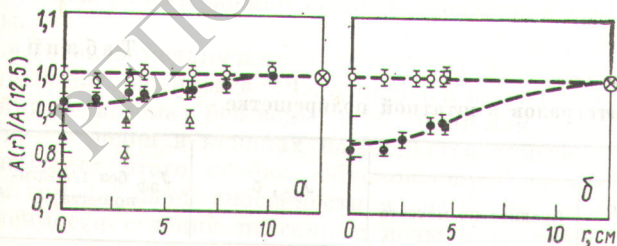


Рис. 3. Экспериментальное распределение активации детекторов потока замедляющих нейтронов по ячейке в однородных решетках в сборке из кассет с обогащением урана 2% (а) и сборке из кассет с двуокисью природного урана (б):  $\circ$ ,  $\bullet$  —  $^{100}\text{Mo}$ ;  $\square$ ,  $\blacksquare$  —  $^{205}\text{Tl}$ ;  $\triangle$ ,  $\blacktriangle$  —  $^{197}\text{Au}$  в решетках с каналами без воды и с водой соответственно

Таблица 3  
Отношения резонансных интегралов в различных твэлах кассет и твэле-стандарте в однородных решетках

Обогащение урана	Число твэлов в кассете	Наличие воды в каналах	Положение твэла в кассете		
			Центр	Внутреннее кольцо	Внешнее кольцо
2%	19	Нет	0,648±0,016	0,670±0,018	0,782±0,020
		Есть	0,877±0,022	0,881±0,022	0,959±0,023
0,71%	19	Нет	0,646±0,020	0,668±0,017	0,768±0,019
		Есть	0,859±0,024	0,864±0,022	0,979±0,023
—	18	Нет	—	0,666±0,020	0,763±0,021
		Есть	—	0,868±0,023	0,986±0,024

Таблица 4

Резонансные интегралы для кассет в однородных решетках и «шахматной» полирешетке

Тип решетки	Обогащение урана	Наличие воды в каналах	$J_{эф}/J_{ст}$	$J_{эф}$ , б	$J_{эф}$ без $1/v$ -компонента, б
Однородная	2%	Нет Есть	$0,740 \pm 0,020$ $0,930 \pm 0,023$	$15,6 \pm 0,7$ $19,6 \pm 0,8$	$14,4 \pm 0,7$ $18,4 \pm 0,8$
Полирешетка	2% 0,71%	Нет	$0,736 \pm 0,019$	$15,5 \pm 0,7$	$14,3 \pm 0,7$
		Есть	$0,910 \pm 0,024$	$19,2 \pm 0,8$	$18,0 \pm 0,8$
		Нет	$0,736 \pm 0,020$	$15,5 \pm 0,6$	$14,3 \pm 0,6$
		Есть	$0,953 \pm 0,023$	$20,1 \pm 0,8$	$18,9 \pm 0,8$
Однородная	0,71%	Нет Есть	$0,730 \pm 0,019$ $0,936 \pm 0,023$	$15,4 \pm 0,7$ $19,7 \pm 0,8$	$14,2 \pm 0,7$ $18,5 \pm 0,8$

приведены в табл. 6. Здесь же приведены расчетные данные, полученные по формулам Лесли и Джонсона [5]. Расчет систематически занижает  $J_{эф}$  в среднем на 5%, что, однако, находится почти в пределах погрешностей опыта.

Для изучения влияния слоя воды между наружным кольцом твэлов и трубой, а также взаимного экранирования твэлов в пучке проводили опыты с различной конфигурацией внешнего кольца твэлов (рис. 5, б и табл. 7). Из табл. 7 следует, что слой воды между внешними твэлами и трубой слабо влияет на резонансный интеграл кассеты.

Относительный коэффициент конверсии  $f$ , измерившийся в экспериментах, определяется по формуле

$$f = \frac{U_x^{28}}{U_{т.с}^{28}} / \frac{U_x^{25}}{U_{т.с}^{25}}, \quad (4)$$

где  $U_x^{28}/U_{т.с}^{28}$  и  $U_x^{25}/U_{т.с}^{25}$  — отношение активностей урановых детекторов в топливе исследуемой сборки и в тепловом спектре нейтронов, пропорциональных радиационному поглощению в  $^{238}\text{U}$  и скорости деления  $^{235}\text{U}$  соответственно.

В качестве теплового спектра при измерениях на подкритическом стенде РБМК использовали

графитовую тепловую колонну реактора Ф-1 размером  $120 \times 120 \times 240$  см. В экспериментах на критических сборках тепловым считался спектр на расстоянии 80—100 см от границы активной зоны в графитовом отражателе. Таким образом, измерения  $f$  заключались в одновременном облучении детекторов в исследуемых сборках и тепловом спектре нейтронов.

На начальном этапе экспериментов активность  $U^{28}$  измеряли по  $\gamma$ -пику 74 кэВ  $^{239}\text{U}$ , образующегося в обедненных урановых детекторах. Активность  $U^{25}$  регистрировали по интегральной  $\gamma$ -активности продуктов деления, накопленных в детекторах из дисперсионного сплава алюминия и урана с обогащением 90%.

В дальнейшем параметр  $f$  измеряли на спектрометре с Ge(Li)-детектором по  $\gamma$ -пикам 278 кэВ  $^{238}\text{Np}$  и 293 кэВ  $^{143}\text{Ce}$  от детектора-таблетки толщиной  $\sim 1$  мм, не отличающейся по составу от стандартных таблеток твэлов [6]. В этом случае отношение  $U_x^{25}/U_{т.с}^{25}$  в формуле (4) умножали на коэффициент  $[(1 + \delta^{28})(Y_{\text{Ce}}^{28}/Y_{\text{Ce}}^{25})]^{-1}$ , учитывающий вклад делений  $^{238}\text{U}$  в активность  $^{143}\text{Ce}$  ( $\delta^{28}$  — отношение макроскопических сечений деления  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ , а  $Y_{\text{Ce}}^{28}$ ,  $Y_{\text{Ce}}^{25}$  — выходы  $^{143}\text{Ce}$  при делении  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ ). Поправка составляет  $\sim 3\%$ . Сравнение результатов, полученных с помощью спинтилляционного и Ge(Li)-спектрометров, показало, что обе методики дают одинаковые результаты в пределах погрешностей опыта. Предпочтение было отдано методике с Ge(Li)-спектрометром, так как она позволяет устранить систематические погрешности, связанные с отличием детекторов от материала твэлов.

Из данных в табл. 8 следует, что значения  $f$ , измеренные на подкритическом и критическом стендах, совпадают в пределах погрешностей опыта. Таким образом, если в экспериментальной сборке имеется достаточно большая (размерами более трех длин миграции нейтронов в решетке) область с асимптотическим спектром, то измеренные значения  $f$  характерны для исследуемой решетки. Значения  $f$  для штатной полирешетки находятся в хорошем согласии с результатами

Таблица 5

Результаты измерений резонансных интегралов в штатной полирешетке

Тип канала	Наличие воды в каналах	$J_{эф}/J_{ст}$			$J_{эф}$ , б	$J_{эф}$ без $1/v$ -компонента, б
		Внутреннее кольцо твэлов	Внешнее кольцо твэлов	Среднее по кассете		
1	Нет	$0,636 \pm 0,019$	$0,759 \pm 0,018$	$0,718 \pm 0,018$	$15,4 \pm 0,6$	$14,2 \pm 0,6$
	Есть	$0,898 \pm 0,028$	$0,940 \pm 0,015$	$0,926 \pm 0,019$	$19,8 \pm 0,8$	$18,6 \pm 0,8$
2	Нет	$0,605 \pm 0,020$	$0,734 \pm 0,018$	$0,691 \pm 0,018$	$14,8 \pm 0,7$	$13,6 \pm 0,7$
	Есть	$0,834 \pm 0,020$	$0,910 \pm 0,022$	$0,885 \pm 0,021$	$18,9 \pm 0,8$	$17,7 \pm 0,8$
3	Нет	$0,604 \pm 0,015$	$0,734 \pm 0,018$	$0,691 \pm 0,017$	$14,8 \pm 0,6$	$13,6 \pm 0,6$
	Есть	$0,869 \pm 0,024$	$0,905 \pm 0,025$	$0,893 \pm 0,025$	$19,1 \pm 0,9$	$17,9 \pm 0,9$

Таблица 6

Резонансные интегралы для кассет с различным шагом решетки твэлов

Наличие воды в каналах	Шаг решетки твэлов, мм	$J_{эф}$ , эксперимент, б	$J'_{эф}$ , рассчитано по формулам работы [5], б	$\frac{J'_{эф} - J_{эф}}{J_{эф}} \times 100\%$
Нет	15	14,2±0,8	13,2	-7%
	16	14,2±0,7	13,5	-5%
	18	14,6±0,8	14,0	-4%
Есть	15	18,6±0,9	17,1	-8%
	16	18,5±0,8	18,0	-3%
	18	20,0±1,0	18,8	-6%

Таблица 7

Относительные резонансные интегралы для кассет с различным расположением твэлов во внешнем кольце

Вариант пучка твэлов (рис. 5, б)	Без воды в каналах	С водой в каналах	Вариант пучка твэлов (рис. 5, б)	Без воды в каналах	С водой в каналах
I	1	1	III	0,99±0,03	0,96±0,03
II	1,00±0,02	1,01±0,02	IV	0,99±0,03	0,98±0,03

Таблица 8

Экспериментальные значения относительного коэффициента конверсии

Тип решетки и обогащение урана	Наличие воды в каналах	Критический стэнд	Подкритический стэнд
Однородная, 2%	Нет	2,22±0,06	2,29±0,06
	Есть	1,90±0,05	1,99±0,05
Однородная, 0,71%	Нет	1,46±0,03	1,51±0,03
	Есть	1,33±0,03	1,26±0,03
Штатная полирешетка, 1,8%	Нет	2,09±0,03	—
	Есть	1,89±0,04	—

линейной экстраполяции величин  $f$  для однородных сборок к обогащению урана 1,8%.

На основании экспериментальных результатов настоящей работы можно сделать следующие выводы.

1. Поток замедляющихся нейтронов, не возмущенный поглощением в  $^{238}\text{U}$ , однороден в пределах ячейки в системах без воды, в то время как в решетках с водой в каналах наблюдается заметное уменьшение этого потока, обусловленное различием замедляющей способности и энергетической зависимости сечений рассеяния воды и графита.

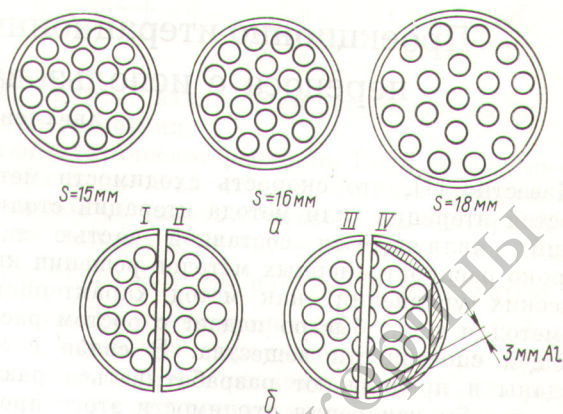


Рис. 5. Экспериментальные кассеты с различной геометрией пучка твэлов: а — кассеты с различным шагом  $S$  решетки твэлов; б — кассеты с различным расположением твэлов внешнего кольца ( $S = 16$  мм)

2. Резонансные интегралы в однородных решетках и шахматной полирешетке одинаковы, несмотря на различную скорость генерации быстрых нейтронов в каналах с различным обогащением. В штатной полирешетке резонансные интегралы одинаковы для всех топливных каналов независимо от наличия поглотителей в виде ДП и стержней СУЗ, а также незагруженных каналов.

3. Измерения с различной геометрией пучка твэлов показали, что эффект воды в канале определяется в основном водой в межтвэльном пространстве, и в расчетах может быть успешно использована модель поверхности, огибающей твэлы внешнего кольца.

4. Относительный коэффициент конверсии для штатной полирешетки находится в хорошем согласии с результатами линейной экстраполяции  $f$  для однородных решеток.

В заключение авторы выражают благодарность М. Б. Егизарову и Н. И. Лалетину за чрезвычайно полезное обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 2, с. 127.
2. Hellstand E. In: Reactor Physics in Resonance and Thermal Regions. San Diego, 1966, p. 151.
3. BNL-325, 3Ed. V.1. N. Y., 1973.
4. Доль А. И., Кисиль И. М., Маркелов И. П. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 5, с. 425.
5. Leslie D., Jonsson A. «Nucl. Sci. Engng», 1965, v. 23, p. 82.
6. Юрова Л. Н. и др. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 5, с. 412.

Поступила в Редакцию 05.06.78.