

дели элементов: шесть вольфрамовых трубочек, внутри которых находились таблетки  $UO_2$ . Тепловыделение измерялось двумя независимыми способами: методом автордиографии детекторов, дающим пространственную картину распределения тепловыделения по объему сердечника, и калориметрическим методом с помощью радиационно-термического дивергатора теплового потока. Измерения показали, что наблюдается существенная неравномерность тепловыделения по высоте сборки: относительная средняя по объему сердечника плотность объемного тепловыделения в центральных элементах в 1,37, а в средних в 1,28 раза больше, чем в периферийных. Наблюдается неравномерность тепловыделения и по высоте отдельных элементов, особенно крайних (см. рисунок).

С использованием полученных данных по распределению тепловыделения по методике работы [4] были рассчитаны распределения температур эмиттеров элементов испытанной сборки для режима, соответствующего началу ресурсных испытаний. Результаты этих расчетов также приведены на рисунке.

УДК 621.039.519.4

## О влиянии гетерогенности на измерения интегральных параметров в подкритических системах

ЮРОВА Л. Н., БУШУЕВ А. В., НАУМОВ В. И., ДУВАНОВ В. М., ХРЕННИКОВ Н. Н., ЗУБАРЕВ В. Н.

Важное место в исследованиях по физике реакторов занимают интегральные эксперименты, связанные с измерением отношений скоростей реакций. К числу основных параметров, отражающих физические процессы в тепловых реакторах, относятся эффективные резонансные интегралы, отношения  $\langle \sigma_c^{28} \rangle / \langle \sigma_f^{25} \rangle$ ;  $\langle \sigma_f^{25} \rangle / \langle \sigma_f^{49} \rangle$ ;  $\rho^{28}$ ;  $\delta^{28}$ ;  $\delta^{25}$ . Требуемая в настоящее время точность измерения перечисленных параметров составляет 2–3%.

С использованием реактора в качестве мощного источника нейтронов появляется возможность проведения измерений основных интегральных параметров на подкритических системах относительно небольших размеров [1]. При этом в связи с измерениями на гетерогенных подкритических системах возникает проблема создания таких условий, при которых спектр нейтронов в экспериментальной системе адекватен спектру в критической системе с аналогичной структурой.

**Заключение.** Результаты послереакторных исследований термоэмиссионной сборки с герметичными эмиттерами, проработавшей в реакторе 2670 ч, подтвердили предполагаемые причины снижения электрической мощности сборки в процессе испытаний. Для увеличения ресурса аналогичныхборок необходимо создать коллекторный пакет со стабильными теплофизическими свойствами и организовать непрерывный вывод газообразных продуктов деления из эмиттерного узла.

Поступила в Редакцию 23/IV 1975 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекмухамбетов Е. С. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 6, с. 387.
2. Беркатый В. И. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 31, вып. 6, с. 585.
3. Лихачев Ю. И., Вахрамеева В. В. В сб.: Труды симп. СЭВ «Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах». Обнинск. изд. ФЭИ, 1967, докл. IV/7.
4. Бровальский Ю. А. и др. В сб.: Докл. сов. ученых на II Междунар. конф. по термоэмиссионному преобразованию энергии. М., изд. ВНИИТ, 1969, с. 281.

Интерпретация результатов экспериментов на подкритических системах обычно основывается на теории материального параметра [2], а точнее — на возможности разделения энергетической и пространственных переменных в области установившегося нейтронного спектра. Разделение переменных позволяет, в частности, получить величину материального параметра

$$k^2 = \alpha_1^2 - \beta^2 \quad (1)$$

из измеренного аксиального распределения нейтронов, характеризуемого параметром  $\beta^2$ , и известного собственного числа  $\alpha_1^2$ , связанного с поперечным размером системы. Теория материального параметра может с успехом применяться к гетерогенным системам с достаточно большим числом ячеек, которые можно рассматривать как квазигомогенные. Однако в тех случаях, когда подкритическая гетерогенная система содержит относительно небольшое чис-



ло ячеек, энергетическая и пространственные переменные полностью не разделяются. При этом распределение быстрых и тепловых нейтронов в поперечном сечении системы нельзя характеризовать единым собственным числом  $\alpha_1^2$ , а спектр нейтронов может отличаться по отдельным блокам системы и изменяться с изменением ее размеров. Отмеченный эффект приводит к необходимости обоснования выбора размеров системы, обеспечивающих приемлемую точность измерений.

В целях выяснения масштабов эффекта и возможности использования теории материального параметра при анализе результатов, получаемых на гетерогенных подкритических системах, проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования физических параметров уран-графитовых систем с различным числом ячеек. Для теоретического анализа эффектов гетерогенности использовалась методика Галанина — Фейнберга [3].

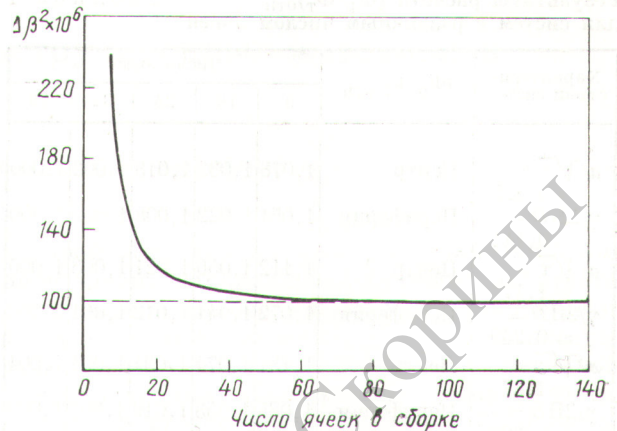
Предполагая, что высота системы достаточно велика, так что вдали от источника нейтронов, расположенного в плоскости, перпендикулярной к осям блоков, устанавливается экспоненциальное распределение нейтронов с постоянной спада  $\beta$ , пространственно-энергетическое распределение нейтронов можно представить в виде

$$\Phi(x, y, z, E) = \Phi_1(x, y, E) \exp(-\beta z), \quad (2)$$

где энергетическая и пространственные переменные, характеризующие распределение нейтронов в поперечном сечении, не разделены. Подстановка выражения (2) в гетерогенное уравнение приводит к задаче на определение параметра, зависящего от пространственно-энергетического распределения нейтронов в поперечном сечении. Аналогичная задача решается для эквивалентной по свойствам гомогенизированной системы, допускающей полное разделение переменных. В расчетах использовалась возрастная модель замедления без учета анизотропии диффузии нейтронов.

В качестве основных параметров, характеризующих гетерогенность размножающей системы с шагом решетки  $a$ , можно принять параметр  $a/\sqrt{\tau}$  и тепловую постоянную  $\gamma$ , равную отношению числа нейтронов, поглощаемых блоком в единицу времени, к плотности нейтронов на его поверхности.

Расчеты выполнялись для уран-графитовых систем с различным числом ячеек при разных значениях характерных параметров. На рисунке приведены результаты расчета поправки  $\Delta\beta^2 = \beta_{\text{гом}}^2 - \beta_{\text{гет}}^2$ , обусловленной гетерогенностью



Зависимость поправки  $\Delta\beta^2$  от числа ячеек в сборке

системы с  $a/\sqrt{\tau} = 4,11$  и  $\gamma/2PD = 0,249$  при отношении объемов графита и урана  $V_C/V_U = 38$ . Как видно из рисунка, поправка  $\Delta\beta^2$  заметно возрастает при уменьшении числа ячеек. В частности, для решетки с природным ураном, имеющей материальный параметр  $\kappa^2 \approx 100 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-2}$  в системе из 20 ячеек,  $\Delta\beta^2 \approx 15 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-2}$ , т. е. относительный сдвиг в определяемой величине материального параметра составляет около 15%. Увеличение  $\kappa^2$  должно приводить к занижению прогнозируемого критического размера на основе данных экспоненциального опыта. Полученный результат качественно согласуется с известными расчетными данными по величине критической загрузки для систем с малым числом блоков [4].

Чтобы выяснить, как влияет гетерогенность на спектр нейтронов в системе, проводились расчеты отношений потоков резонансных и тепловых нейтронов  $\Phi_p/\Phi_T$  для систем с различным шагом решетки в зависимости от числа ячеек. Тепловая постоянная выбиралась таким образом, чтобы квадрат длины миграции решетки, рассчитанный по формуле

$$M^2 = L^2(1 - \theta) + \tau, \quad (3)$$

сохранялся во всех случаях неизменным.

В табл. 1 приведены расчетные значения  $(\Phi_p/\Phi_T)_{\text{отн}}$  для центрального и периферийного блоков. Из этих данных видно, что  $\Phi_p/\Phi_T$  зависит от числа ячеек и непостоянно по блокам системы. С увеличением числа ячеек  $\Phi_p/\Phi_T$  стремится во всех блоках к асимптотическому значению, причем тем медленнее, чем сильнее выражена гетерогенность.

Если принять допустимое отличие  $\Phi_p/\Phi_T$  от асимптотического значения равным, напри-



Результаты расчета  $(\Phi_p/\Phi_T)_{отн}$  для систем с различным числом ячеек

Таблица 1

Характеристики систем	$(\Phi_p/\Phi_T)_{отн}$	Число ячеек				
		9	16	25	36	49
$a/\sqrt{\tau} = 0,825$	Центр	1,078	1,032	1,013	1,002	1,000
$\gamma/2PD = 0,141$	Периферия	1,051	1,022	1,008	1,000	1,000
$a/\sqrt{\tau} = 1,11$	Центр	1,112	1,056	1,021	1,003	1,000
$\gamma/2PD = 0,249$	Периферия	1,072	1,041	1,012	1,001	1,000
$a/\sqrt{\tau} = 1,37$	Центр	1,131	1,074	1,034	1,004	1,001
$\gamma/2PD = 0,386$	Периферия	1,085	1,053	1,019	1,002	1,000

мер, 2%, получим для уран-графитовых решеток в диапазоне  $a/\sqrt{\tau} = 0,8 \div 1,4$  (что достаточно характерно для систем с природным и слабообогаченным ураном) минимальный размер подкритической системы, обеспечивающей допустимое отклонение спектра нейтронов, 20—40 ячеек в зависимости от степени гетерогенности. Аналогичные результаты получены и для других систем.

Эксперименты по изучению влияния числа ячеек на измеряемые параметры проводились на подкритических уран-графитовых системах с природным ураном с использованием в качестве источника пучка нейтронов из реактора ИРТ. Число ячеек в исследуемой решетке с  $a/\sqrt{\tau} = 1,11$  при  $V_C/V_U = 38$  изменялось от 9 до 81. Высота систем не изменялась и во всех экспериментах составляла 270 см. Измерения проводились в центральном канале системы на расстоянии 135 см от нижнего торца заведомо в области асимптотического спектра нейтронов. Измерялось кадмиевое отношение  $R_{Cd}^{28}$  и  $\langle \sigma_f^{25} \rangle / \langle \sigma_f^{49} \rangle$ . Измерения выполнялись активационным методом с использованием Ge(Li)-спектрометра. Скорость реакции  $^{238}U(n, \gamma)$  определялась по интенсивности  $\gamma$ -излучения  $^{239}Np$  при энергии 277 кэВ; скорость деления по интенсивности  $\gamma$ -излучения  $^{143}Ce$  при 283 кэВ. Методики измерений и обработки данных описаны в работе [1]. Результаты измерений, отнесенные к значениям параметров системы с числом ячеек  $n = 81$ , представлены в табл. 2.

Зависимость относительных величин  $R_{Cd}^{28}$  и  $\langle \sigma_f^{25} \rangle / \langle \sigma_f^{49} \rangle$  от числа ячеек

Таблица 2

Число ячеек	$(R_{Cd}^{28})_{отн}$	$\langle \sigma_f^{25} \rangle / \langle \sigma_f^{49} \rangle_{отн}$
9	$0,899 \pm 0,018$	$0,971 \pm 0,007$
25	$1,004 \pm 0,020$	$0,989 \pm 0,008$
49	$0,989 \pm 0,015$	$0,989 \pm 0,010$
81	$1,000 \pm 0,012$	$1,000 \pm 0,016$

Из табл. 2 видно, что как в величине  $R_{Cd}^{28}$ , так и в отношении  $\langle \sigma_f^{25} \rangle / \langle \sigma_f^{49} \rangle$  зависимость от числа ячеек проявляется только при переходе от 25 к 9 ячейкам. При этом  $R_{Cd}^{28}$  уменьшается на 10%, а  $\langle \sigma_f^{25} \rangle / \langle \sigma_f^{49} \rangle$  — на 3%.

Таким образом,  $R_{Cd}^{28}$  в данном случае является наиболее чувствительным параметром к изменению размеров системы. При 25 ячейках и более измеренные параметры в пределах экспериментальных погрешностей остаются неизменными. Если учесть, что величина измеряемого параметра  $\delta^{28}$  в таких решетках практически не зависит от размеров системы, можно сделать вывод, что постоянство  $R_{Cd}^{28}$  при вариации числа ячеек может служить достаточно объективным критерием для выбора размеров системы, обеспечивающих возможность измерения совокупности основных интегральных физических параметров, характеризующих спектр нейтронов в решетке. При этом высота системы должна обеспечивать установление собственного спектра, допускающего представление потока в форме (2).

Результаты относительных измерений  $R_{Cd}^{28}$  удовлетворительно согласуются с данными гетерогенных расчетов  $\Phi_p/\Phi_T$ . Можно полагать, что для гетерогенных систем на тепловых нейтронах приемлемый размер, удовлетворяющий заданной точности измерений, может быть определен на основе расчетов по методике Галанина — Фейнберга.

Поступила в Редакцию 16/VII 1975 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Юрова Л. Н. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 4, с. 245.
- Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
- Фейнберг С. М. В сб.: Реакторостроение и теория реакторов. М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 152.
- Галанин А. Д. Там же, с. 191.