

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

24 $\frac{53}{A-92}$

п БИБЛИОТЕКА

Атомная энергия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ,
Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН,
Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН,
И. Ф. КВАРЦАВА, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора),
А. К. КРАСИН, А. В. ЛЕБЕДИНСКИЙ, А. И. ЛЕЙТУНСКИЙ,
М. Г. МЕШЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор),
И. И. НОВИКОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО,
К. Э. ЭРГИС, М. В. ЯКУТОВИЧ

147612

МАРТ

ТОМ 14

1963

ВЫП. 3





Определение внешнего блок-эффекта в размножающих системах с тяжеловодным замедлителем

В. Ф. Белкин, О. В. Шведов, Б. П. Кочуров

Определялся внешний блок-эффект в тяжеловодной размножающей системе путем измерения плотности тепловых и надтепловых нейтронов в ячейке решетки. Для изучавшихся систем внешний блок-эффект и распределение плотности нейтронов по ячейке, определенные экспериментально и рассчитанные, находятся в хорошем согласии. В результате экспериментов обнаружен заметный блок-эффект для надтепловых нейтронов.

При расчетах гетерогенных реакторов существенную роль играет внешний блок-эффект, определяющий величину коэффициента теплового использования. Цель настоящей работы — экспериментальное определение внешнего блок-эффекта и сравнение его значений с расчетными для реактора на природном уране с прутковыми тепловыделяющими элементами и тяжеловодным замедлителем [1].

Эксперимент

Экспериментально внешний блок-эффект определялся путем измерения распределения плотности нейтронов в замедлителе. Измерения проводились на стенде тяжеловодного реактора с прутковыми тепловыделяющими элементами. Изучался внешний блок-эффект как для тепловых, так и для надтепловых нейтронов, причем детекторами тепловых нейтронов служили диски с диспрозием диаметром 0,42 см и плотностью диспрозия $\sim 3 \text{ мг/см}^2$, а детекторами надтепловых нейтронов — индиевые диски того же диаметра с плотностью индия $\sim 25 \text{ мг/см}^2$, закрытые со всех сторон кадмием толщиной $\sim 0,025 \text{ см}$. Для определения распределения плотности нейтронов эти детекторы, завернутые в резиновую пленку толщиной $\sim 0,005 \text{ см}$, помещались в замедлитель и фиксировались там на алюминиевой фольге толщиной 0,015 см. Относительная активность детекторов измерялась на установке, описанной в работе

[2]. Схема расположения детекторов для решетки с шагом 26 см и каналами типа 100/0,252* приведена на рис. 1. Для решеток остальных типов детекторы располагались аналогично, но покрывали не половину, а 1/8 часть ячейки (1—15), причем размещались около канала, наименее удаленного от центра, в средней по высоте плоскости.

На рис. 2 приведено распределение плотности нейтронов для решетки с шагом 26 см и каналами типа 100/0,252. На нем показано распределение плотности тепловых нейтронов, усредненное по одинаково расположенным в ячейке точкам и измеренное по схеме рис. 1 в средней по высоте плоскости и в двух плоскостях, которые находятся выше нее, около канала, отстоящего от оси активной зоны на 36,8 см. Кроме того, приведено распределение в средней по высоте плоскости, но в ячейке, расположенной на периферии (расстояние между осью активной зоны и осью канала, около которого проводились измерения, 110,3 см). Приведено также распределение плотности надтепловых нейтронов, которое проводилось в четырех плоскостях, расположенных в разных по высоте местах, по схеме рис. 1 (точки 1—5, 10, 14, 13, 12, 11).

Во все экспериментальные результаты, которые были использованы для построения

* Устройство каналов и система их обозначения описаны в работе [2].

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные значения внешнего блок-эффекта $W = \frac{\bar{N}_{зам}}{N_0}$

Тип канала	Значения блок-эффекта	Шаг решетки, см			
		21	23	26	29
100/0,208	$W_{эксп}$	1,331	1,385	1,484	1,513
	$W_{расч}$	1,328	1,374	1,437	1,497
	$W_{диф}$	1,269	1,315	1,378	1,435
100/0,252	$W_{эксп}$	1,345	Не определен	1,514*	Не определен
	$W_{расч}$	1,379	» »	1,504	» »
	$W_{диф}$	1,310	» »	1,435	» »
112/0,230	$W_{эксп}$	Не определен	1,393	1,496	1,552
	$W_{расч}$	» »	1,416	1,496	1,571
	$W_{диф}$	» »	1,349	1,420	1,503
112/0,252	$W_{эксп}$	Не определен	1,411	1,505	1,573
	$W_{расч}$	» »	1,450	1,535	1,615
	$W_{диф}$	» »	1,378	1,462	1,540

Примечания: 1. $W = \frac{\bar{N}_{зам}}{N_0}$, где $N_{зам}$ — среднее значение плотности нейтронов в замедлителе; N_0 — среднее значение плотности тепловых нейтронов на внешней поверхности кессонной трубы, около которой производились измерения; нормировка $N_0=1$. 2. $W_{эксп}$ — экспериментальный блок-эффект. 3. $W_{расч}$ — по формулам (1)–(3). 4. $W_{диф}$ — по формулам (1), (2) (через $q_{диф}$). 5. Точность экспериментальных значений $\pm 0,03$; для случая, отмеченного звездочкой, точность $\pm 0,015$.

графиков и вычисления внешнего блок-эффекта, были введены поправки на спадание

Таблица 2

Величина внешнего блок-эффекта в зависимости от места измерения для решетки с шагом 26 см и каналами типа 100/0,252

Расстояние от средней по высоте активной зоны плоскости до плоскости, в которой производились измерения	Расстояние от оси канала до центра активной зоны, см		
	36,8	110,3	36,8
	тепловые нейтроны		надтепловые нейтроны
0	1,514 \pm 0,015	1,503 \pm 0,015	1,079 \pm 0,02
40	1,523 \pm 0,015	—	1,082 \pm 0,02
70	1,499 \pm 0,015	—	1,078 \pm 0,02
90	—	—	1,078 \pm 0,02

плотности к периферии активной зоны в соответствии с функцией Бесселя.

В табл. 1 приведены величины внешнего блок-эффекта для разных шагов решетки и типов каналов, полученные из экспериментальных данных, и их расчетные значения. В табл. 2 приведена экспериментальная величина внешнего блок-эффекта для тепловых и надтепловых нейтронов, полученная из результатов измерений в разных местах активной зоны для решетки с шагом 26 см и каналами типа 100/0,252.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений внешнего блок-эффекта

1. В работах [3, 4] для величины блок-эффекта приведены простые формулы, исправляющие погрешность диффузионного при-

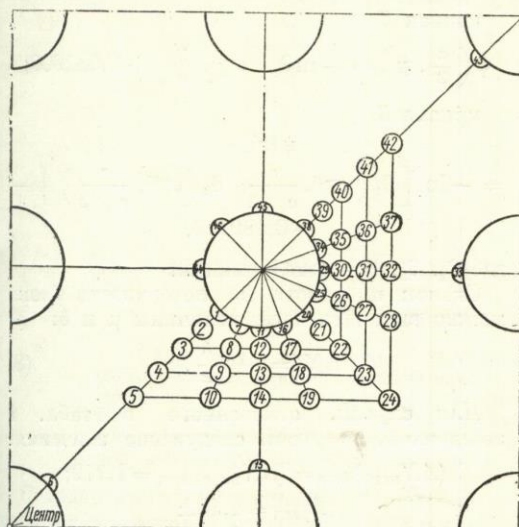


Рис. 1. Схема расположения детекторов при измерениях в решетке с шагом 26 см и каналами типа 100/0,252.

ближения и имеющие хорошую точность (порядка точности P_3 -приближения метода сферических гармоник). Отношение средней плотности в замедлителе к средней плотности на внутренней поверхности замедлителя равно [5]:

$$W = \frac{\bar{N}_{\text{зам}}}{N_0} = 1 + \frac{q_1}{q_{\text{гом}}QR}, \quad (1)$$

где $q_{\text{гом}} = \frac{V_{\text{зам}} l_{\text{аУ}}}{V_{\text{У}} l_{\text{азам}}}$ ($V_{\text{У}}$ — площадь урана; $V_{\text{зам}}$ — площадь замедлителя); Q — коэффициент экранировки; R — скачок плотности нейтронов на зазоре. При расчете величин Q и R использовались экспериментальные данные работы [6]. Величина $q_1 = q_{1\text{диф}} + \Delta q_1$. Для квадратной решетки

$$q_{1\text{диф}} = \frac{a^2}{4\pi L_{\text{зам}}^2} \left(\ln \frac{1}{\epsilon} - \frac{3}{2} + \frac{1}{2} \epsilon \right), \quad (2)$$

где a^2 — площадь ячейки; $L_{\text{зам}}$ — длина диффузии в замедлителе; $\epsilon = \frac{a^2 - V_{\text{зам}}}{a^2}$.

Недиффузионная поправка Δq_1 имеет вид [3, 4]

$$\Delta q_1 = \frac{V_{\text{зам}}}{4\pi L_{\text{зам}}^2} \delta. \quad (3)$$

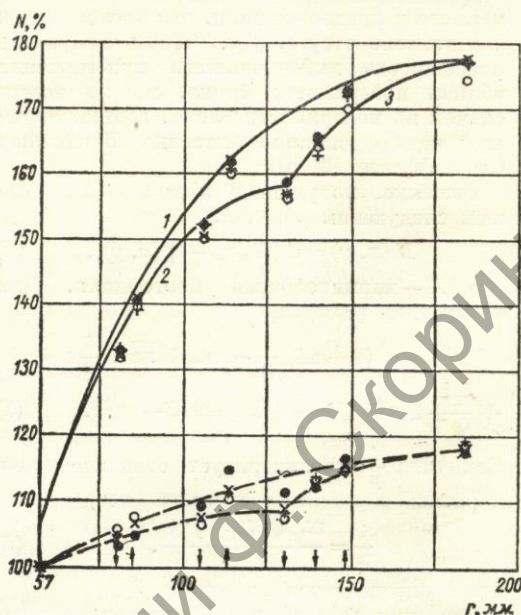


Рис. 2. Распределение плотности нейтронов N в ячейке решетки с шагом 26 см и каналами типа 100/0,252:

× — в плоскости, средней по высоте активной зоны; ○ — в плоскости, расположенной в 40 см над средней плоскостью; ● — в плоскости, расположенной в 70 см над средней плоскостью; + — распределение надтепловых нейтронов в плоскости, расположенной в 90 см над средней плоскостью, и тепловых нейтронов в средней по высоте активной зоны плоскости около канала, отстоящего от оси бака на 110,3 см. Стрелки указывают, к какой кривой относятся расположенные над ними экспериментальные точки. Погрешности экспериментальных точек и кривых составляют $\pm 2\%$ для тепловых нейтронов (верхняя группа кривых) и $\pm 4\%$ для надтепловых нейтронов (нижняя группа кривых). На схеме расположения детекторов кривая 1 соответствует точкам 1—5; кривая 2 — точкам 11—14; кривая 3 — точкам 14, 10, 5.

Здесь $\delta = 2 \frac{l_{\text{тр}}}{q} \left(\lambda - \frac{2}{3} \right)$, где $l_{\text{тр}}$ — транспортная длина в замедлителе; q — радиус блока (вместе с зазором); λ — граничное условие для черного тела [7]. В табл. 1 приведены значения $W_{\text{расч}}$ и $W_{\text{диф}}$, вычисленные путем использования q_1 и $q_{1\text{диф}}$ соответственно (1). В данном случае поправка Δq_1 невелика и составляет $\sim 15\%$ от q_1 . Как видно из таблицы, значения $W_{\text{расч}}$ находятся в лучшем согласии с экспериментом, чем значения $W_{\text{диф}}$.

2. Распределение плотности нейтронов в замедлителе можно описать на основе результатов работы [8], в которой использован метод теории функций комплексного пере-

менного в предположении, что поглощение в замедлителе отсутствует. Чтобы исправить погрешность диффузионного приближения вблизи поверхности блока, можно ввести скачок на поверхности блока, соответствующий недиффузионной поправке во внешнем блок-эффекте [3, 4].

Решение, полученное в работе [8], запишем следующим образом:

$$N(x, y) = A [N_{\text{макс}} - \psi(x, y)], \quad (4)$$

где A — нормировочная постоянная. Для квадратной решетки

$$N_{\text{макс}} = (1 - \varepsilon) \left(\frac{1}{\mu} - \ln 2 \sqrt{\pi \varepsilon} + \frac{1}{2} \varepsilon + \frac{\pi}{6} + 2e^{-2\pi} \right) + \frac{\pi}{12} + 0,082900 + e^{-2\pi}. \quad (5)$$

Величина $\frac{1}{\mu}$ характеризует сток нейтронов и равна

$$\frac{1}{\mu} = \frac{2l_{\text{г}} QRl_{\text{аУ}}}{3Q^2} + \frac{\delta}{2}, \quad (6)$$

где δ определяется формулой (3).

Функция $\psi(x, y)$ в (4) определяется равенством

$$\psi(x, y) = -\operatorname{Re} \ln \theta_1(e^{-\pi}, z) + \frac{\pi y^2}{a^2} + 0,082900, \quad (7)$$

где $z = \frac{x}{a} + i \frac{y}{a}$; Re — реальная часть функции. Для направлений, указанных на рис. 2, функция $\psi(x, y)$ записывается следующим образом:

кривая 1

$$\psi(x, 0) = -\ln \theta_1 \left(e^{-\pi}, \frac{x}{a} \right) + 0,082900;$$

кривая 2

$$\psi \left(\frac{a}{2}, y \right) = -\ln \theta_4 \left(e^{-\pi}, \frac{y}{a} \right) + 0,082900;$$

кривая 3

$$\psi(r) = -\ln \left[\theta_1 \left(e^{-\pi}, \frac{r}{a\sqrt{2}} \right) \theta_3 \left(e^{-\pi}, \frac{r}{a\sqrt{2}} \right) \right] - 0,180770,$$

где $\theta_1, \theta_3, \theta_4$ — эта-функции.

Скачок плотности на поверхности блока можно выразить через величины μ и δ :

$$\Delta N_0 = -\mu \frac{\delta}{2}. \quad (8)$$

Для случая, отмеченного в табл. 1 звездочкой, получены следующие значения:

$$(AN_{\text{макс}})_{\text{экс}} = (AN_{\text{макс}})_{\text{расч}} = 1,779;$$

$$A_{\text{расч}} = 1,132;$$

$$N_{0\text{экс}} = 1; N_{0\text{расч}} = 1,066 \text{ (по (4))};$$

$$\Delta N_0 = -0,064;$$

$$N_{0\text{расч}} + \Delta N_0 = 1,002.$$

Как видно из рис. 2, расчетная кривая находится в хорошем согласии с экспериментальным ходом плотности.

Из изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Для рассмотренных типов решеток внешний блок-эффект, определенный экспериментально, находится в хорошем согласии с расчетным [3, 4, 8].
2. Имеется заметный внешний блок-эффект для надтепловых нейтронов.

Поступила в Редакцию 9/IV 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Алиханов и др. «Атомная энергия», 1, № 1, 5 (1956).
2. Ю. Г. Абов, В. Ф. Белкин, П. А. Кручицкий. «Атомная энергия», 12, вып. 2, 156 (1962).
3. А. Д. Галагин. Сб. «Нейтронная физика». М., Госатомиздат, 1961, стр. 125.
4. A. Amoyal, P. Venoist, J. Nogowitz. J. Nucl. Energy, 6, 79 (1957). Русский перевод см. в сб.: «Некоторые вопросы ядерной энергетики». М., Изд-во иностр. лит., 1959, стр. 237.
5. А. Д. Галагин. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М., Атомиздат, 1959.
6. В. Ф. Белкин и др. Тр. Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). Докл. советских ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 199.
7. C. MсКау. AECL-1250, NEI-143, Chalk River, Ontario (1961).
8. B. du Bois. Rapport CEA No. 740, Saclay (1957).