

волн в металлах // Прикл. механика. - 1968. - № 2. - С. 89 - 92.

9. Трофимов А.И. Ультразвуковой метод снятия остаточных напряжений в процессе сварки. - М.: Энергоатомиздат, 2008 – 224с.

#### Расчет возраста нейтронов деления до индиевого резонанса в натрии методом групп

Кабанова М.А., Кузьмин А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Приводятся результаты определения возраста замедляющихся нейтронов в натрии методом групп. Сравнение результатов расчета возраста нейтронов деления при замедлении до энергии индиевого резонанса показало хорошую сходимость с данными ФЭИ.

Определение возраста нейтронов является важной задачей физического расчёта ядерного реактора [1,2]. Точность аналитического нахождения этой миграционной характеристики в первую очередь зависит от корректного представления ядерно-физических констант. В отечественной технической литературе наиболее известные справочники [3,4] отражают данные полученные соответственно до 1962 и до 1977 годов и отличаются полнотой и точностью по наиболее важным элементам. В работе [5] на примере расчета возраста в графите показано преимущество 28-групповой системы констант [4], которая более детально учитывает зависимость от энергии среднего косинуса угла рассеяния и среднелогарифмического декремента.

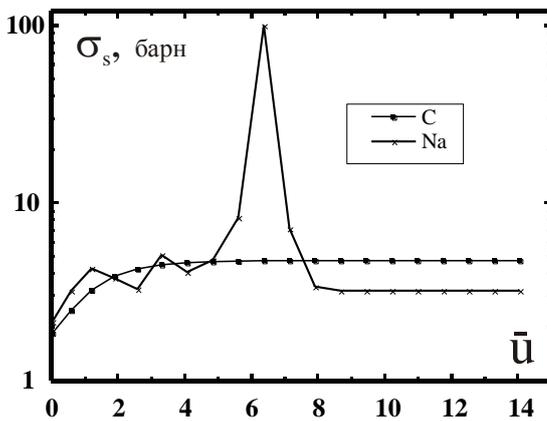


Рис. 1. Микроскопические сечения рассеяния натрия и углерода в зависимости от среднего значения логарифма потерь в группах

Особенностью графита, самого первого замедлителя ядерных реакторов, является отсутствие резонансов на всем участке замедления от 2 МэВ до индиевого резонанса с  $E=1,46$  эВ. Целью настоящей работы поставлено определение возраста методом групп в среде Na, имеющего единственный ярко выраженный резонанс (рис. 1).

Основные энергетические характеристики 28-групповой системы констант представлены в табл.1, где  $E_n$  — показывает энергетический диапазон группы, а  $\bar{u}$  — означает среднее значение логарифма потерь.

Таблица 1. Разбиение энергии нейтронов на группы

Группа	$E_n$	$\bar{u}$	Группа	$E_n$	$\bar{u}$
-1	14,5–14,0·МэВ	-1,96361	<b>13</b>	<b>4,65–2,15·кэВ</b>	<b>6,37713</b>
0	14,0–10,5·МэВ	-1,81238	14	2,15–1,0·кэВ	7,14665
1	10,5–6,5·МэВ	-1,44692	15	1,0–0,465·кэВ	7,91219
2	6,5–4,0·МэВ	-0,96508	16	465–215·эВ	8,67971
3	4,0–2,5·МэВ	-0,48551	17	215–100·эВ	9,44923
4	2,5–1,4·МэВ	0,02532	18	100–46,5·эВ	10,21478
5	1,4–0,8·МэВ	0,59784	19	46,5–21,5·эВ	10,98230
6	0,8–0,4·МэВ	1,20397	20	21,5–10,0·эВ	11,75182
7	0,4–0,2·МэВ	1,89712	21	10,0–4,65·эВ	12,51736
8	0,2–0,1·МэВ	2,59027	22	4,65–2,15·эВ	13,28488
9	100,0–46,5·кэВ	3,30702	23	2,15–1,0·эВ	14,05440
10	46,5–21,5·кэВ	4,07454	24	1,0–0,465·эВ	14,81995
11	21,5–10,0·кэВ	4,84406	25	0,465–0,215·эВ	15,58747
12	10,0–4,65·кэВ	5,60961	T	0,0253 эВ	18,18561

Здесь и в последующих таблицах выделена энергетическая группа с резонансным рассеянием.

В табл. 2 представлена часть среднегрупповых сечений из работы [4], необходимых для проведения расчета возраста нейтронов до любого детектируемого значения.

Таблица 2. Основные групповые константы натрия

$\bar{u}$	$\sigma_c$ , барн	$\sigma_{in}$ , барн	$\sigma_s$ , барн	$\mu$	$\zeta$	$\Delta u$	$\sigma_{tr}$ , барн	$\sigma_R$ , барн
0,02532	2E-4	0,68	2,1378	0,3048	0,0633	0,57982	2,1664	0,23339
0,59784	2,1E-4	0,57	3,19079	0,286	0,0784	0,55962	2,84843	0,44701
1,20397	3E-4	0,207	4,2787	0,1075	0,0733	0,69315	4,02604	0,45247
1,89712	6,2E-4	0	3,77538	0,0487	0,0972	0,69315	3,59214	0,52942
2,59027	0,00106	0	3,26894	0,314	0,0809	0,69315	2,24355	0,38153
3,30702	0,00197	0	5,099403	0,03	0,0847	0,76572	4,94839	0,56407
4,07454	0,00137	0	4,06563	0,0333	0,085	0,7714	3,93161	0,44799
4,84406	7E-5	0	4,77093	0,0317	0,0845	0,76546	4,61976	0,52667
5,60961	0,00143	0	8,24157	0,0292	0,0852	0,76572	8,00235	0,91702
<b>6,37713</b>	<b>0,088</b>	<b>0</b>	<b>99,652</b>	<b>0,0292</b>	<b>0,0852</b>	<b>0,7714</b>	<b>96,83016</b>	<b>11,00642</b>
7,14665	0,0129	0	7,1481	0,0292	0,0852	0,76546	6,95228	0,79562
7,91219	0,0065	0	3,3675	0,0292	0,0852	0,76572	3,27567	0,37469
8,67971	0,0069	0	3,1911	0,0292	0,0852	0,7714	3,10482	0,35245
9,44923	0,0084	0	3,2	0,0292	0,0852	0,76546	3,11496	0,35618
10,21478	0,0108	0	3,2	0,0292	0,0852	0,76572	3,11736	0,35606
10,98230	0,0151	0	3,2	0,0292	0,0852	0,7714	3,12166	0,35344
11,75182	0,0221	0	3,2	0,0292	0,0852	0,76546	3,12866	0,35618
12,51736	0,0325	0	3,2	0,0292	0,0852	0,76572	3,13906	0,35606
13,28488	0,0477	0	3,2	0,0292	0,0852	0,7714	3,15426	0,35344
14,05440	0,07	0	3,2	0,0292	0,0852	0,76546	3,17656	0,35618

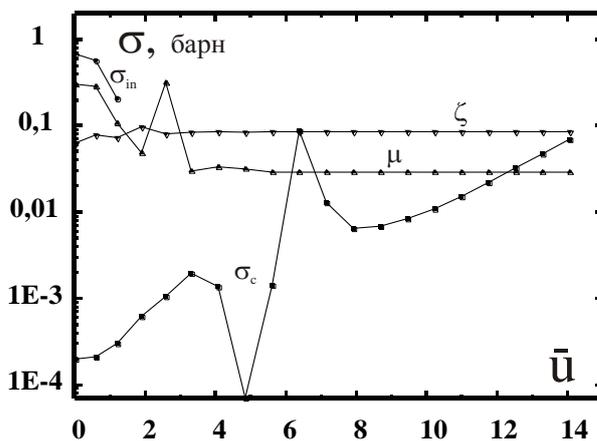


Рис. 2. Характеристики натрия в интервале 4 и 23 групп 28-групповой системы констант

рассчетом эффективного микроскопического транспортного сечения, которое определялось по формуле:

$$\sigma_{tr}(u) = \sigma_c(u) + \sigma_{in}(u) + \sigma_s(u) \cdot (1 - \mu(u))$$

и сечением увода нейтронов из группы за счет упругого рассеяния нейтрона с ядром натрия [6]

$$\sigma_R^{(i)} = (\zeta \sigma_s)^{(i)} / \Delta u,$$

В таблице представлены следующие групповые константы:  $\sigma_c$  – микроскопическое эффективное сечение радиационного захвата;  $\sigma_{in}$  – сечение неупругого рассеяния с учетом сечений реакций  $(n, 2n)$  и  $(n, 3n)$ ;  $\sigma_s \equiv \sigma_e$  – сечение упругого рассеяния;  $\mu$  – средний косинус угла рассеяния, вычисленный без учета того в какую группу попадет нейтрон после рассеяния;  $\zeta$  – среднее приращение летаргии при упругом рассеянии (среднегарифмический декремент). Общий характер зависимости некоторых из этих характеристик представлен на рис.2.

Кроме этого табл. 2 дополнена

где  $\Delta u$  – ширина группы в единицах летаргии.

Согласно теории метода групп [4,6] возраст нейтронов в  $i$ -ой группе определяется из следующей формулы

$$\tau_i = \frac{D^{(i)}}{N \cdot (\sigma_a^{(i)} + \sigma_R^{(i)})}, \quad (1)$$

где  $N=0,0254 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$  – ядерная концентрация натрия плотностью  $0,971 \text{ г/см}^3$ , а сечение поглощения определяется выражением

$$\sigma_a^{(i)} = \sigma_c^{(i)} + \sigma_{in}^{(i)}. \quad (2)$$

Сумму сечений в (1)  $\sigma_a^{(i)} + \sigma_R^{(i)}$  обычно называют действующим сечением или сечением увода.

Коэффициент диффузии нейтронов в группе определяется выражением:

$$D^{(i)} = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{(i)}} = \frac{1}{3 \cdot N \sigma_{tr}^{(i)}}. \quad (3)$$

Таким образом, формулы (1)-(3) позволяют провести расчет возраста в каждой энергетической группе. Поскольку нас интересует область замедления, которая моделировалась в экспериментах по определению возраста [1], а именно диапазон летаргий  $u=0 \dots 14,125$ , соответствующий пути замедления от  $E_0 = 2 \text{ ́А}$  до энергии индиевого резонанса  $E_m = 1,46 \text{ ́А}$ , то результаты расчета возраста в группах, представленные в табл. 3, охватывают только этот диапазон энергий.

Таблица 3. Результаты расчета возраста в группах

Группа	$E_n$	$D^{(i)}$ , барн <sup>-1</sup>	$\sigma_a^{(i)} + \sigma_R^{(i)}$ , барн	$\tau_i$ , см <sup>2</sup>
4	2,5–1,4·МэВ	6,05768	0,23359	1020,99
5	1,4–0,8·МэВ	4,60722	0,44722	405,58
6	0,8–0,4·МэВ	3,25962	0,45277	283,44
7	0,4–0,2·МэВ	3,65336	0,53004	271,36
8	0,2–0,1 МэВ	5,84937	0,38259	601,92
9	100,0–46,5·кэВ	2,65205	0,56604	184,46
10	46,5–21,5·кэВ	3,33791	0,44936	292,45
11	46,5–21,5·кэВ	2,8407	0,52674	212,32
12	10,0–4,65·кэВ	1,63994	0,91845	70,30
<b>13</b>	<b>4,65–2,15·кэВ</b>	<b>0,13553</b>	<b>11,09442</b>	<b>0,48</b>
14	2,15–1,0·кэВ	1,88764	0,80852	91,92
15	1,0–0,465·кэВ	4,00631	0,38119	413,77
16	465–215·эВ	4,22677	0,35935	463,08
17	215–100·эВ	4,21301	0,36458	454,95
18	100–46,5·эВ	4,20977	0,36686	451,78
19	46,5–21,5·эВ	4,20397	0,36854	449,10
20	21,5–10,0·эВ	4,19456	0,37828	436,56
21	10,0–4,65·эВ	4,18067	0,38856	423,60
22	4,65–2,15·эВ	4,16052	0,40114	408,34
23	2,15–1,0·эВ	4,13131	0,42618	381,65

Поскольку обычно используемые в экспериментах границы замедления моделируются от средней энергии спектра нейтронов деления равного 2 МэВ до индиевого резонанса  $E=1,46 \text{ ́В}$ , то есть являются только частью 4 и 23 групп, то необходимо сделать правку значений возраста в них, используя простую интерполяцию. Так в диапазоне 4 группы с энергией 2,5...1,4 МэВ возраст нейтронов при замедлении в этом интервале энергий в результате расчета равен  $\tau_4 = 1022,99 \text{ ́}^2$ , то, очевидно, что в интервале 2,0...1,4 МэВ возраст будет иметь значение равное  $556,9 \text{ см}^2$ , а в последней 24 группе –  $229,3 \text{ см}^2$ .

После сложения всех составляющих в группах с учетом правки в 4 и в 23 группах получим следующее значение возраста

$$\sum \tau_i^{2 \text{ МэВ} \dots 1,46 \text{ эВ}} = 6702,6 \text{ см}^2.$$

Прямых экспериментов по определению возраста в натрии нам не известно и поэтому для сравнения были привлечены результаты численного эксперимента работы ФЭИ [7], в которой для того же диапазона замедления значение возраста оказалось равным  $6616,6 \text{ см}^2$ . Таким образом, относительная погрешность нашего результата составляет 1,3%.

Анализ работы позволяет сделать следующие выводы:

- Метод групп наиболее детально и наглядно учитывает характер изменения микроскопических эффективных сечений радиационного захвата  $\sigma_c$ , неупругого рассеяния  $\sigma_{in}$ , среднего косинуса угла рассеяния  $\mu$  и среднего приращения летаргии при упругом рассеянии  $\zeta$  (см. рис.2).
- Наличие резонансного сечения (в нашем случае упругого рассеяния) увеличивает вероятность увода замедляющегося нейтрона из группы за счет резонансной самоэкранировки (см. выделенную часть табл 3).
- Полученная высокая сходимостью результатов расчета возраста по данным работ [7] и [4] показывает уже достаточно точное определение групповых констант для натрия было определено к 1969 году.

#### Список литературы:

1. Кузьмин А.В. Экспериментальное и расчетное определение возраста нейтронов деления в различных средах: учеб. пособие для вузов. 1-изд. – Томск: Изд-во ТПУ. 2011. – 232 с.
2. Кузьмин А.В. Основы теории переноса нейтронов (лабораторный практикум): учеб. пособие для вузов. 2-е изд. – Томск: Изд-во ТПУ. 2010. – 192 с.
3. Гордеев И.В., Кардашев Д.А., Малышев А.В. Ядерно-физические константы: Справочник. – М.: Госатомиздат, 1963. – 507 с.
4. Групповые константы для расчета реакторов и защиты: Справочник / Л.П. Абагян, Н.О. Базаянц, М.Н. Николаев, А.М. Цибуля: Под ред. М.Н. Николаева. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 232 с.
5. Кузьмин А.В. К расчёту возраста нейтронов в графите. Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т.323. – №2. – С.135-139.
6. Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов: Учеб. пособие для вузов / Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алхутов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с., ил.
7. Марченко Л.В., Сергеев Ю.А. Расчет квадрата длины замедления для различных сред в 18- и 26-групповых приближениях и их сравнение с экспериментальными данными // Бюллетень центра по ядерным данным. – М.: Атомиздат, 1969. – Вып. 6. С.319–390.

#### Диффузия $C^{14}$ из графитовой кладки выводимого из эксплуатации ПУГР АД

*Чубреев Д.О.*

*ФГУП «Горно-химический комбинат», г. Железногорск, Россия*

Промышленный уран графитовый реактор (ПУГР) АД, размещенный на территории ФГУП «Горно-химический комбинат» после останова и приведения его в ядерно-безопасное состояние подлежит выводу из эксплуатации. Реактор выводится из эксплуатации по варианту радиационно-безопасного захоронения на месте. Данная концепция предусматривает захоронение реактора на месте размещения с созданием необходимых дополнительных защитных барьеров, обеспечивающих выполнение требований радиационной безопасности.

Такой принцип защиты предусматривает сочетание существующих барьеров безопасности и вновь создаваемых. Создание системы дополнительных защитных барьеров предполагает заполнение пустот реакторного пространства и вне реакторных помещений сухими и влажными смесями, изготовленных на основе глинистых пород, а также заделку бетонными смесями проемов бетонной шахты реактора, подкрепления опорных металлоконструкций и заполнения объемов под реакторного пространства.

Для долговременной оценки безопасности выводимого из эксплуатации реактора предлагается математическая модель диффузии радионуклидов на примере  $C^{14}$  через инженерные барьеры. Конечный результат долгосрочного прогноза – активность радионуклидов на выходе из инженерных барьеров.