

Список литературы:

1. Кан А.Ю., Кузьмин А.В. Определение эффективной температуры топлива реактора на тепловых нейтронах. Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции /Томский политехнический университет, 4-6 декабря 2013 – Томск: Изд-во ООО «Скан», 2013. Т. II. – 434 с (с.146-148).
2. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам: (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). Под общ. ред. П.Л. Кириллова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 296с.
3. Афров А.М. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность. - М.:Логос, 2006. 488с.
4. Синяткин Е.Ю. Выпускная квалификационная работа «Определение характеристик топливной загрузки ВВЭР-1000 на текущую микрокампанию различными методами». г. Томск, 2014. 127с.
5. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Учебное справочное пособие для студентов специальностей: 14.03.05 – Ядерные реакторы и энергетические установки, 14.04.04 – Атомные электрические станции и установки / Под общ. ред. проф. П.Л. Кириллова; 2-е изд. перераб. и доп. – М.: ИздАт, 2007. – 200 с.

Корректировка групповых ядерно-физических констант ^{238}U по возрасту нейтронов деления до индиевого резонанса

Кузьмин А.В., Южаков А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Приводится алгоритм расчета возраста замедляющихся нейтронов в среде ^{238}U , имеющего наибольшее поглощение в резонансной области при замедлении нейтронов деления до энергии индиевого резонанса. Расчёт проводился без учёта деления ^{238}U и сравнивался с имеющимися оценками.

Возраст связан с миграцией быстрых нейтронов в процессе замедления. Эта характеристика важна при расчете размеров активной зоны ядерного реактора, так как она определяет утечку замедляющихся нейтронов. По согласованию теоретического и экспериментального определения возраста можно судить о правильности выбора ядерно-физических констант. Ядерно-физические константы в основном предназначены для инженеров-физиков при проектировании и эксплуатации ядерных реакторов и нейтронной защиты. Эти характеристики постоянно обновляются с получением новых экспериментальных и теоретических результатов и обобщаются в соответствующих справочниках и библиотеках баз данных.

В работах по расчету возраста в графите [1] и в натрии [2] использовались групповые константы [3], позволившие получить результаты, хорошо согласующие либо с прямыми измерениями, либо с расчетами по ранее установленным групповым константам [4]. Особенностью замедления нейтронов в среде натрия явилось резонансное упругое рассеяние, представленное в 28-групповой системе констант единственным резонансом. Особенностью замедления нейтронов в среде ^{238}U является резонансное поглощение (рис. 1). Целью настоящей работы является оценка различных версий многогруппового описания замедления нейтронов в среде ^{238}U – наиболее сильного резонансного поглотителя активной зоны ядерного реактора на тепловых нейтронах.

Область определения возраста принята от средней энергии спектра нейтронов деления ^{235}U равного $E_0 = 2 \text{ МэВ}$ до энергии индиевого резонанса $E_{\text{ин}} = 1,46 \text{ эВ}$, то есть в диапазоне замедления нейтронов в тепловом реакторе.

Основные энергетические характеристики групп [3] представлены в табл.1, где \bar{i} – означает среднее значение летаргии в группе.

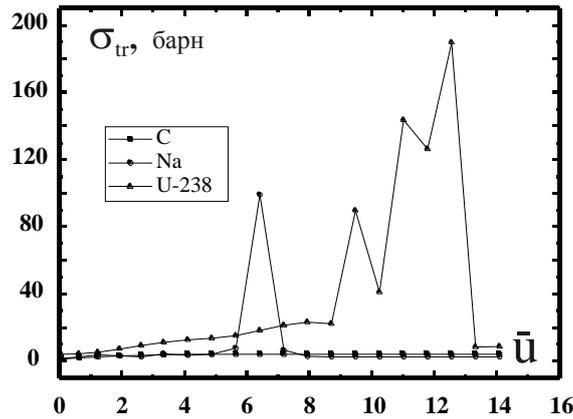


Рис. 1. Микроскопические транспортные сечения углерода, натрия и урана ^{238}U в зависимости от среднего значения лётаргии в группах

Таблица 1. Разбиение энергии нейтронов в 28 групповой системе констант

Группа	E_n	\bar{u}	Группа	E_n	\bar{u}
-1	14,5–14,0·МэВ	-1,96361	13	4,65–2,15·кэВ	6,37713
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

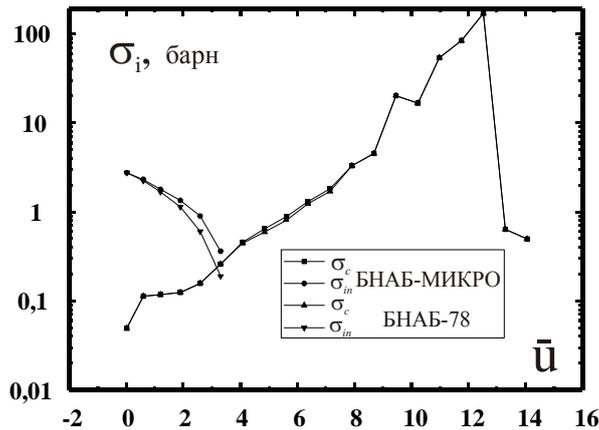


Рис. 2. Корректировка сечений радиационного захвата и неупругого рассеяния ^{238}U в БНАБ-78

Для ^{238}U приведены две библиотеки констант: БНАБ-МИКРО и БНАБ-78, являющиеся результатом обработки нейтронных данных, полученных до 1977 года в существующих ядерных центрах. Основные расхождения в расчетно-экспериментальных данных касались групповых

сечений реакций $(n, 2n)$, $(n, 3n)$, (n, α) , (n, p) , которые включались в сечения неупругого рассеяния σ_{in} и соответственно в сечение радиационного захвата σ_c (рис.2).

Другие групповые константы в обеих библиотеках оставались равными и имели следующий качественный характер (рис.3). Средний косинус угла рассеяния μ в области малых энергий постоянен и $\mu \approx 2/3A$, а в области больших энергий заметно возрастает. Зависимость средней логарифмической потери энергии нейтрона за одно соударение (среднелогарифмический декремент) ζ от энергии примерно до летаргии $u \approx 2,5$ остаётся постоянной, а затем снижается. Сечение увода нейтрона из группы $\sigma_R^{(i)}$ определяется сечением упругого замедления $\sigma_3^{(i)}$, т.е. принимается $\sigma_R^{(i)} \equiv \sigma_3^{(i)}$.

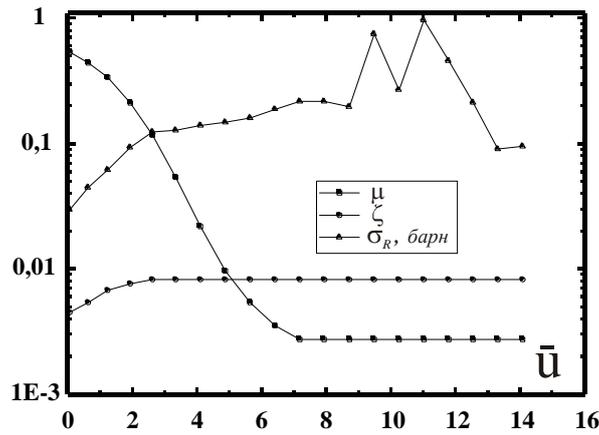


Рис. 3. Зависимость среднего косинуса угла рассеяния, средней логарифмической потери энергии и сечения увода из группы для ^{238}U

Согласно теории метода групп [5] 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 $N=0,0473 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$ – ядерная концентрация ^{238}U плотностью $18,7 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$; $\sigma_a^{(i)} = \sigma_c^{(i)} + \sigma_{in}^{(i)}$ – сечение поглощения; $\sigma_a^{(i)} + \sigma_R^{(i)}$ – действующее сечение замедления [3].

Коэффициент диффузии нейтронов в группе определяется выражением:

$$D^{(i)} = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{(i)}} = \frac{1}{3 \cdot N \sigma_{tr}^{(i)}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{tr}(u) = \sigma_c(u) + \sigma_{in}(u) + \sigma_s(u) \cdot (1 - \mu(u))$ – транспортное сечение ^{238}U .

Необходимые для расчета возраста групповые константы [3] представлены в табл. 2-3.

Таким образом, формулы (1), (2) позволяют провести расчет возраста в каждой энергетической группе. Поскольку нас интересует область замедления, которая моделировалась в экспериментах по определению возраста в графите [1]: диапазон летаргий $u = 0 \dots 14,125$, соответствующий пути замедления от $E_0 = 2 \text{ МэВ}$ до энергии индиевого резонанса $E_{in} = 1,46 \text{ эВ}$, то результаты расчета возраста нейтронов в ^{238}U по группам, представленные в табл. 4, охватывают только этот диапазон энергий.

Поскольку требуемые границы являются только частью 4 и 23 групп, то необходимо сделать правку значений возраста, используя простую интерполяцию. Так как в диапазоне 4 группы с энергией $2,5 \dots 1,4 \text{ МэВ}$ возраст нейтронов при замедлении в этом интервале энергий равен $\tau_1 = 11,496 \text{ см}^2$, то, очевидно, что в интервале $2,0 \dots 1,4 \text{ МэВ}$ возраст будет иметь значение

равное 6,271 см², а в последней группе 16,59 см².

Таблица 2. Основные групповые константы ²³⁸U по данным БНАБ-МИКРО

Группа \bar{u}	σ_c , барн	σ_{in} , барн	σ_s , барн	μ	ζ	σ_R , барн	σ_{tr} барн
0,02532	0,0491	2,7657	3,8481	0,5478	0,0046	0,0304	4,55491
0,59784	0,1125	2,3218	4,6521	0,448	0,0055	0,0456	5,00226
1,20397	0,1177	1,7891	6,3201	0,3431	0,0069	0,0632	6,05847
1,89712	0,1253	1,3527	8,4249	0,2161	0,0078	0,0952	8,08228
2,59027	0,1585	0,9046	10,4679	0,1187	0,0084	0,1267	10,28846
3,30702	0,2616	0,3637	11,9457	0,0548	0,0084	0,1302	11,91638
4,07454	0,459	0	13,005	0,0222	0,0084	0,1418	13,17529
4,84406	0,65	0	13,83	0,0098	0,0084	0,1507	14,34447
5,60961	0,89	0	14,99	0,0055	0,0084	0,1634	15,79756
6,37713	1,31	0	17,64	0,0036	0,0084	0,1923	18,8865
7,14665	1,83	0	20,36	0,0028	0,0084	0,2219	22,13299
7,91219	3,32	0	20,4	0,0028	0,0084	0,2224	23,66288
8,67971	4,55	0	18,48	0,0028	0,0084	0,2014	22,97826
9,44923	20,3	0	70,2	0,0028	0,0084	0,7652	90,30344
10,21478	16,6	0	25,1	0,0028	0,0084	0,2736	41,62972
10,9823	54,2	0	90,3	0,0028	0,0084	0,9843	144,24716
11,75182	84,1	0	43	0,0028	0,0084	0,4687	126,9796
12,51736	170,5	0	19,9	0,0028	0,0084	0,2169	190,34428
13,28488	0,641	0	8,455	0,0028	0,0084	0,0922	9,07233
14,0544	0,496	0	8,882	0,0028	0,0084	0,0968	9,35313

В этой и в последующей таблице выделены значения групповых констант микроскопических эффективных сечений радиационного захвата σ_c и неупругого рассеяния σ_{in} , отличающиеся в разных библиотеках.

Таблица 3. Основные групповые константы ²³⁸U по данным БНАБ-78

Группа \bar{u}	σ_c , барн	σ_{in} , барн	σ_s , барн	μ	ζ	σ_R , барн	σ_{tr} барн
0,02532	0,0491	2,7657	3,8481	0,5478	0,0046	0,0304	4,55491
0,59784	0,1125	2,248	4,6521	0,448	0,0055	0,0456	5,00226
1,20397	0,1177	1,689	6,3201	0,3431	0,0069	0,0632	6,05847
1,89712	0,1253	1,14	8,4249	0,2161	0,0078	0,0952	8,08228
2,59027	0,1585	0,607	10,4679	0,1187	0,0084	0,1267	10,28846
3,30702	0,2616	0,191	11,9457	0,0548	0,0084	0,1302	11,91638
4,07454	0,445	0	13,005	0,0222	0,0084	0,1418	13,17529
4,84406	0,597	0	13,83	0,0098	0,0084	0,1507	14,34447
5,60961	0,814	0	14,99	0,0055	0,0084	0,1634	15,79756
6,37713	1,24	0	17,64	0,0036	0,0084	0,1923	18,8865
7,14665	1,7	0	20,36	0,0028	0,0084	0,2219	22,13299
7,91219	3,32	0	20,4	0,0028	0,0084	0,2224	23,66288
8,67971	4,55	0	18,48	0,0028	0,0084	0,2014	22,97826
9,44923	20,3	0	70,2	0,0028	0,0084	0,7652	90,30344
10,21478	16,6	0	25,1	0,0028	0,0084	0,2736	41,62972
10,9823	54,2	0	90,3	0,0028	0,0084	0,9843	144,24716
11,75182	84,1	0	43	0,0028	0,0084	0,4687	126,9796
12,51736	170,5	0	19,9	0,0028	0,0084	0,2169	190,34428
13,28488	0,641	0	8,455	0,0028	0,0084	0,0922	9,07233
14,0544	0,496	0	8,882	0,0028	0,0084	0,0968	9,35313

Таблица 4. Результаты расчетов возраста в группах по разным библиотекам констант

Группа	E_n	БНАБ-МИКРО		БНАБ-78	
		D_i , см	τ_i , см ²	D_i , см	τ_i , см ²
4	2,5–1,4·МэВ	1,54717	11,49645	1,54717	11,49645
5	1,4–0,8·МэВ	1,40881	12,01036	1,4299	12,56411
6	0,8–0,4·МэВ	1,1632	12,48323	1,18274	13,37243
7	0,4–0,2·МэВ	0,87193	11,7176	0,8955	13,91574
8	0,2–0,1 МэВ	0,68496	12,17116	0,70537	16,71442
9	100,0–46,5·кэВ	0,59139	16,54923	0,60009	21,76872
10	46,5–21,5·кэВ	0,53488	18,82203	0,53545	19,29159
11	46,5–21,5·кэВ	0,49128	12,97186	0,49311	13,94287
12	10,0–4,65·кэВ	0,4461	8,9531	0,44825	9,69591
13	4,65–2,15·кэВ	0,37314	5,25108	0,37452	5,5282
14	2,15–1,0·кэВ	0,3184	3,28065	0,32028	3,52325
15	1,0–0,465·кэВ	0,29782	1,77742	0,29782	1,77742
16	465–215·эВ	0,30669	1,36464	0,30669	1,36464
17	215–100·эВ	0,07804	0,07832	0,07804	0,07832
18	100–46,5·эВ	0,16928	0,2121	0,16928	0,2121
19	46,5–21,5·эВ	0,04886	0,01872	0,04886	0,01872
20	21,5–10,0·эВ	0,0555	0,01387	0,0555	0,01387
21	10,0–4,65·эВ	0,03702	0,00459	0,03702	0,00459
22	4,65–2,15·эВ	0,77678	22,39832	0,77678	22,39832
23	2,15–1,0·эВ	0,75346	26,87146	0,75346	26,87146

В результате расчетов возраста по данным библиотекам видны расхождения с 5 по 14 группы.

Сложение всех составляющих τ_i с учетом правки в 4 и в 23 группах даёт следующее значение возраста по рекомендуемой библиотеке групповых констант БНАБ-78:

$$\sum \tau_i^{2 \text{ МэВ} \dots 1,46 \text{ эВ}} = 177,53 \text{ см}^2. \text{ Значение возраста по данным БНАБ-МИКРО получилось равным}$$

$$\sum \tau_i^{2 \text{ МэВ} \dots 1,46 \text{ эВ}} = 161,43 \text{ см}^2 \text{ и отличается от значения возраста по данным БНАБ-78 на } -9\%.$$

В [4,6] приводится оценка по возрасту в ^{238}U , которая была получена ФЭИ ещё до 1969 года. Согласно результатам ФЭИ возраст нейтронов в ^{238}U при замедлении в принятом интервале энергий получился равным $288,6 \text{ см}^2$, то есть с заметным превышением на 38,5%.

Заключение

В работе проведен расчет возраста нейтронов в ^{238}U без учета деления в диапазоне летаргий $u = 0 \dots 14,125$, который соответствует пути замедления от средней энергии спектра нейтронов деления ^{235}U равного $E_0 = 2 \text{ МэВ}$ до энергии индиевого резонанса $E_{\text{in}} = 1,46 \text{ эВ}$.

Расчет возраста проводился многогрупповым методом с применением библиотек БНАБ-МИКРО и БНАБ-78 [3]. Кроме того были использованы результаты расчетов ФЭИ [4]. Таким образом, проведен сравнительный анализ трёх систем констант, по которым найденные значения возраста нейтронов в ^{238}U сильно расходятся.

Библиотека БНАБ-78 на данный момент считается наиболее достоверной системой констант, рекомендуемой к практике расчетов ядерных реакторов и нейтронной защиты. Однако заметное отличие в результатах проведенного расчета и отсутствие прямых экспериментальных данных по возрасту нейтронов в ^{238}U говорят о всё ещё недостаточной точности ядерно-физических констант библиотеки БНАБ-78 и необходимости дальнейших уточнений.

Список литературы:

1. Кузьмин А.В. К расчёту возраста нейтронов в графите. Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т.323. – №2. – С.135-139.
2. Кабанова М.А., Кузьмин А.В. Расчет возраста нейтронов деления до индиевого резонанса в натрии методом групп. В настоящем сборнике.

3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

УДК 629.78.064:621.039.5

Контейнер для безопасной транспортировки ядерной установки летательного аппарата*Крушенко Г.Г., Голованова В.В.***Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Россия**Сибирский государственный аэрокосмический университет, г. Красноярск, Россия*** ФГУП «Конструкторское бюро «Арсенал», г. Санкт-Петербург, Россия*

Основным источником энергоснабжения искусственных спутников Земли и космических аппаратов (КА) в настоящее время являются солнечные батареи (СБ). Однако по своей физической природе СБ являются источниками тока с нелинейным и нестационарным внутренним сопротивлением. Кроме того, их характеристики в значительной степени изменяются в процессе эксплуатации: при выходе из тени Земли охлажденные СБ генерируют максимальную энергию, которая с прогревом батареи уменьшается. Причем, со временем СБ деградируют от воздействия ионизирующего излучения космического пространства. При этом также существуют сложности раскрытия и обеспечения требуемой ориентации СБ по отношению к Солнцу, что, например убедительно показано в патенте РФ № 2509694 [1], текст которого представлен на 14-ти страницах, включая 3-х рисунков и математических выражений, а формула изобретения изложена на 55 строчках.

Из приведенного выше следует, что в настоящее время существуют проблемы применения СБ в КА, не только, исходя из их «физической» и «механической» специфики, но и при том, что одной из основных тенденций развития ракетно-космической техники является необходимость роста энергетического обеспечения КА.

Анализ альтернативных источников энергии показал, что наиболее высокоэффективным и стабильным источником энергии могут служить ядерные энергетические установки (ЯЭУ) [2]. Первой в мировой практике экспериментальной ЯЭУ стала разработанная по программе Systems for Nuclear Auxiliary Power [3] американская установка SNAP-10A, размещенная на космическом аппарате Snapshot, который был выведен на орбиту 3 апреля 1965 года. Электрическая мощность, обеспечиваемая термоэлектрическим преобразователем, составляла от 500 до 650 Вт. Реактор успешно проработал 43 дня.

Первый советский спутник типа «УС-А» с ЯЭУ был запущен 3 октября 1970 г. [4]. В качестве энергетической установки КА была использована ЯЭУ БЭС-5 мощностью 3 кВт с термоэлектрическим преобразованием тепловой энергии. За время серийного производства спутников типа «УС-А» удалось увеличить срок активного существования изделий с 45 до 120 суток, а в дальнейшем – до 300 суток. При этом были решены задачи по защите бортовой аппаратуры КА от радиационного воздействия ЯЭУ.

В настоящее время по сообщению директора, генерального конструктора НИКИЭТ (ОАО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалы») Ю.Г. Драгунова на состоявшейся в Обнинске с 25 по 27 июня 2014 года конференции, работы в этом направлении ведутся весьма успешно – к настоящему времени в НИКИЭТ в рамках проекта «Создание транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса» [5] завершены испытания системы управления реактором ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса для космического использования.

Однако при этом важнейшим условием применения КА с ЯЭУ является обеспечение радиационной безопасности, и, в частности, этой проблеме уделена целая глава в