

13. АЛЮМИНИЙ

Природный алюминий содержит один изотоп – ^{27}Al . Существует также долгоживущий изотоп ^{26}Al , данные для которого также должны быть представлены в библиотеке РОСФОНД.

13.1. Алюминий-26

Радиоактивен. $T_{1/2}=7.16 \cdot 10^5$ лет. Испытывает позитронный распад в стабильный магний-26. В РОСФОНД приняты нейтронные данные из JEFF=3.1 (Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 г.) со следующими изменениями:

1. материалу присвоен номер МАТ=1326;
2. удален файл MF=8;
3. удалены реакции образования короткоживущего изомера $^{24}\text{Na}^m$.

13.2. Алюминий-27

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 13$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 27$ (атомный вес);
- 1.3. $AWR = 26.74975$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Стабилен, 100% моноизотоп;
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}, \text{МэВ}$	Ядро-продукт
4	n, n'	-.84375	.87529	Al-27
16	$n, 2n$	-13.0582	13.5463	Al-26, Al-26m
22	$n, n\alpha$	-10.0898	10.4670	Na-22
28	n, np	-8.2721	8.5814	Mg-26
32	n, nd	-17.1402	17.7810	Mg-25
33	n, nt	-18.2136	18.8945	Al-26
45	$n, np\alpha$	-18.8839	19.5899	Ne-21
102	n, g	7.7251	0	Al-28
103	n, p	-1.8285	1.8969	Mg-27
104	n, d	-6.0475	6.2736	Mg-26
105	n, t	-10.8829	11.2898	Mg-25
107	n, α	-3.1303	3.2474	Na-23, Na-23m

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.1 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках ENDF/B-VI и JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мугабгхабом и др. [81M]. В JENDL-3.3 эти параметры представлены непосредственно в секции MF=2 с верхней границей резонансной области 210 кэВ и радиусом потенциального рассеяния $R_0 = 5.098$ ферми, тогда как в ENDF/B-VI секции MF=2 ограничивается областью энергий до 1 кэВ и содержит только радиус потенциального рассеяния $R_0 = 3.2753$ ферми. Нейтронные сечения, вычисленные на основе резонансных

параметров в приближении MLBW, в оценке ENDF/B-VI (Release≤5) даны непосредственно в секции MF=3.

Новый анализ параметров нейтронных резонансов для JEFF-3.0 и более поздних версий ENDF/B-VI (Release≥6) был выполнен в ORNL Дерриеном и др. в рамках R-матричного подхода на основе программы SAMMY [98L]. Параметры разрешенных резонансов были определены в области энергий до 850 кэВ и использовано представление спина каналов, разделяющее угловые моменты J, образованные нейтронами с угловыми моментами $s=1 \pm 1/2$. В анализ были включены следующие экспериментальные данные:

1) Результаты двух измерений пропускания на ORELA в диапазоне энергий нейтронов от 0.5 эВ до 400 кэВ с 80 м пролетной базой и толщиной образцов 0.01892 и 0.1513 атом/барн [99G].

2) Результаты двух измерений пропускания на спектрометре Geel в диапазоне энергий от 200 до 850 кэВ с 400 м пролетной базой и толщиной образцов 0.05334 и 0.01920 атом/барн [94R].

3) Данные измерений пропускания на ORELA в диапазоне энергий 200 до 850 кэВ с 47 м пролетной базой и толщиной образцов 0.7639 атом/барн [72P].

4) Данные измерений сечений захвата нейтронов на ORELA в диапазоне энергий нейтронов от 100 эВ до 670 кэВ с 40 м пролетной базой и толщиной образцов 0.01892 и 0.1513 атом/барн [99G].

5) Данные о полном сечении, сечении рассеяния и захвата тепловых нейтронов, имеющиеся в литературе.

Ниже приведено сопоставление сечения для тепловых нейтронов (0.0253 эВ), полученных в данном анализе и предыдущей ENDF/B-VI.5 оценке:

	Mug81	JENDL-3.3	ENDF/B-VI.5	ORNL
Total	1.644 ± .004 b	1.645 b	1.60 b	1.68 b
Elastic	1.413 ± .001 b	1.414 b	1.37 b	1.45 b
Capture	0.231 ± .003 b	0.231 b	0.232 b	0.233 b
Res. Int.	0.17 ± .07 b	0.123 b	0.134 b	0.131 b

В следующей таблице представлено сравнение средних полных сечений и сечений захвата нейтронов для предыдущей ENDF/B-VI.5 и новой оценки (вычисления проведены с программой NJOY):

Energy (keV)	Total (b)		Capture (b)	
	ENDF	ORNL	ENDF	ORNL
1.0e-5 - 1.0e-3	1.417	1.496	6.718e-2	6.753e-2
1.0e-3 - 0.1	1.354	1.428	6.720e-3	6.699e-3
0.1 - 0.5	1.350	1.408	2.718e-3	2.173e-3
0.5 - 1.0	1.349	1.381	1.985e-3	1.216e-3
1.0 - 100.0	5.385	5.228	4.376e-3	3.370e-3
100.0 - 200.0	5.286	5.814	1.994e-3	1.376e-3
200.0 - 500.0	3.925	4.130	8.734e-4	6.180e-4
500.0 - 800.0	3.912	4.003	8.585e-4	3.093e-4

Параметры разрешенных нейтронных резонансов, полученные в ORNL, включены в оценку JEFF-3.0 (=JEFF-3.1), тогда как в оценке ENDF/B-VI представлены только сечения, восстановленные для этих параметров и включенные в секцию MF=3. Радиус потенциального рассеяния в оценке JEFF-3.0 принят равным 4.3226 фм.

2.2 Статистические характеристики разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.0, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Отчетливо виден значительный пропуск p-резонансов в оценке JENDL-3.3 уже при достаточно низких энергиях (< 200 кэВ) и, по-видимому, завышенные значения нейтронных ширин p-резонансов при энергиях выше 300 кэВ. В JEFF-3.0 линейному участку нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (60 \pm 7)$ кэВ, и для p-резонансов – $D_1 = (24 \pm 3)$ кэВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (2.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$ и $S_1 = (1.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$.

Следует отметить, что в анализе ORNL, включенном в JEFF-3.0, определены также параметры для 22 d-резонансов, тогда как в JENDL-3.3 таких резонансов было только два. Анализ кумулятивных сумм числа резонансов и приведенных нейтронных ширин соответствует $D_2 = (30 \pm 6)$ кэВ и $S_2 = (2.3 \pm 0.8) \cdot 10^{-4}$, но статистический анализ распределения Портера-Томаса для d-резонансов указывает на существенный вклад слабых резонансов, которые следовало бы отнести к f-волне. С другой стороны, полученное значение D_2 представляется слишком большим по отношению к D_1 и указывает на примерно двукратный пропуск d-резонансов. Поэтому неопределенности анализа средних параметров d-резонансов, по-видимому, оказываются значительно большими, чем приведенные выше статистические погрешности.

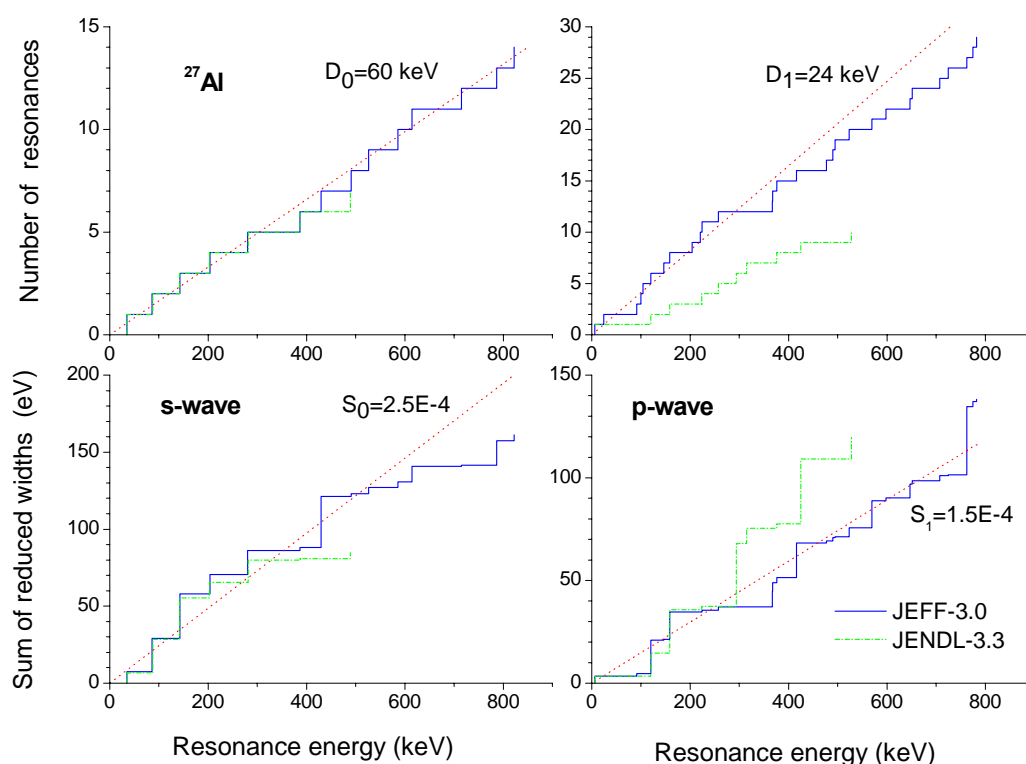


Рисунок 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI (JEFF-3.0)

Так как ни одна из имеющихся оценок не содержит области неразрешенных резонансов, то рассмотренные средние параметры резонансов представляют, в основном, общепознавательный интерес, но не влияют на оценки основных нейтронных сечений. На рис. 2 оценки полных нейтронных сечений в области разрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Все оценки

хорошо согласуются с экспериментальными данными, и незначительные разногласия оценок возникают лишь в минимумах между резонансами. На рис. 2 не приведены данные наиболее детальных измерений полных сечений в области энергий нейтронов выше 250 кэВ [94R]. В этих измерениях получено столь большое число точек, что они практически полностью перекрывают все предыдущие измерения. Сравнение оценок с этими данными показано на рис. 3. Так как данные [94R] непосредственно использовались при определении параметров разрешенных нейтронных резонансов, то хорошее согласие с ними оценок ENDF/B-VI и JEFF-3.0 является вполне закономерным. Оценка JENDL-3.3 выше 210 кэВ проведена непосредственно по усредненным экспериментальным данным и практически не отличается от ENDF/B-VI.

На рис. 4 показано сравнение оценок сечений упругого рассеяния нейтронов в области разрешенных резонансов. Экспериментальные данные об интегральных сечениях упругого рассеяния получены лишь в экспериментах с плохим разрешением, и они не позволяют что-либо уточнить в параметрах разрешенных резонансов.

На рис. 5 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Как и для упругого рассеяния, данные по радиационному захвату получены в экспериментах с плохим разрешением, и они не дают дополнительной информации для анализа параметров разрешенных резонансов.

Проведенный анализ показал, что **область разрешенных резонансов до 850 кэВ наиболее полно представлена в оценке JEFF-3.0(=JEFF-3.1). Отличия от оценок ENDF/B-VI и JENDL-3.3 для полных нейтронных сечений и сечений упругого рассеяния сравнительно невелики, но для сечений радиационного захвата в промежутках между резонансами они весьма значительны. Так как оценка JEFF-3.0 получена на основе наиболее поздних экспериментальных данных, то ее следует признать предпочтительной.**

Следует еще раз отметить, что только в оценке JEFF-3.0 (JEFF-3.1) область разрешенных резонансов простирается до 850 кэВ. В JENDL-3.3 верхняя граница разрешенных резонансов принята равной 210 кэВ и в ENDF/B-VI принята граница 1 кэВ, т.е. все резонансы представлены непосредственно в энергетической зависимости сечений (MF=3). Различие представлений не очень сильно отражается на полных нейтронных сечениях (рис. 3) и сечениях упругого рассеяния (рис. 4), но для сечений радиационного захвата нейтронов различия оказываются значительными (рис. 5).

Перечень цитированных работ

72P F.G.Perey, T.A.Love and W.E.Kenney,"A Test of Neutron Total Cross Section Evaluations from 0.2 eV To 20 MeV for C, O, Al, Si, Ca, Fe and SiO₂, ORNL-4823, ENDF-8 (1972).

81M S.F.Mughabghab et al., Neutron Cross Sections, Academ Press, NY, 1981, v. 1, part A.

94R G.Rohr et al., Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Gatlinburg, Tennessee, May/1994

98L N.M.Larson, Updated User Guide for SAMMY: Multilevel R-Matrix Fits to Neutron Data Using Bayes' Equations, ORNL/TM-9179/R4 (December 1998). See also ORNL/TM-9170/R5.

99G K.H.Guber et. al., in Proc. 10th Symp. On Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, Los Alamos, New Mexico, August 30 to September/1999.

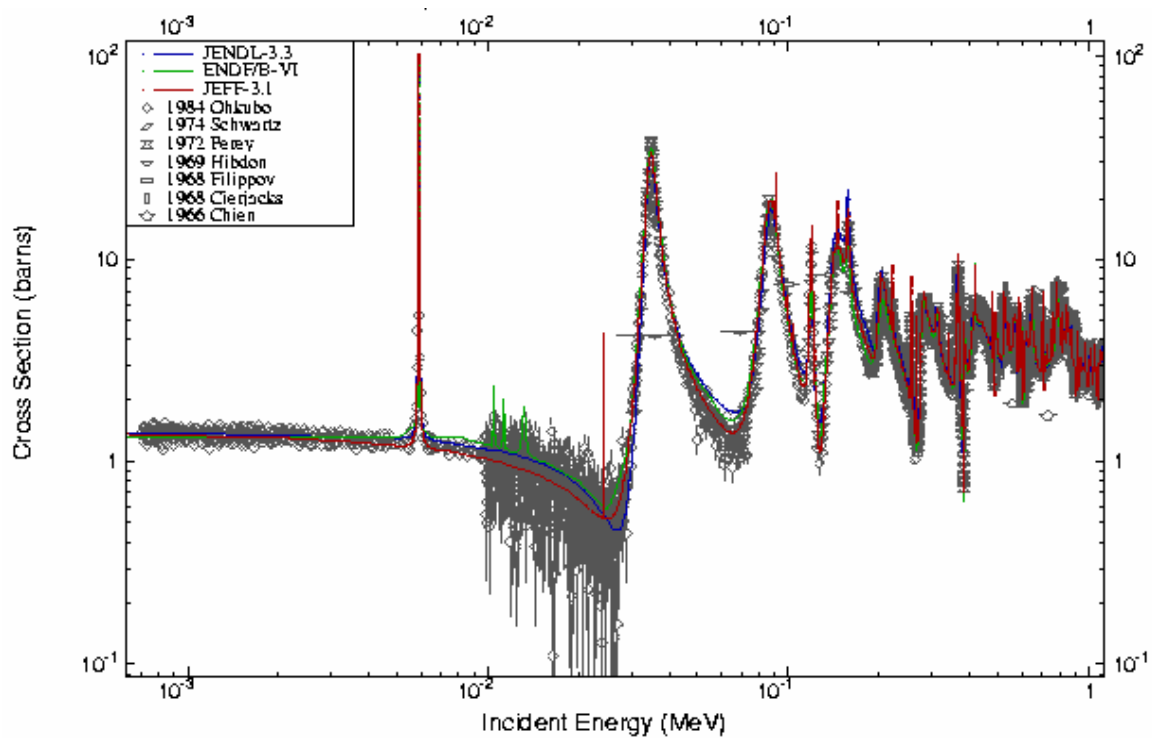


Рисунок 2. Экспериментальные данные о полных нейтронных сечениях в области энергий до 850 кэВ в сравнении с различными оценками

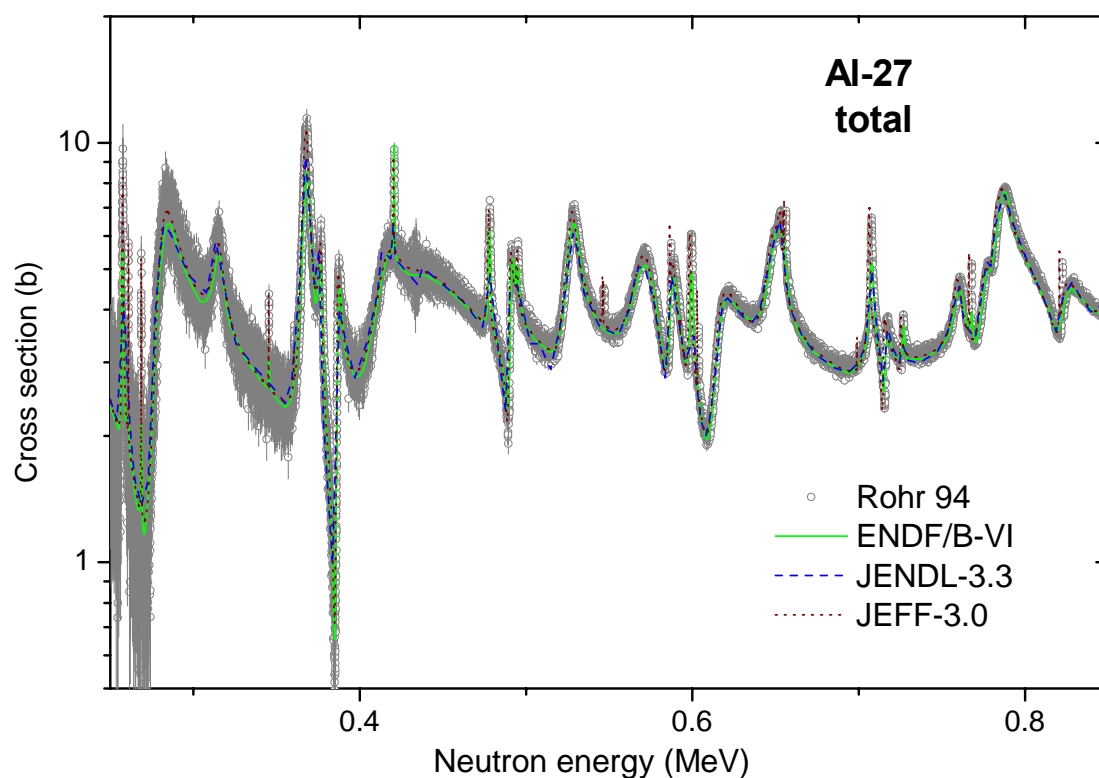


Рисунок 3. Экспериментальные данные работы [94R] в области энергий нейтронов до 850 кэВ в сравнении с оценками

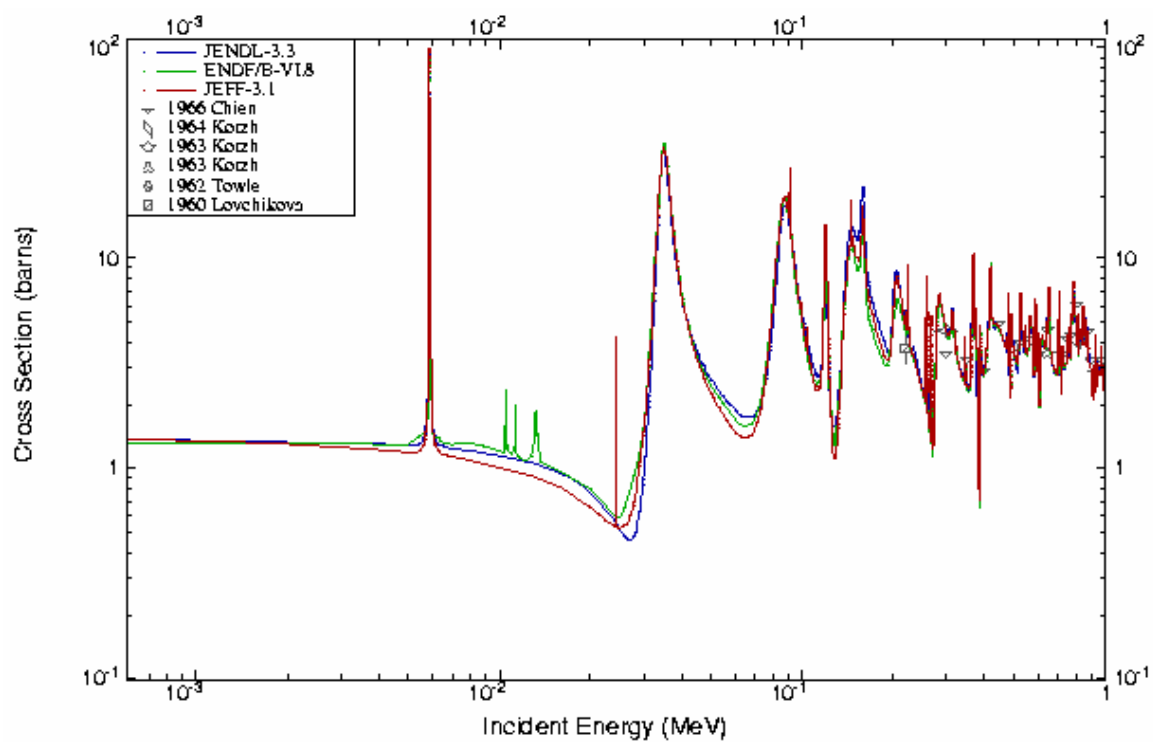


Рисунок 4. Сравнение оценок упругого рассеяния нейтронов в области разрешенных резонансов

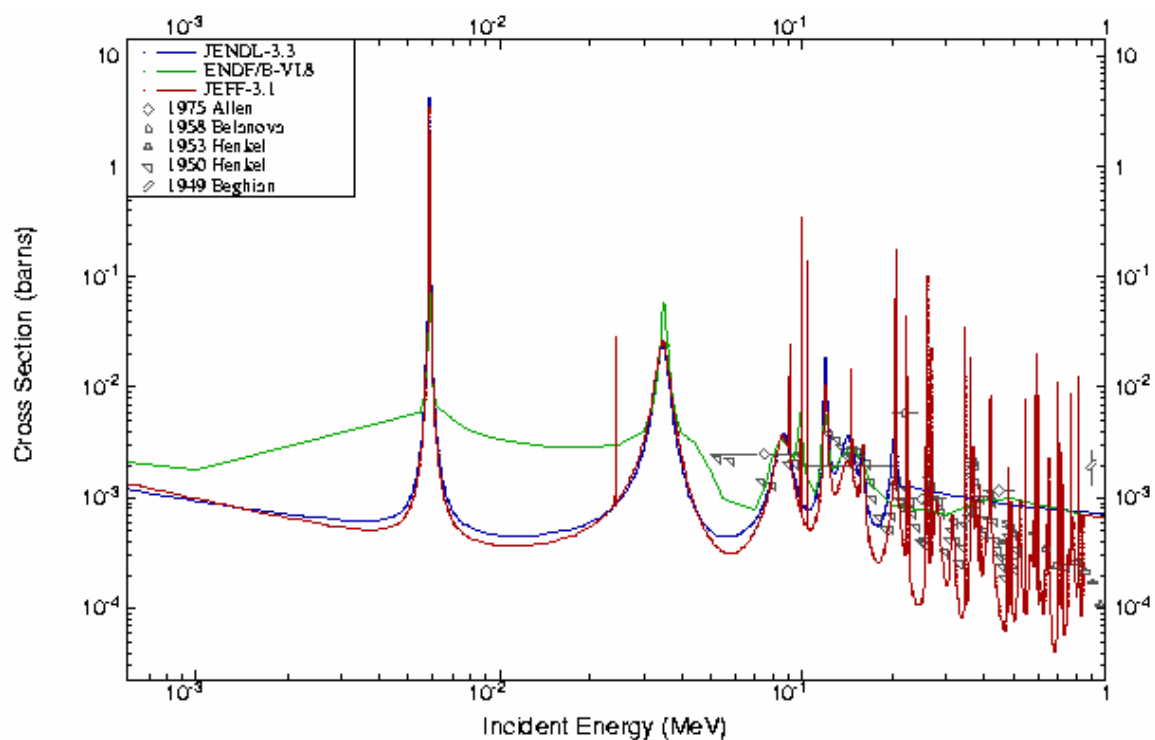


Рисунок 5. Экспериментальные данные о сечениях радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с различными оценками

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3, 4, 5, 6)

3.1. Полное сечение

Вне резонансной области оценка JEFF-3.0 (JEFF-3.1) для всех сечений целиком взята из ENDF/B-VI, поэтому при дальнейшем сравнении с экспериментальными данными будут рассматриваться только независимые оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI. Резонансная структура полных нейтронных сечений сохраняется и выше области разрешенных резонансов вплоть до энергии ~ 10 МэВ. На рис. 6 и 7 показана совокупность имеющихся экспериментальных данных в сравнении с оценками. Все оценки получены непосредственным усреднением экспериментальных данных, и разногласия между оценками пренебрежимо малы во всем диапазоне энергий нейтронов выше 850 кэВ. Данные измерений [94], выполненных с более высоким разрешением, чем предыдущие измерения, демонстрируют более сильные резонансные эффекты, чем учитываемые в оценках (рис. 7), но детальное воспроизведение наблюдаемых структур остается пока за рамками оценок.

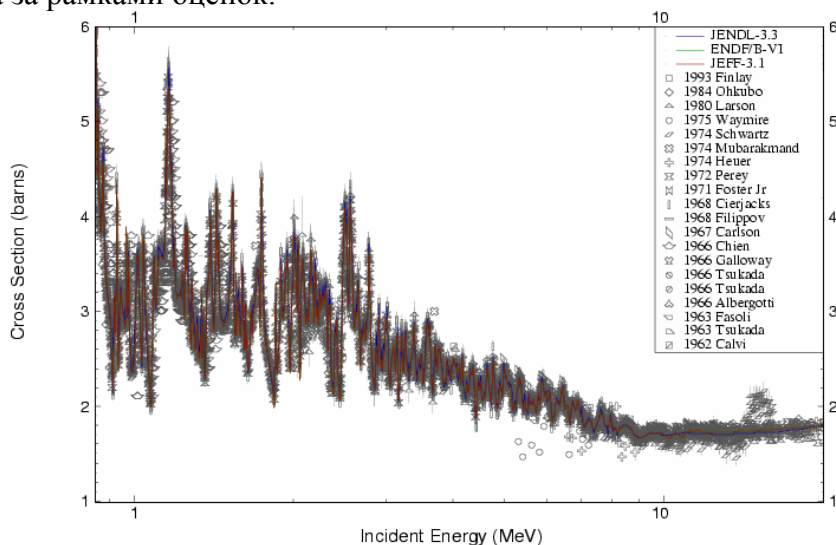


Рисунок 6. Оценки полных нейтронных сечений ^{27}Al вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

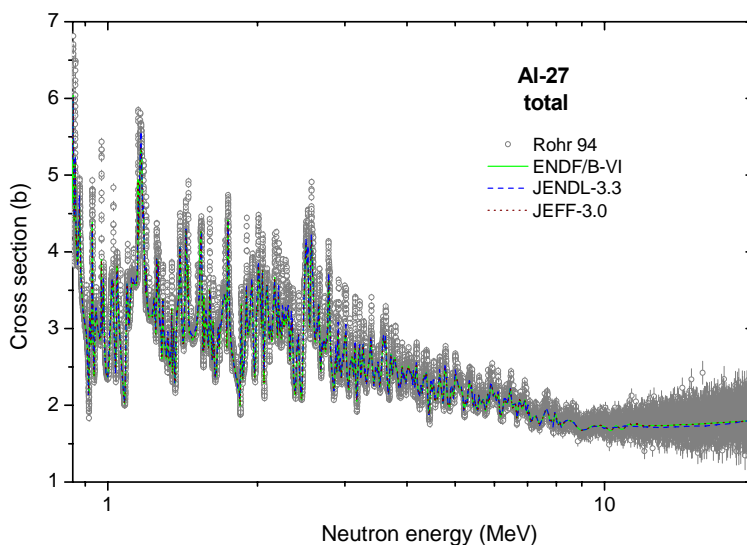


Рисунок 7. Оценки полных нейтронных сечений ^{27}Al вне резонансной области в сравнении с данными работы [94R]

3.2. Упругое рассеяние и угловые распределения нейтронов

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 8 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния с экспериментальными данными. В целом, вся совокупность экспериментальных данных хорошо согласуется с оценками, между которыми нет существенных разногласий. Следует отметить, что большинство измерений упругого рассеяния нейтронов было выполнено со сравнительно низким энергетическим разрешением; в таких данных не проявляется резонансная структура сечений.

На нейтронном спектрометре Гиля были выполнены измерения сечений упругого рассеяния в диапазоне энергий нейтронов от 0.26 до 2.0 МэВ для пяти углов в условиях хорошего разрешения [97K], сравнимого с разрешением в рассмотренных выше измерениях полных нейтронных сечений. Эти данные показаны для двух углов 40° и 120° на рис. 9 в сравнении с оценками. Оценки достаточно хорошо воспроизводят как общую анизотропию рассеяния нейтронов, так и наблюдаемую резонансную структуру сечений рассеяния под различными углами. При этом оценка ENDF/B-VI лучше описывает сечения для обратных углов при энергиях нейтронов выше 1 МэВ. Это обусловлено, главным образом, более детальным представлением угловых распределений нейтронов (MF=4, MT=2) в оценке ENDF/B-VI по сравнению с аналогичной секцией JENDL-3.3.

Для энергий нейтронов выше 2 МэВ оценки угловых распределений существенно не отличаются. На рис. 9-12 показана лишь часть имеющихся экспериментальных данных для наиболее характерных энергий налетающих нейтронов. Отобраны энергии, для которых имеются результаты нескольких независимых измерений. Оценки достаточно хорошо воспроизводят основные закономерности изменения угловых распределений при увеличении энергии нейтронов, и расхождения оценок с экспериментом оказываются примерно такими же, как разногласия экспериментальных данных.

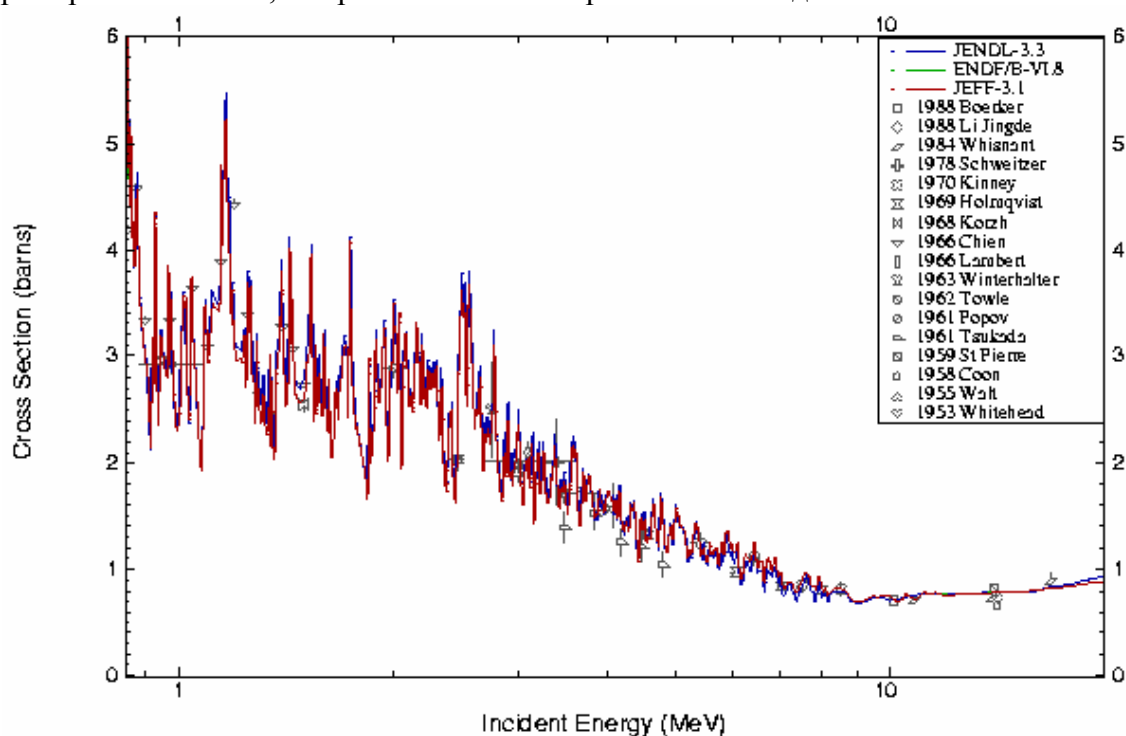


Рисунок 8. Оценки сечений упругого рассеяния нейтронов в сравнении с экспериментальными данными

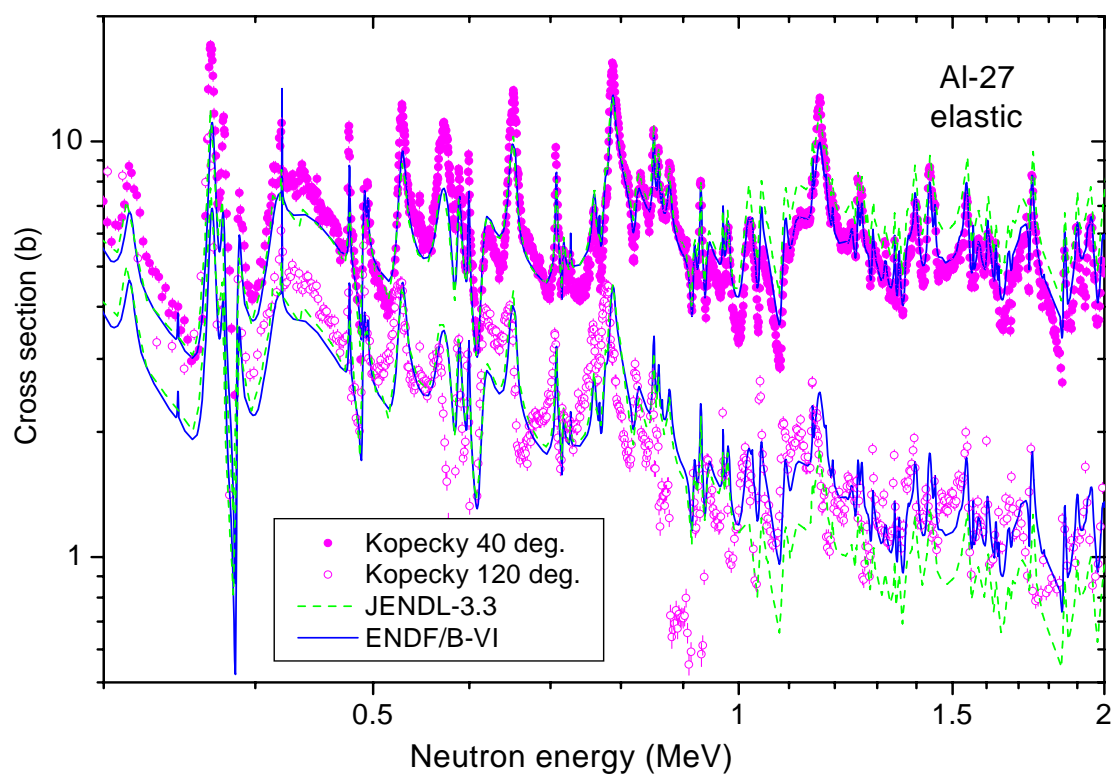


Рисунок 9. Экспериментальные данные [97K] о сечениях упругого рассеяния нейтронов для переднего (40°) и заднего (120°) углов в сравнении с оценками

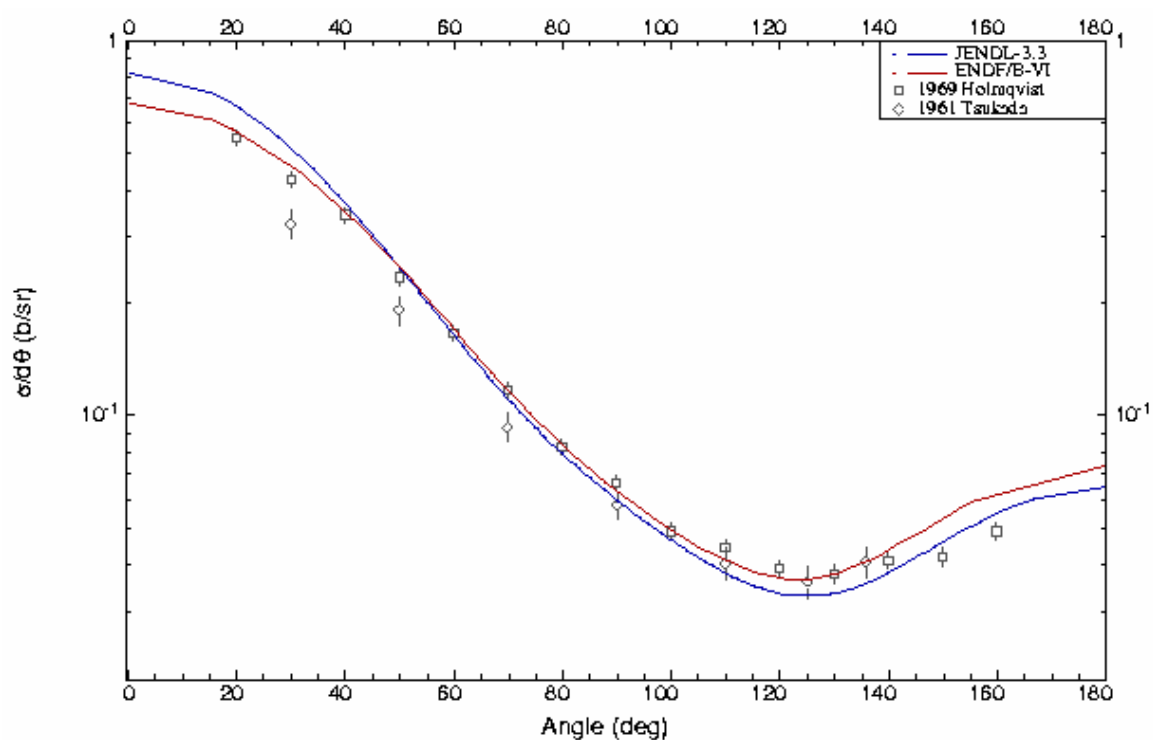


Рисунок 10. Экспериментальные данные об угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с энергией 3.5 МэВ в сравнении с оценками

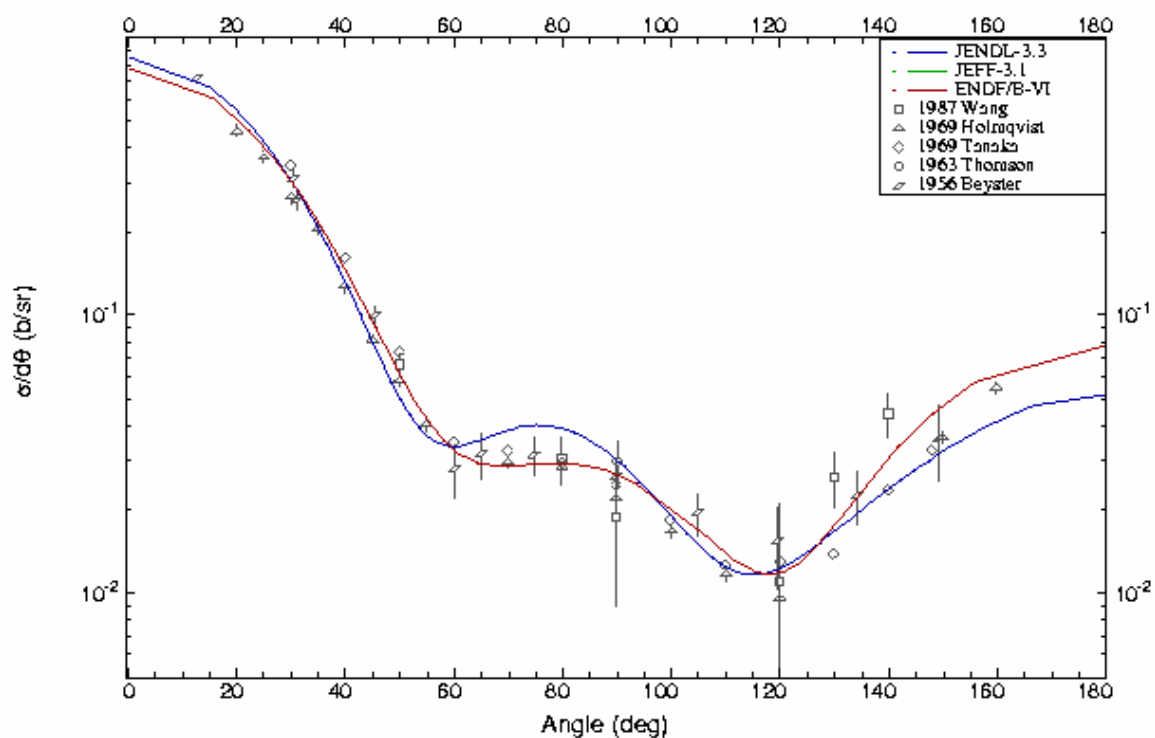


Рисунок 11. Экспериментальные данные об угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с энергией 7.0 МэВ в сравнении оценками

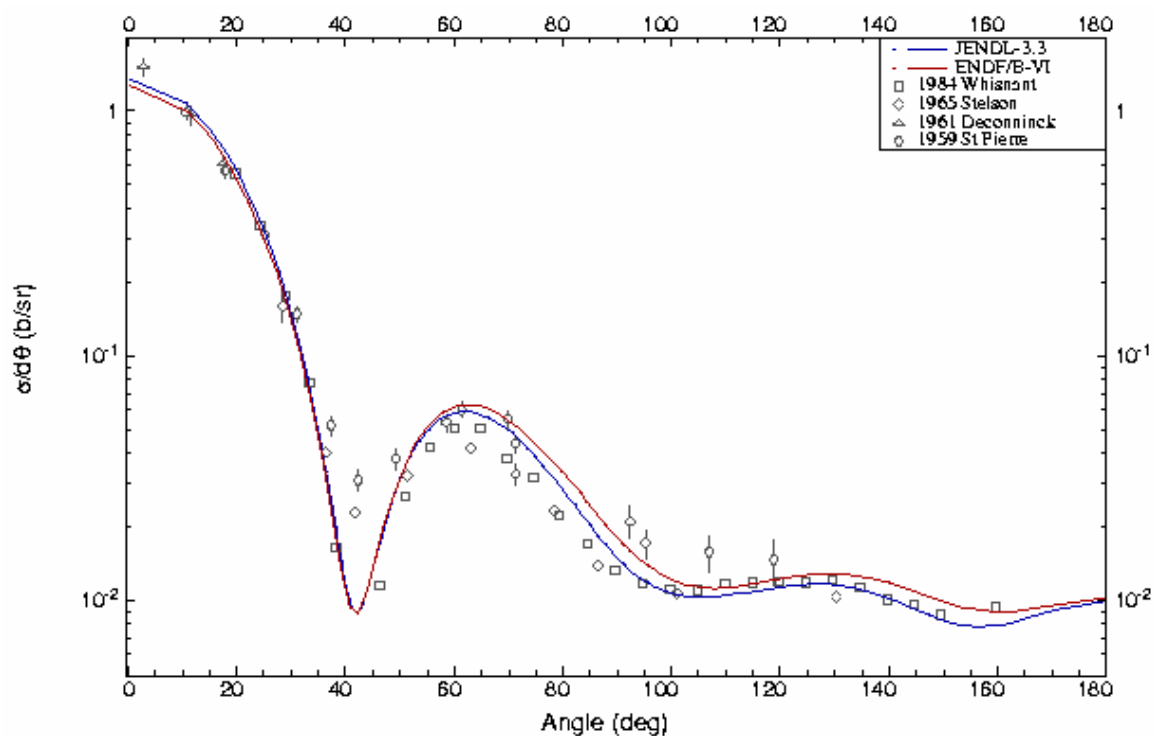


Рисунок 12. Экспериментальные данные об угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с энергией 13.9 МэВ в сравнении оценками

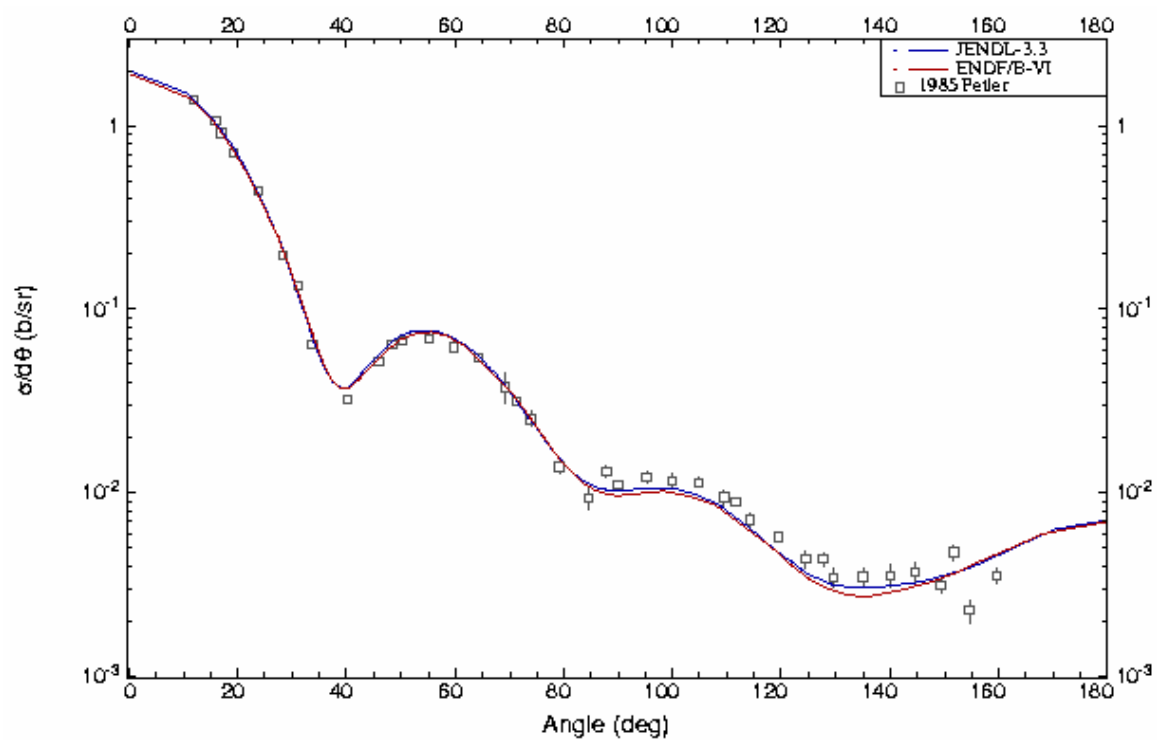


Рисунок 13. Экспериментальные данные об угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с энергией 20 МэВ в сравнении оценками

3.3. Сечение радиационного захвата нейтронов

Экспериментальные данные по сечению радиационного захвата нейтронов в диапазоне энергий выше 1 МэВ весьма противоречивы (рис. 14). В ранних измерениях [53H] были получены очень низкие значения сечений захвата нейтронов в области энергий от 1 до 3 МэВ, и оценки JENDL-3.1 и ENDF/B-V ориентировались на эти данные. Однако, в более поздних измерениях для энергий нейтронов 3 – 5 МэВ были получены на порядок более высокие значения сечений [62C, 67P, 68C]. Хотя разногласия в данных [62C, 67P, 68C], также как в результатах измерений для нейтронов с энергией ~14 МэВ, остаются весьма значительными, оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI ориентируются на усредненные значения данных [62C, 67P, 68C].

Оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия в области энергий выше 3 МэВ обусловлено различными приближениями в описании конкуренции радиационных и нейтронных ширин на начальных этапах каскада гамма-переходов. В области энергий выше 8-10 МэВ во всех оценках рассматривается механизм прямого-коллективного захвата нейтронов, но приближения, привлекаемые для его описания, различаются весьма значительно. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 1 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не оказывает сколь-либо заметного влияния на расчеты характеристик ядерных реакторов.

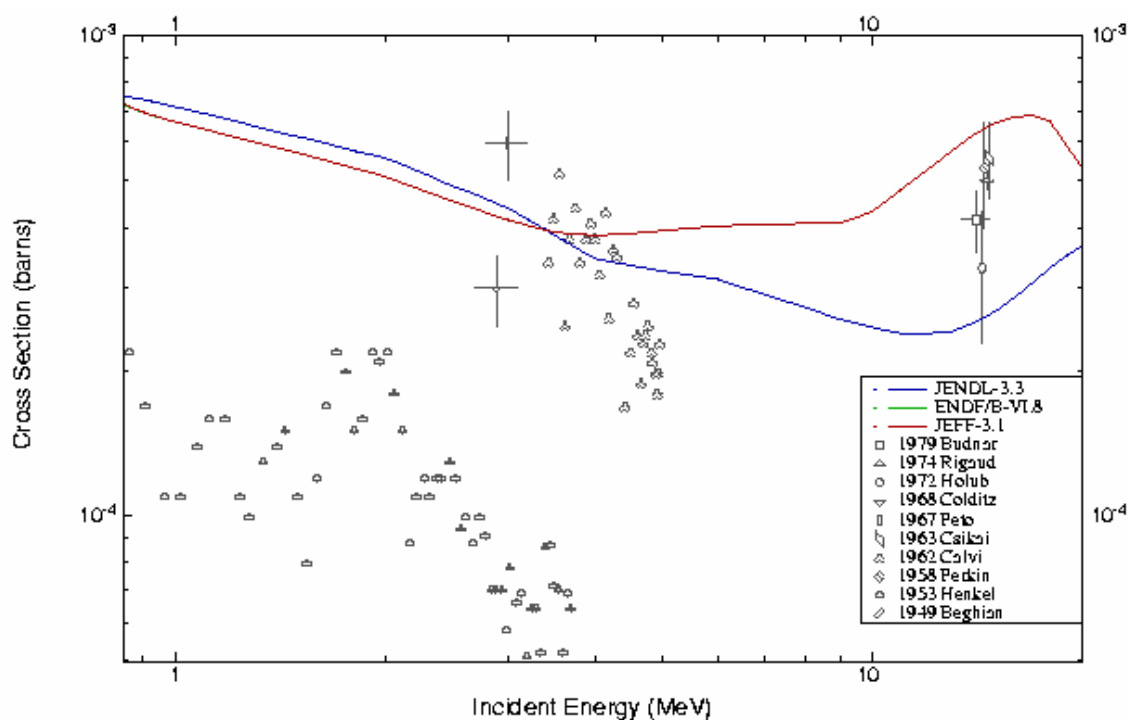


Рисунок 14. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов на ^{27}Al вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

3.4 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведены схемы низколежащих уровней ^{27}Al , используемые в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI:

JENDL-3.3			ENDF/B-VI	
№	Энергия МэВ	J π	Энергия МэВ	J π
g.s.	0.0	5/2 +	0.0	5/2 +
1.	0.8438	1/2 +	0.84375	1/2 +
2.	1.0145	3/2 +	1.01445	3/2 +
3.	2.2100	7/2 +	2.2111	7/2 +
4.	2.7340	5/2 +	2.7348	5/2 +
5.	2.9814	3/2 +	2.9811	3/2 +
6.	3.0040	9/2 +	3.0040	9/2 +
7.	3.6780	1/2 +	3.6781	1/2 +
8.	3.9560	5/2 +	3.9568	5/2 +
9.	4.0540	3/2 -	4.0543	3/2 -
10.	4.4090	5/2 +	4.4100	5/2 +
11.	4.5103	11/2 +	4.5103	11/2 +
12.	4.5800	7/2 +	4.5800	7/2 +
13.	4.8120	5/2 +	4.8117	5/2 +
14.	5.1550	3/2 -	5.1563	3/2 -
15.	5.2460	5/2 +	5.2482	5/2 +
16.	5.4199	5/2 +	5.4199	9/2 +
17.	5.4330	9/2 +	5.4328	7/2 -
18.	5.6000	Contin.	5.4384	5/2 -
19			5.4998	11/2 +
20			5.5507	5/2 -
21			5.6670	9/2 +
22			5.7513	1/2 +
23			5.8268	3/2 -
24			5.9596	7/2 -
25			6.0800	3/2 +
26			6.1154	5/2 +
27			6.1592	3/2 -
28			6.2870	7/2 +
29			6.4640	5/2 +
30			6.4773	7/2 -
31			6.5118	9/2 -
32			6.5330	7/2 +
33			6.6053	3/2 -
34			6.6515	5/2 -
35			6.7130	9/2 +
36			6.7650	5/2 +
37			6.7754	3/2 -
38			6.8142	1/2 +
39			6.8200	3/2 +
40			6.8200	Contin.

В оценке ENDF/B-VI учтено значительно больше уровней, чем в JENDL-3.3. Однако, различие в числе дискретных уровней и соответствующих границах непрерывного спектра не влияет сколь-либо заметным образом на результаты расчетов интегральных сечений и спектров неупруго рассеянных нейтронов. На рис. 15 оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов показаны в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Все экспериментальные данные получены путем измерения выходов гамма-лучей, сопутствующих неупругому рассеянию нейтронов, и погрешности такой методики, связанные с дешифровкой спектра гамма-лучей при возбуждении многих уровней, достаточно велики. Поэтому расхождение

оценок с экспериментальными данными выше энергии нейтронов ~ 3 МэВ, по-видимому, следует отнести к погрешностям измерений. Согласие оценок ENDF/B-VI и JENDL-3.3 достаточно хорошее во всем диапазоне энергий нейтронов, исключая участок от 5.5 до 8 МэВ, где в оценке JENDL-3.3 проявляется локальное возрастание сечения. Такое поведение сечения обусловлено, скорее всего, погрешностями моделирования непрерывного спектра, и оценка ENDF/B-VI в этой области кажется предпочтительной.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов. Оценки опираются на современные теоретические модели и систематики асимметрии угловых распределений нейтронов для близлежащих ядер, но прямых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния нейтронов для ^{27}Al нет.

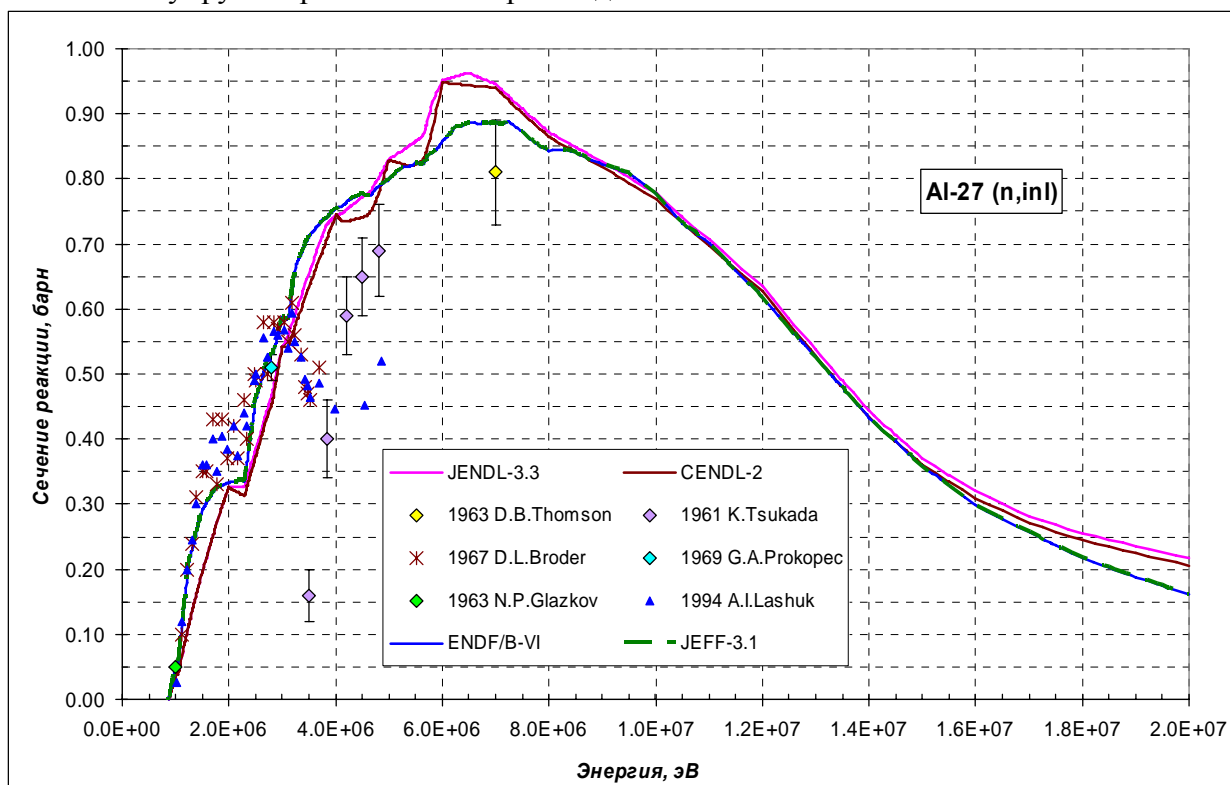


Рисунок 15. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов на ^{27}Al в сравнении с экспериментальными данными

3.5. Реакция $n,2n$ (MT=16):

Экспериментальные данные о сечении реакции $(n,2n)$ показаны на рис. 16 совместно с соответствующими оценками. Очевидно, что оценка JENDL-3.3 ориентировалась на данные работ [88I, 96I], тогда как ENDF/B-VI – на данные [99F]. Последние измерения [01S] имеют столь большую погрешность, что их вряд ли можно использовать для предпочтения какой-либо из оценок. В целом, однако, сечение реакции $(n,2n)$ сравнительно невелико, и значительные разногласия его оценок не очень существенны для большинства практических приложений. Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

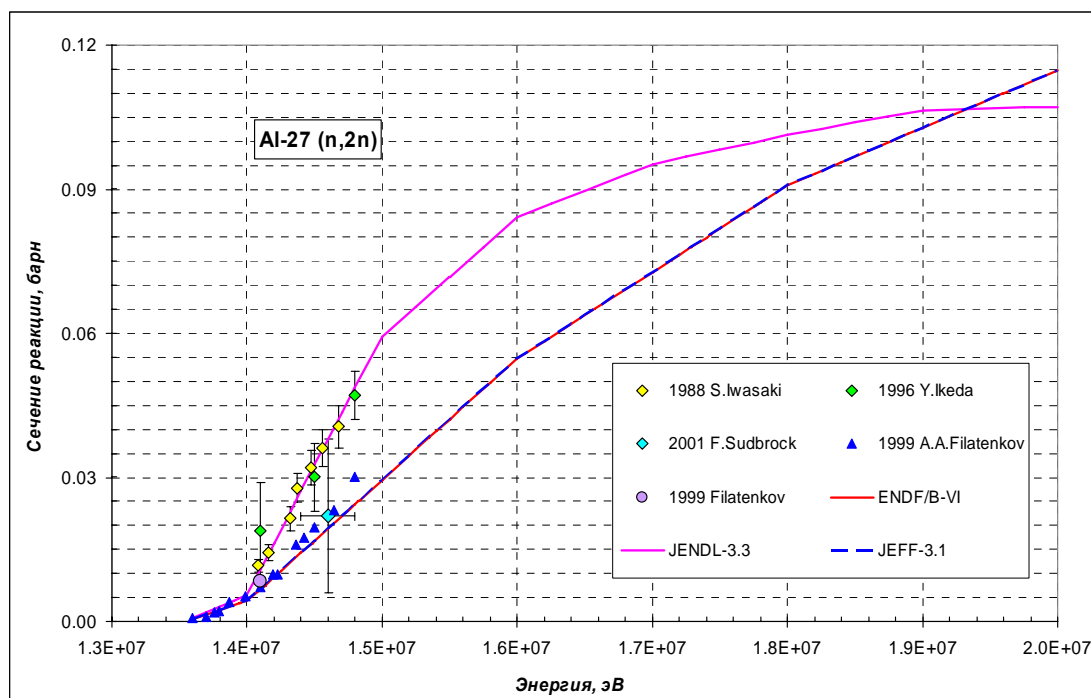


Рис. 16. Экспериментальные данные о сечении реакции $^{27}\text{Al}(n,2n)$ в сравнении с оценками

3.6. Реакции $(n,n\alpha)$, (n,np) , (n,nd) и (n,nt) и $(MT=22, 28, 31 \text{ и } 45)$:

В большинстве случаев для подобных реакций нет надежных экспериментальных данных, и их оценка обычно опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. На рис. 17 показаны оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI для реакции $^{27}\text{Al}(n,n\alpha)$ и на рис. 18 для реакции $^{27}\text{Al}(n,np)$. Все оценки основаны на расчетах по программе GNASH, и разногласия оценок обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей. Полученные сечения сравнимы с сечением реакции $(n,2n)$, и это оправдывает интерес к таким реакциям. Экспериментальные данные для реакции $^{27}\text{Al}(n,np)$ сильно противоречат результатам расчетов, но согласно общепринятому мнению, эти противоречия обусловлены недостатками экспериментальных данных. Очевидна необходимость проведения более надежных измерений сечения обеих реакций.

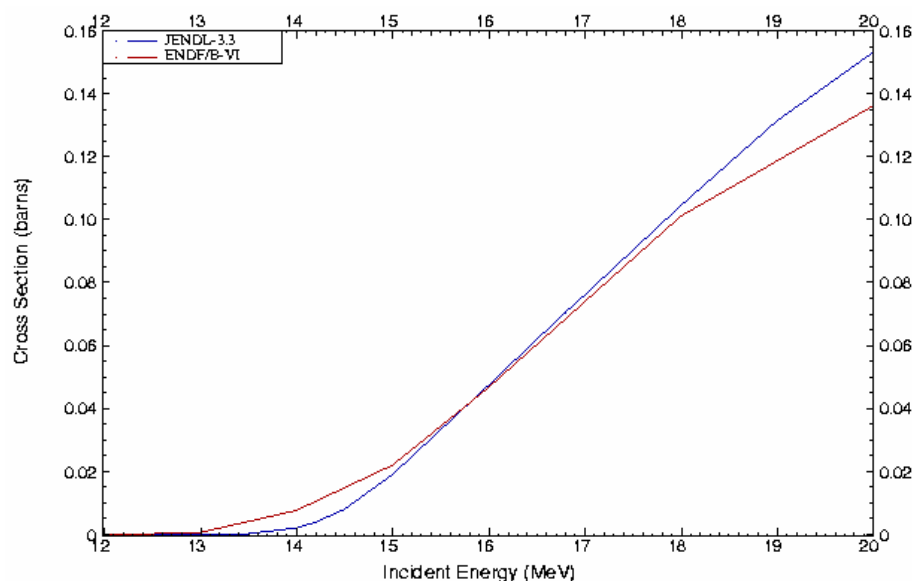


Рисунок 17. Оценки сечений реакции $^{27}\text{Al}(n,n\alpha)$

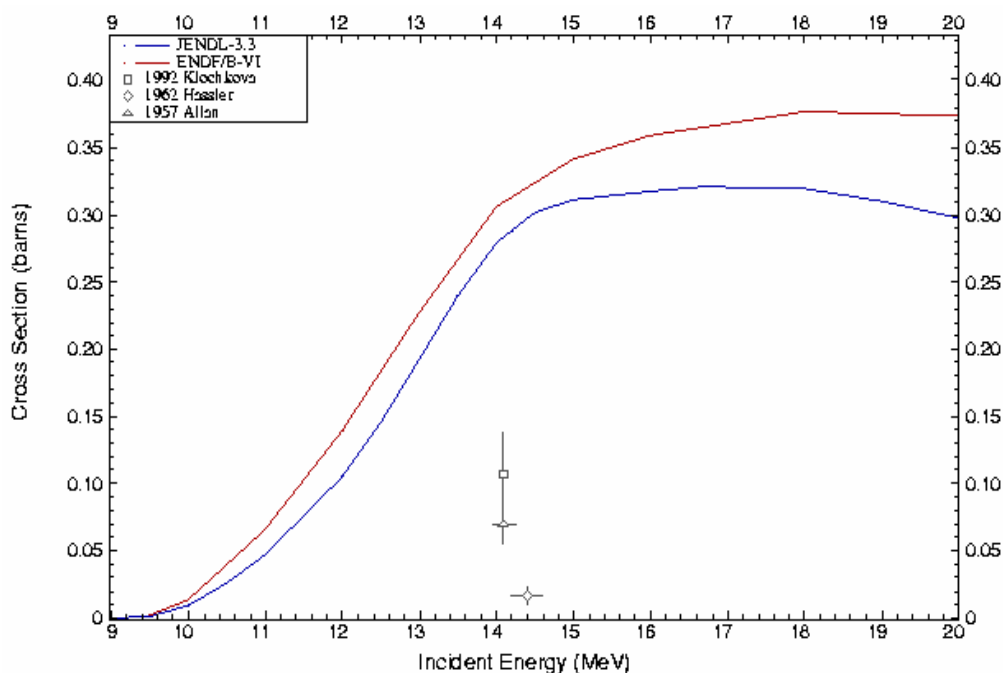


Рисунок 18. Оценки сечений реакции $^{27}\text{Al}(n,np)$ в сравнении с экспериментальными данными.

Реакции (n,nd) и (n,nt) также оцениваются только на основе теоретических расчетов, но пороги столь высокие, что полученные сечения оказываются пренебрежимо малы даже при энергии нейтронов 20 МэВ. Оценки сечений этих реакций включены в ENDF/B-VI, но отсутствуют в JENDL-3.3.

Спектры и угловые распределения нейтронов для рассматриваемых реакций представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

3.7. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104, 105 и 107):

Реакции $^{27}\text{Al}(n,p)$ и $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$ широко используются для дозиметрии нейтронов, поэтому для них имеются большие наборы экспериментальных данных. На рис. 19 показаны результаты измерений сечений реакции (n,p) в сравнении с оценками. Чтобы не загромождать рисунок, на нем опущены результаты измерений, выполненных до 1970 года, а также ряд данных с погрешностями, превышающими 20%. Основные разногласия между оценками относятся к области энергий 6 – 12 МэВ, и они обусловлены выбором экспериментальных данных, положенных в основу оценки. ENDF/B-VI ориентирована на данные [75S], тогда как в JENDL-3.3 предпочтение отдано результатам недавних измерений [04S]. Однако, учитывая весьма значительную погрешность последних данных, выбор JENDL-3.3 не кажется достаточно оправданным. По-видимому, надо искать дополнительные аргументы для выбора более достоверной оценки.

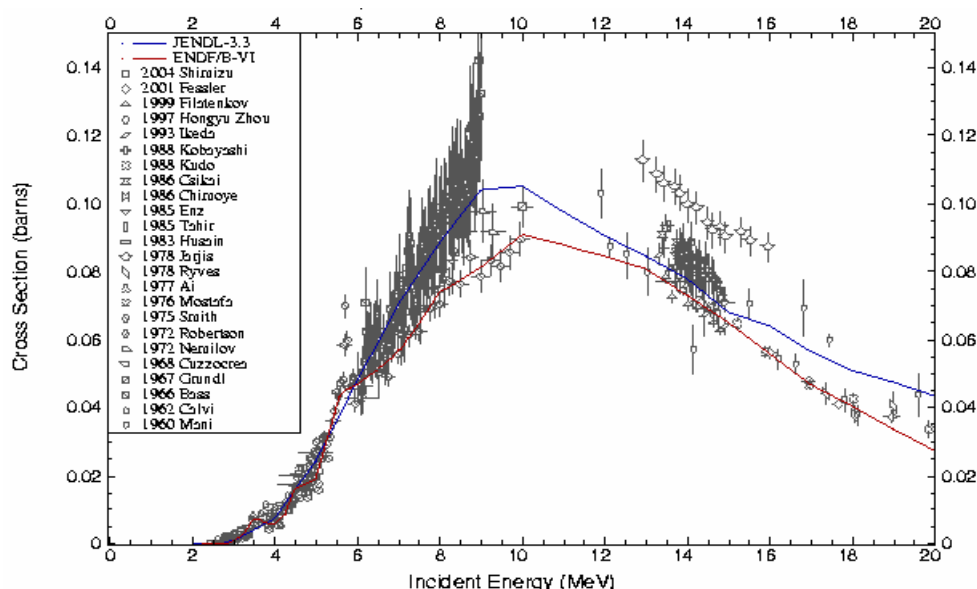


Рисунок 19. Экспериментальные данные о сечении реакции $^{27}\text{Al}(n,p)$ в сравнении с оценками.

На рис. 20 показано сравнение оценок с экспериментальными данными для реакции (n,α) . Здесь нет существенных разногласий в данных измерений, и оценки хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными.

Реакция (n,α) на алюминии является одним из нейтронных стандартов. Величина сечения этой реакции была рекомендована в 1991 г. Международной рабочей группой по ядерным стандартам при NEA OECD¹. В цитированной работе приведены также погрешности сечения. Сравнения рекомендованной десятилетие назад оценки с принятой в JEFF-3.1 показывает, что различия между ними не выходят за пределы погрешностей и не носят систематического характера.

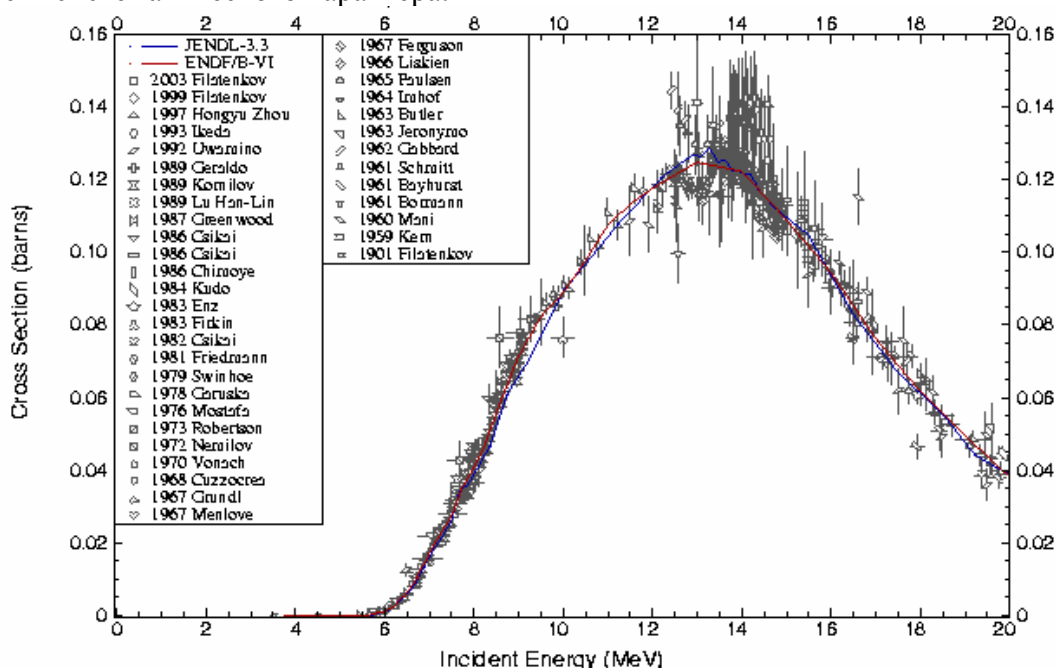


Рис. 20. Экспериментальные данные о сечении реакции $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$ в сравнении с оценками

Оценки сечений (n,d) и (n,t) реакций имеются только в ENDF/B-VI, и они показаны на рис. 21 и 22 совместно с экспериментальными данными. Экспериментальные данные не

¹ NEANDC-311 "U" (INDC(SEC)-101) Nuclear Data Standard for Nuclear Measurements. Ed. H.Conde. p75

кажутся достаточно надежными, но сечения реакций (n,d) и (n,t) сравнительно малы, и они, по-видимому, представляют интерес лишь для специальных задач.

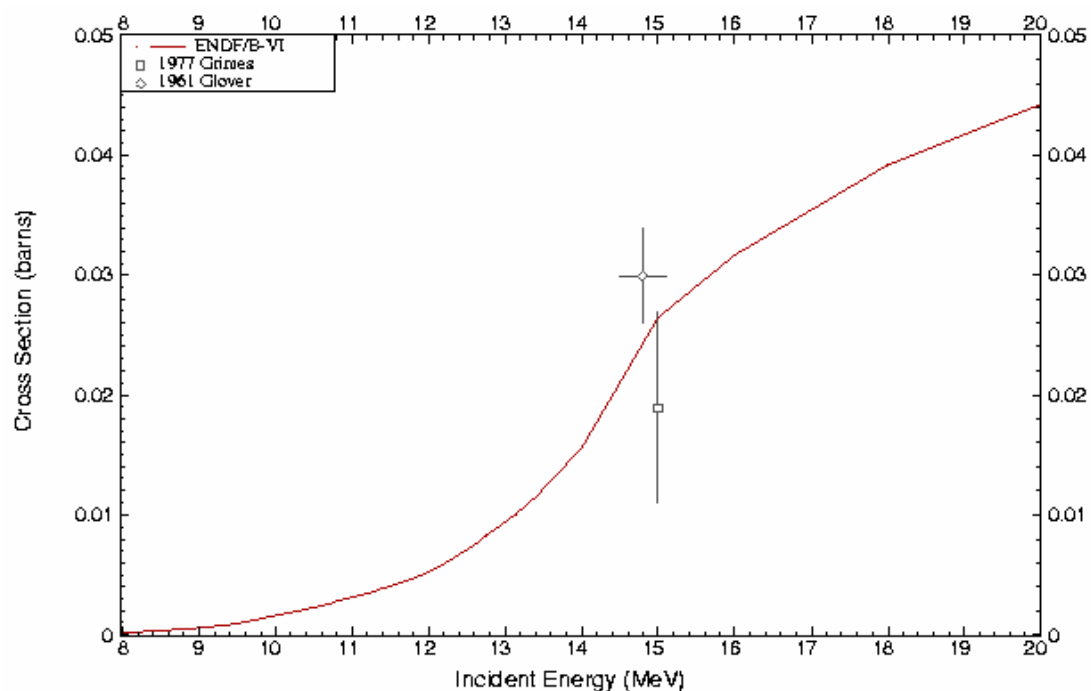


Рис. 21. Оценки сечений реакции $^{27}\text{Al}(n,d)$ в сравнении с экспериментальными данными

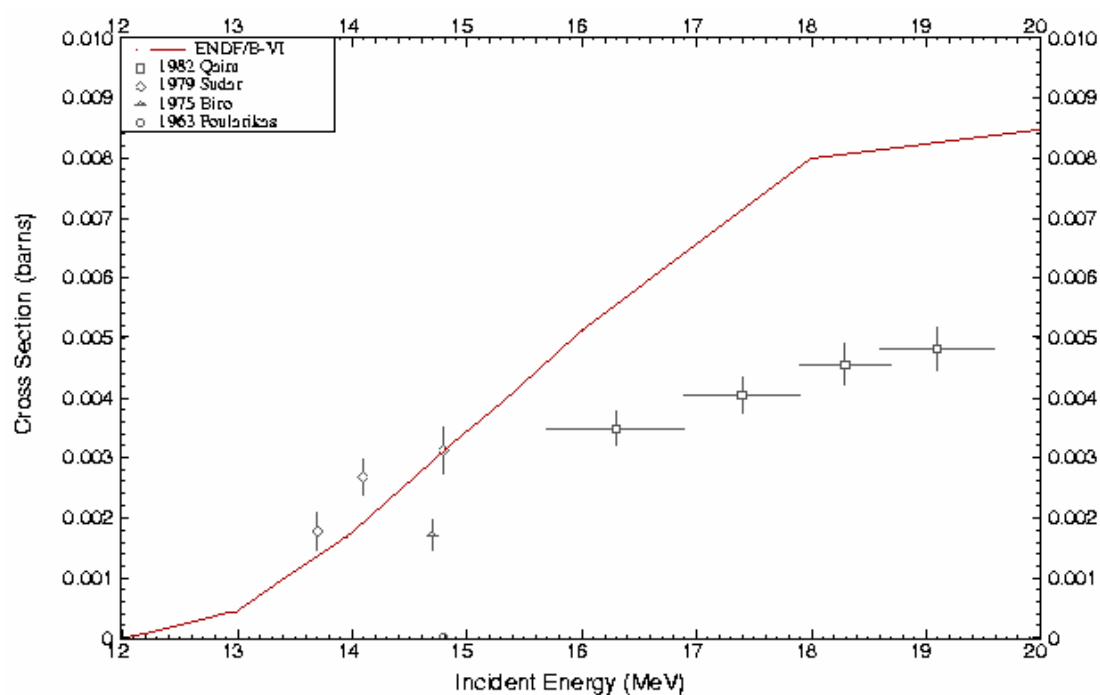


Рис. 22. Оценки сечений реакции $^{27}\text{Al}(n,t)$ в сравнении с экспериментальными данными

Перечень цитированных работ.

- 53H R.Henkel et al., EXFOR 11518 (1953).
62C G.Calvi et al., Nucl. Phys., **39** (1962) 621.
67P G.Peto et al., J. Nucl. Energy, **21** (1967) 797.
68C J.Colditz, P.Hille, EXFOR 20092 (1968).
72H E.Holub et al., Report LNS-4, 1972.
74R F.Rigaud et al., Nucl. Sci. Eng., **55** (1974) 17.
75S D.L.Smith et al., Nucl. Sci. Eng., **58** (1975) 314.
79B M.Budnar et al., Report INDC(Yug)-6, Vienna, 1979.
88I S.Iwasaki et al., Nuclear Data for Science and Technology (Mito, 1988), p. 295.
94R G.Rohr et al., Nuclear Data for Science and Technology (Gatlinburg, 1994), p. 215.
96I Y.Ikeda et al., Report INDS(NDS)-342, Vienna, 1996, p. 19.
97K S.Kopecky et al., Nuclear Data for Science and Technology (Trieste, 1997), v. 1, p. 523.
99F A.Filatenkov et al., Report RI-252, St. Petersburg, 1999.
01S T.Sudbrock et al., Radiochemica Acta, 88 (2001) 829.
04S T.Shimizu et al., Ann. Nucl. Energy, 31 (2004) 975.

4. Образование фотонов

В файлах JENDL-3.3 и ENDF/B-VI содержится достаточно полные оценки интегральных выходов и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов с ядром-мишенью. В JENDL-3.3 такая информация представлена в секциях MF=12, 13, 14 и 15, тогда как в ENDF/B-VI в секциях MF=12, 14 и 15 содержится только данные о гамма-лучах, обусловленных радиационным захватом нейтронов, а данные о множественности и спектрах гамма-лучей, сопровождающих неупругие процессы, включены в секцию MF=6. Угловые распределения всех типов гамма-излучения в обеих оценках приняты изотропными.

Интегральные выходы гамма-лучей достаточно близки в обеих оценках, но ENDF/B-VI содержит более детальную информацию о дискретных гамма-переходах, сопутствующих радиационному захвату и неупругому рассеянию нейтронов, а также дифференциальные оценки выходов гамма-лучей для реакций $(n,2n)$, (n,np) , $(n,n\alpha)$ и др.

Перечень цитированных работ.

- 93М Г.Н.Мантуров, М.Н.Николаев, А.М.Цибуля. Система групповых констант БНАБ-93, ВАНТ, 1993, вып. 1, с. 59.
04Н. Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NDC/DOC(95). Sept. 2004 Ed.

5. Валидация оцененных данных по интегральным экспериментам.

Для валидации оценок нейтронных данных алюминия были проведены расчеты $K_{эфф}$ для ряда критических сборок с алюминиевым отражателем, представленных в международном справочнике по критическим экспериментам [04Н]. Были рассмотрены две системы с компактными металлическими активными зонами из плутония или высокообогащенного урана с алюминиевыми отражателями, 3 гетерогенных критических сборок ZPR-9 с уран-вольфрамовым топливом и 2 гетерогенных сборки ZPR-3 с урановым топливом также с толстыми алюминиевыми отражателями. Нейтронные спектры в активных зонах рассмотренных сборок приведены в 28-групповом представлении на рис. 23.

Расчеты для всех сборок проводились методом Монте-Карло как в 299-групповом приближении по программе KENO-V, так и с детальным описанием энергетической зависимости сечений по программе MCNP-V. Для всех материалов использовались оцененные данные из библиотеки ФОНД-2.2. Исключение составляли нейтронные данные

для алюминия, для которых использовались данные разных библиотек. Результаты расчетов по обеим использовавшимся программам совпали в пределах статистической погрешности, не превышавшей 0.1%. Отклонения от экспериментальных значений коэффициентов размножения для бенчмарк-моделей рассмотренных экспериментов оказались гораздо существеннее. Результаты представлены в нижеследующей таблице.

Расчетно-экспериментальные расхождения для критических сборок с алюминиевым отражателем.

Критсборка	Эксп.	Погр.	(C/E-1)*100%					
			JENDL-2.0	ENDF/B-VI(7)	JEF-2.2	JEFF-3.1	JENDL-3.3	ENDF/B-V
PMF09001	1.0000	0.0027	-0.24%	-0.24%	0.82%	-0.10%	-0.29%	-0.33%
HMF01201	0.9992	0.0018	-0.61%	-0.61%	-0.23%	-0.55%	-0.65%	-0.70%
HMF06001	0.9955	0.0024	0.96%	0.96%	2.09%	0.71%	1.01%	0.98%
HMF06701	0.9959	0.0024	1.35%	1.31%	2.31%	1.02%	1.54%	1.59%
HMF06702	0.9938	0.0024	0.66%	0.63%	2.14%	0.30%	0.63%	0.60%
IMF01301	0.9941	0.0023	0.80%	0.80%	1.73%	0.69%	0.93%	0.91%
IMF01401	0.9958	0.0022	0.74%	0.74%	1.46%	0.64%	0.83%	0.82%
IMF01402	0.9927	0.0022	0.87%	0.82%	1.50%	0.72%	0.91%	0.88%
Среднее			2.77%	0.57%	0.55%	1.48%	0.43%	0.61%
Среднее по 2-м компактным			2.55%	-0.43%	-0.43%	0.29%	-0.33%	-0.47%
Среднее по 5-м гетерогенным			3.41%	1.08%	1.05%	2.25%	0.82%	1.17%

При оценке расчетно-экспериментальных расхождений следует обратить внимание на два обстоятельства.

Во-первых, расчетно-экспериментальные расхождения обусловлены не только погрешностями сечений алюминия, но и неточностями нейтронных данных для других материалов, входивших в состав критических сборок. В частности, в случае PMF-009 – констант плутония, в случае HMF-012 – констант ^{235}U . В этих двух сборках влияние неточности знания констант активной зоны можно грубо оценить сравнивая расчетно-экспериментальные расхождения для сборок с отражателями и без отражателей. Очевидно, разность между этими расхождениями будет значительно менее чувствительна к константам топливного материала. Расчеты критичности систем без отражателя (Jesabel, голая плутониевая сфера, PMF-001; Godiva, голая сфера из высокообогащенного урана, HMF-001) показали, что расхождения имеют тот же знак, что и для сфер с алюминиевыми отражателями и составляют -0.14% и -0.24% соответственно. Таким образом «эффект отражателя» оценивается расчетом с погрешностью -0.04% в случае плутониевой активной зоны и -0.24% в случае активной зоны из высокообогащенного урана. Эти расхождения лежат в пределах экспериментальных погрешностей. Таким образом, можно констатировать, что нейтронные данные успешно прошли вверификацию по данным об эффективности алюминиевых отражателей компактных металлических систем.

Источников дополнительных погрешностей в результатах расчетов сборок ZPR со сложным составом активной зоны значительно больше и учесть их много сложнее. В частности, расхождения в критичности сборок ZPR-9 содержащих вольфрам в активной зоне, сильно зависят от принимавшихся при расчете констант вольфрама. Активные зоны всех сборок ZPR содержали значительное количество конструкционной стали, неточность знания констант которой также могла существенно повлиять на расчетно-экспериментальное расхождение.

Второе обстоятельство связано с геометрией сборок. Сборки HMF-009 и HMF-012 характеризовались не только простым составом, но и простой – сферической – геометрией. Сборки ZPR характеризуются сложной гетерогенной структурой. Между тем, нельзя не обратить внимание на тот факт, что погрешности, приписанные результатам

экспериментов на гетерогенных сборках ZPR, оказались того же порядка и даже ниже, чем погрешности результатов экспериментов с компактными металлическими сферическими системами. Между тем значительные отличия кэфф от единицы для этих систем указывают на внесение в результаты значительных поправок (главным образом, на отличие гомогенизированной бенчмарк-модели от реальной гетерогенной активной зоны). Приписанная результатам погрешность во всех этих сборках определяется погрешностью введенных поправок. Последняя оценивалась как статистическая погрешность результатов расчетов точной модели эксперимента и упрощенной (гомогенной с регулярной границей) методом Монте-Карло по программе VIM. Таким образом, методические погрешности введения поправок не учитывались. Между тем они, несомненно, также имели место, за счет того, например, что в программе VIM, осуществлявшей розыгрыш нейтронных траекторий с детальным слежением за энергией нейтронов, не был предусмотрен учет резонансной самоэкранировки сечений в области неразрешенных резонансов (в отличие от расчетов по программам KENO-V и MCNP-V, в которых этот учет проводился). Таким образом, приведенные в Справочнике (и в нашей таблице) значения «экспериментальных» кэфф содержат неизвестную систематическую погрешность и не могут считаться независимыми результатами.

Из сказанного выше следует, что систематические расхождения порядка 1% между расчетными и экспериментальными значениями кэфф для сборок ZPR не могут служить основанием для критики констант алюминия. Требуется более тщательная оценка экспериментальных погрешностей для этих сборок и глубокий анализ чувствительностей их коэффициентов размножения к константам чтобы решить – могут эти сборки рассматриваться в качестве бенчмарков для верификации констант алюминия или нет.

Из данных таблицы видно, что за время, прошедшее с момента оценки данных для алюминия в JENDL-2.0, оцененные нейтронные данные для алюминия существенно изменились и позволили значительно лучше описать результаты критических экспериментов. При этом оценка JEFF-3.1, отобранная в РОСФОНД исходя из анализа дифференциальных данных, заметно лучше других согласуется и с результатами интегральных экспериментов.

В то же время очевидно, что желательно привлечь к анализу большее число различных интегральных экспериментов (включая результаты измерений пропускания нейтронов через большие толщи алюминия) и более тщательно произвести оценку экспериментов, выполненных на критсборках со сложной гетерогенной структурой.

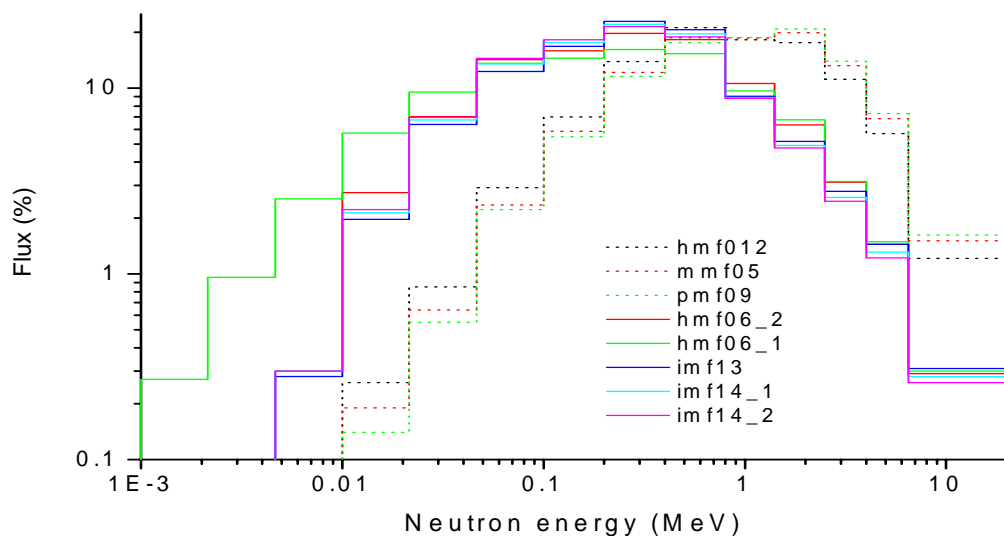


Рис. 23. Нейтронные спектры критическихборок, используемых для валидации файлов оцененных данных

6. Заключение

6.1 Выводы На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что **более достоверной и детальной является оценка ENDF/B-VI.8**. Следует, однако, отметить, что область разрешенных резонансов в самой оценке ENDF/B-VI.8 представлена в виде непрерывных сечений (MF=3). Соответствующие резонансные параметры оценки ENDF/B-VI.8 имеются в файле библиотеки JEFF-3.0 (=JEFF-3.1) с непосредственной ссылкой на ENDF/B-VI.8, как источник данных. Поэтому оценку **ENDF/B-VI.8 следует взять из файлов JEFF-3.0 (=JEFF-3.1)**. В РОСФОНД принят файл данных из JEFF-3.1 со следующими изменениями.

1. Изменен номер файла: MAT=1327.
2. Файл ограничен областью энергий ниже 20 МэВ; данные о реакциях, протекающих при более высоких энергиях, удалены.
3. Удалены данные об образовании радионуклидов – файл MF=8 и MF=9.

6.2. Автор проведенного отбора оцененных данных:

А.В.Игнатюк