

43. ТЕХНЕЦИЙ

Технеций не встречается в природе в чистом виде. Однако имеется шесть долгоживущих (период полураспада более суток) изотопов или изомеров технеция, для которых в библиотеку РОСФОНД должны быть включены нейтронные данные.

43.1. Технеций-95^m

Радиоактивен. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=61$ дн.) в стабильный ⁹⁵Mo.

В ФОНД-2.2 содержится оценка Дж. Копецкого и Д. Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) оценка существенно пересмотрена. Для сечения реакций (n,na), (n,nHe3), (n,He3) и (n,a) в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=9.

На рисунке 1 приведена энергетическая зависимость сечения захвата Tc-95m.

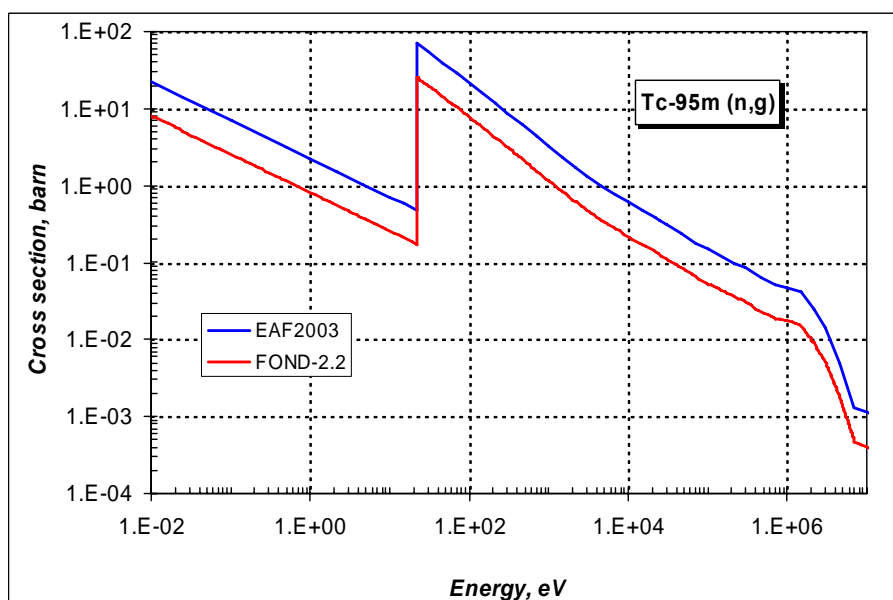


Рисунок 1. Сечение радиационного захвата Tc-95m.

В нижеследующей таблице 1 приведены: сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

Таблица 1 – Сравнение основных нейтронных сечений Tc-95m.

	σ_c , барн (0.0253 эВ)	RI_c , барн	Средние сечения реакций на спектре деления, мбарн			
			n,gamma	n,2n	n,p	n,alpha
EAF-2003	14.1	96.9	40.4	0.791	18.1	0.636
FOND-2.2	5.07	34.9	14.6	0.306	5.62	0.168

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=9 данные об образовании долгоживущих изомеров в реакциях (n,a), (n,na), (n,He3), (n,nHe3). Сечение образования основного состояния перенести из файла MF=3 в файл MF=10.

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

43.2. Технеций-96

Долгоживущий изотоп. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=4.28$ дн.) в стабильный ^{96}Mo .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) оценка существенно пересмотрена. Сечения реакций (n,2n), (n,a), (n,na), (n,g), (n,nHe3) и (n,2p), в которых образуются долгоживущие изомеры, представлены в файле MF=9.

На рисунке 2 приведена энергетическая зависимость сечения захвата Тс-96.

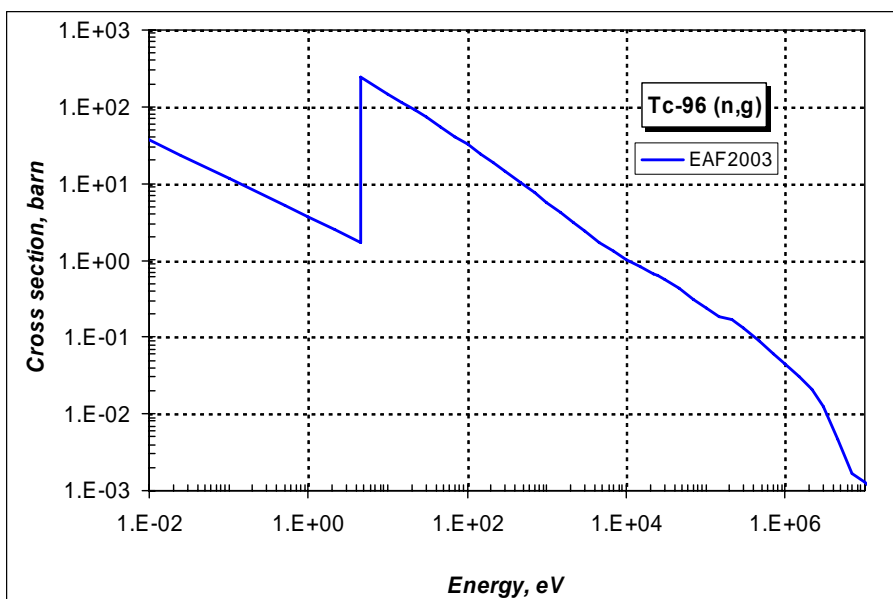


Рисунок 2. Сечение радиационного захвата Тс-96

В таблице 2 сравниваются сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

Таблица 2 – Сравнение основных нейтронных сечений Тс-96.

	σ_c , барн (0.0253 эВ)	RI_c , барн	Средние сечения реакций на спектре деления, мбарн			
			n,gamma	n,2n	n,p	n,alpha
EAF-2003	23.5	374.4	46.8	2.58	2.00	0.320
FOND-2.2	-	-	-	3.62	-	-

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=9 данные об образовании долгоживущих изомеров в реакциях (n,2n), (n,a), (n,na), (n,g), (n,nHe3) и (n,2p).

Автор отбора данных
Кощеев В.Н.

43.3. Технеций-97^g

Радиоактивен. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=4.21 \cdot 10^6$ г.) в стабильный ⁹⁷Mo.

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=9.

На рисунке 3 приведена энергетическая зависимость сечения радиационного захвата.

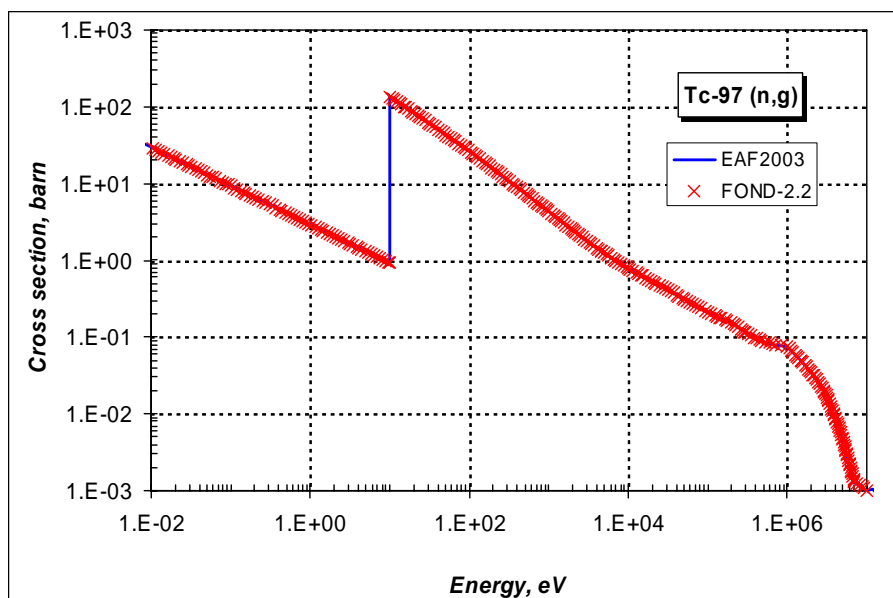


Рисунок 3. Сечение радиационного захвата Tc-97^g.

Как видно из рисунка 3, сечение захвата в новой оценке не изменилось.

В таблице 3 приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER. Как видно, сечения пороговых реакций пересмотрены.

Таблица 3 – Сравнение основных нейтронных сечений Tc-97.

	σ_c , барн (0.0253 эВ)	RI_c , барн	Средние сечения реакций на спектре деления, мбарн			
			n,gamma	n,2n	n,p	n,alpha
EAF-2003	18.47	194.5	55.5	1.22	0.548	0.068
FOND-2.2	18.47	194.5	55.5	1.29	1.32	0.088

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=9 данные об образовании долгоживущих изомеров в реакциях (n,3n), (n,a), (n,pa), (n,t) и (n,n').

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

43.4. Технеций-97^m

Долгоживущий изомер. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=91.4$ дн.) в стабильный ^{97}Mo .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=9.

На рисунке 4 приведена энергетическая зависимость сечения радиационного захвата.

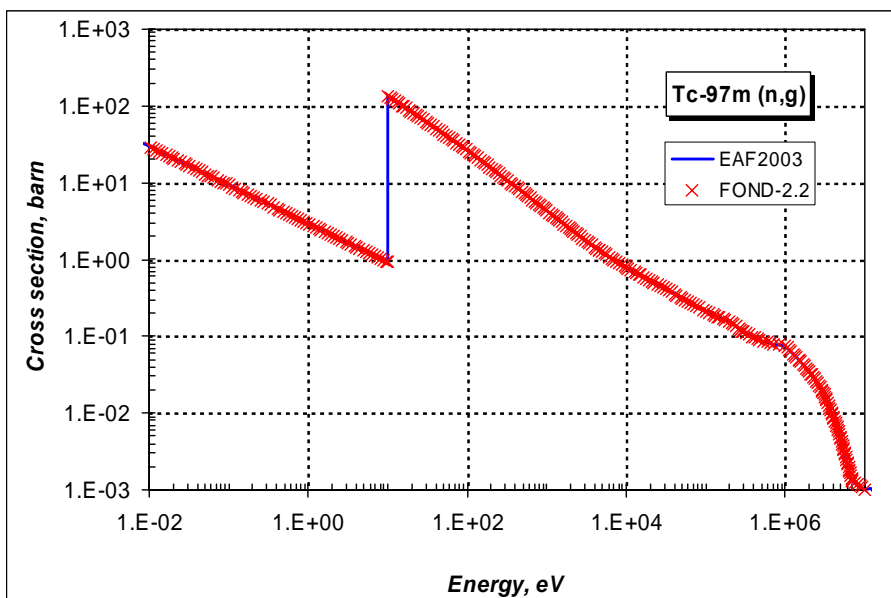


Рисунок 4. Сечение радиационного захвата Tc-97m.

Как видно из рисунка 4, сечение захвата в новой оценке не изменилось.

В таблице 4 приводятся (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

Таблица 4 – Сравнение основных нейтронных сечений Tc-97m.

	σ_c , барн (0.0253 эВ)	RI_c , барн	Средние сечения реакций на спектре деления, мбарн			
			n,gamma	n,2n	n,p	n,alpha
EAF-2003	18.47	194.5	55.5	1.38	0.98	0.080
FOND-2.2	18.47	194.5	55.5	0.36	1.32	0.027

Как видно из таблицы 4, сечения пороговых реакций пересмотрены. Ясно, что надежность оцененных данных для рассматриваемых нейтронно-дефицитных нуклидов невысока.

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=9 данные об образовании долгоживущих изомеров в реакциях (n,3n), (n,a), (n,t) и (n,na). Сечение образования основного состояния перенести из файла MF=3 в файл MF=10.

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

43.5. Технеций-98

Радиоактивен. Испытывает бета-распад ($T_{1/2}=4.2 \cdot 10^6$ г.) в стабильный ^{98}Ru .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=9.

На рисунке 5 приведена энергетическая зависимость сечения радиационного захвата.

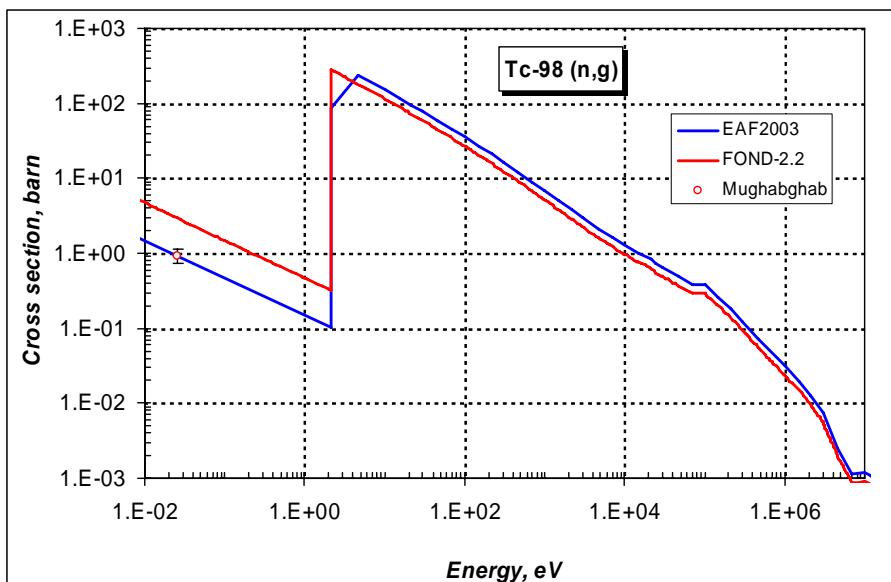


Рисунок 5. Сечение радиационного захвата Тс-98.

Как видно из рисунка 5, сечение захвата в новой оценке откорректировано на значение, рекомендованное в компиляции Мухабхаба.

В таблице 5 приводятся (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

Таблица 5 – Сравнение основных нейтронных сечений Тс-98.

	σ_c , барн (0.0253 эВ)	RI_c , барн	Средние сечения реакций на спектре деления, мбарн			
			n,gamma	n,2n	n,p	n,alpha
EAF-2003	0.930	497.7	41.7	6.65	0.094	0.070
FOND-2.2	2.95	465.2	31.7	5.31	1.95	0.091

Как видно из таблицы 5, сечения всех реакций пересмотрены значительно.

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=9 данные об образовании долгоживущих изомеров в реакциях (n,2n), (n,a) и (n,nHe3).

Автор отбора данных

Кощеев В.Н.

43.6. Технеций-99

Радиоактивен. Испытывает бета-распад ($T_{1/2}=2.111 \cdot 10^5$ г.) в стабильный ^{99}Ru .

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных фигурируют три различных оценки:

- 1) P. Oblozinsky et al, оценка выполнена в 2005 г. и содержится в библиотеке ENDF/B-VIIb2.
- 2) F. Gunsing, P. Serot, A. Koning, оценка выполнена в 2005 г для JEFF-3.1.
- 3) T. Nakagawa et al, 1990 с пересмотром резонансных параметров и добавлением данных об образовании фотонов в нейтронных реакциях в 2002 г. Содержится в JENDL-3.3.

1. Резонансная область

1.1. Область разрешенных резонансов.

Область разрешенных резонансов описывается во всех трех оценках. В таблице 6 приведены характеристики этой области.

Таблица 6 - Область разрешенных резонансов для Tc-99.

Оценка	Е гран., эВ	Число s- рез.-ов.		Еmax, эВ	Число p-рез.-ов.				Еmax, эВ	Сумма s + p
Oblozinsky et al	6370	276		6337.4	262				6366.5	538
		$J=4$	$J=5$		$J=3$	$J=4$	$J=5$	$J=6$		
		128	148		43	58	84	77		
Gunsing et al.	6000	539		11017.3	142				8266.1	681
		$J=4$	$J=5$		$J=3$	$J=4$	$J=5$	$J=6$		
		235	304		29	31	41	41		
Nakagawa et al	6000	518		10018.7	142				8266.1	660
		$J=4$	$J=5$		$J=3$	$J=4$	$J=5$	$J=6$		
		227	291		27	33	44	38		

Как видно из таблицы 6, числа рассмотренных в оценках резонансов близки, однако, в определении четностей и спинов резонансов имеются существенные различия. Имеются различия и в принимаемых нейтронных и радиационных ширинах

Сравним теперь энергетические зависимости плотностей уровней, следующие из рассматриваемых оценок. Разделим интервал от 0 до 6 кэВ на две равные части и сравним числа s- и p-резонансов в каждой из них (см. табл.7).

Таблица 7. Сравнение чисел резонансов в равных соседних интервалах энергии

Оценка	Сумма (s- + p-)	Число s- резонансов.		Число p- резонансов	
		От 0 до 3.0 кэВ	От 3.0 до 6 кэВ	От 0 3.0 кэВ	От 3.0 до 6 кэВ
Oblozinsky et al.	519	143	124	151	101
Gunsing et al.	486	185	171	104	26
Nakagawa et al.	485	190	168	98	29

Из приведенной в таблицах 6 и 7 информации следует, что более корректной в резонансной области энергий является оценка Облозинского и др.

Сравнение значений сечения в тепловой точке и резонансного интеграла, полученных с помощью программы INTER приводится в таблице 8.

Таблица 8 – Сравнение резонансных свойств сечения захвата Тс-99.

	σ_c , барн (0.0253 эВ)	RI_c , барн
Oblozinsky et al.	22.80	361.3
Gunsing et al.	22.82	322.6
Nakagawa et al.	22.77	323.0
Мухабхаб	20±1	320±20

Как видно из таблицы 8, сечение радиационного захвата во всех оценках согласуется между собой и ориентировано на последние измерения сечения в тепловой точке, выполненные группой K.Furutaka et al., доложенные на конференции в Санта Фе в 2004 г. (22.8±1.8 барн).

Отметим, что резонансный интеграл в оценке ENDF/B сильно завышен. Такое расхождение вызвано сильными различиями в оценке резонансных ширин для первого резонансного уровня и псевдоуровня при отрицательной энергии.

1.2. Область неразрешенных резонансов

Область неразрешенных резонансов простирается

в оценке ENDF/B-VII до 141.9 кэВ;

в оценке JEFF-3.1 и JENDL-3.3 – до 100 кэВ.

Чтобы сделать заключение о преимуществе той или иной оценки сравним сечения, полученные с помощью средних резонансных параметров с имеющимися экспериментальными данными.

На рисунках 6 и 7 в области энергий до 100 кэВ сравниваются оцененные полное сечение и сечение захвата с имеющимися экспериментальными данными.

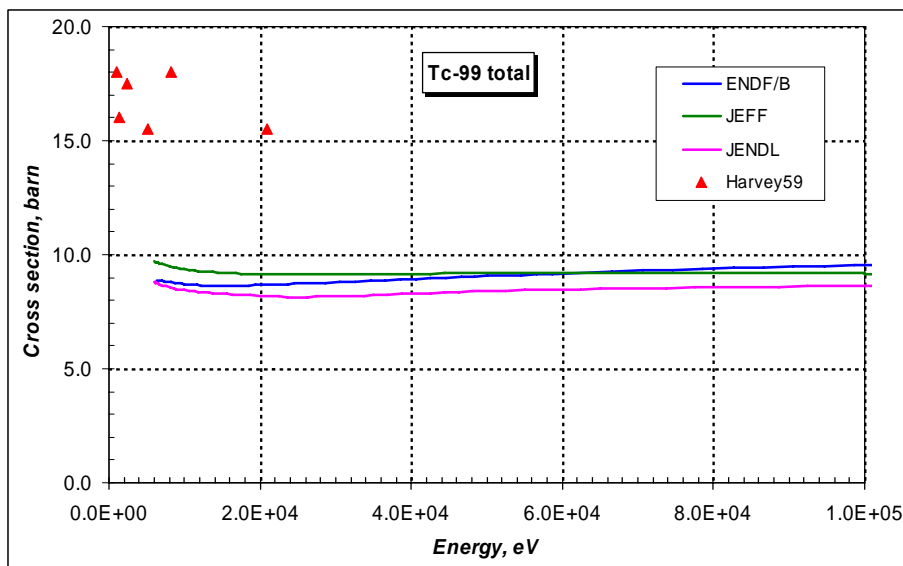


Рисунок 6. Полное сечение Тс-99 в области неразрешенных резонансов

Из приведенного на рисунке 6 сравнения полного сечения видно, что экспериментальные данные Харви не согласуются с оцененными значениями сечения. Из приведенного в информационной секции (MT=451) пояснения к оценке JEFF-3.1 следует, что в этой области авторы оценки ориентировались на свои экспериментальные данные по полному сечению, которые нам оказались недоступны. Информация в графическом виде об этом была опубликована в трудах конференции в Тсукобо (2001г).

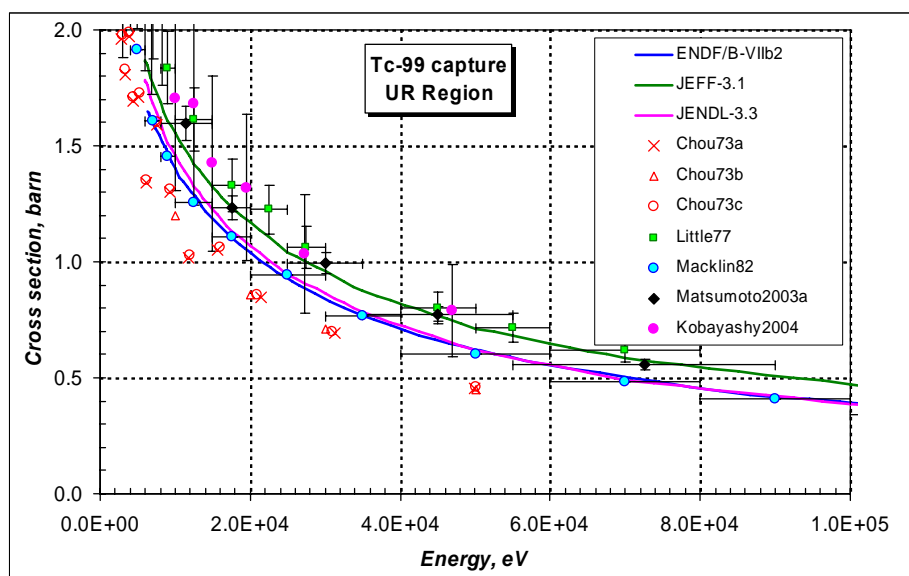


Рисунок 7. Сечение радиационного захвата Тс-99 в области неразрешенных резонансов.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения сечения радиационного захвата видно, что в этой области существуют три совокупности экспериментальных данных. Первая из них – это эксперименты, выполненные группой Чо в 1973 году. Они являются самыми низкими по значениям. Во второй группе находится один эксперимент Маклина, выполненный в 1982 году. На эксперимент Маклина ориентированы оценки сечений в библиотеках ENDF/B-VII и JENDL-3.3. В третьей группе находится эксперимент Литтла (1972 г.). Значения его являются самыми высокими, однако в последние годы они получили подтверждение. Так появились экспериментальные данные группы Мацумото и др. (2002 г.), Кобаяши и др. (2004), которые хорошо согласуются с данными Литтла. На эту группу экспериментальных данных ориентирована оценка Гасинга и др. (JEFF-3.1). Отметим также, что в более высокой области энергий (выше 200 кэВ) экспериментальные данные Мацумото хорошо согласуются с данными Маклина.

Подводя итог рассмотрению оцененных данных в резонансной области, приходим к заключению, что из трех сравниваемых оценок в области разрешенных резонансов целесообразно принять оценку Облозинского (ENDF/B-VII), откорректировав резонансные параметры двух первых уровней для уменьшения резонансного интеграла. А в области неразрешенных резонансов следует принять оценку Гасинга (JEFF-3.1).

2. Сечения вне резонансной области.

2.1. Полное сечение.

Оценки полного сечения вне резонансной области сравниваются друг с другом и с экспериментальными данными на рисунке 8.

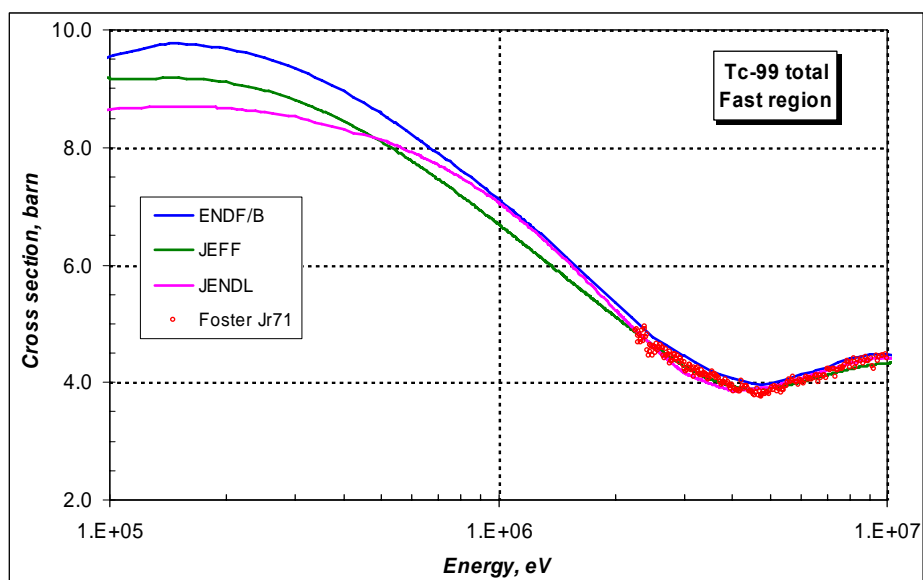


Рисунок 8. Полное сечение Тс-99 вне резонансной области

Из приведенного на рисунке 8 сравнения видно, что в области энергий выше 1 МэВ все оценки хорошо согласуются друг с другом, особенно там, где имеются экспериментальные данные Фостера (1971), выполненные с хорошим разрешением.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку полного сечения из JEFF-3.1.

2.2. Сечение радиационного захвата

Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Тс-99 вне резонансной области с экспериментальными данными показано на рисунке 9.

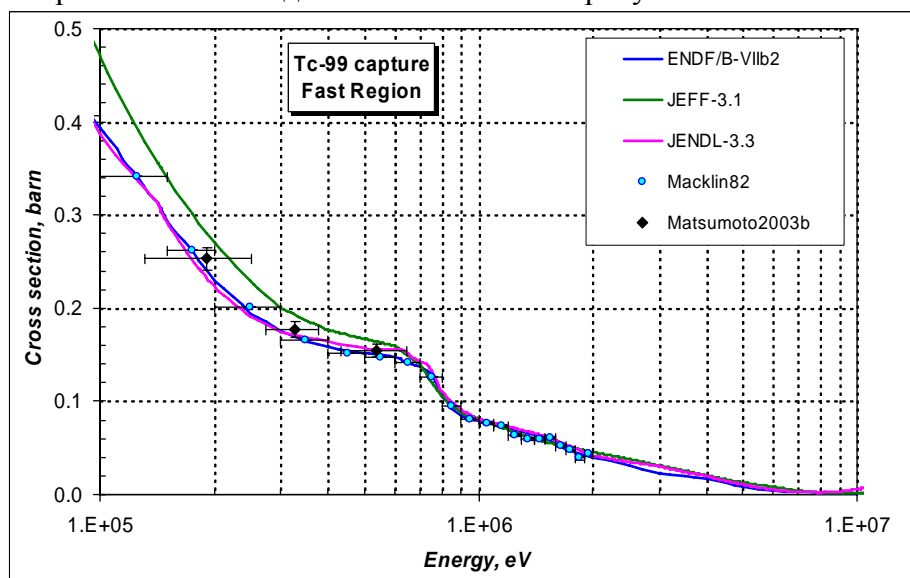


Рисунок 9. Сечение радиационного захвата Тс-99 в области энергий до 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке 9 сравнения видно, что в области энергий выше 600 кэВ оцененные сечения согласуются между собой и экспериментальными данными Маклина (1972 г.) и Мацумото (2003 г.). В области энергий от 100 до 600 кэВ предпочтение следует отдать оценке Гансинга, поскольку форма кривой JEFF из высокой области энергий согласована с формой кривой в области неразрешенных резонансов.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку сечения радиационного захвата из JEFF-3.1.

2.3. Сечение неупругого рассеяния.

На рисунке 10 оценки сечения суммарного неупругого рассеяния сравниваются с экспериментальными данными.

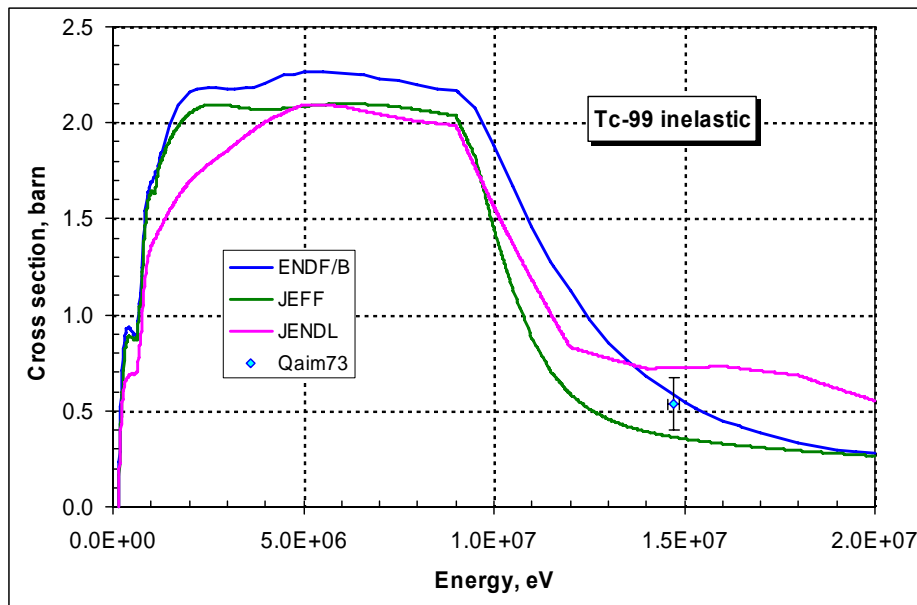


Рисунок 10. Сечение неупругого рассеяния нейтронов Тс-99.

Оценки хорошо согласуются друг с другом и более или менее согласуются с единственным экспериментом при 14.7 МэВ.

Число индивидуальных уровней, учитывающихся в теоретических расчетах неупругих процессов на Тс-99, примерно одинаково и составляет ~ 70.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД для сечений неупругого рассеяния оценку в ENDF/B-VII.

2.4. Сечения реакций (n,2n) и (n,3n)

Реакция (n,2n) имеет порог 9.06 МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рисунке 11. Они близки друг к другу и подтверждаются экспериментальными данными в равной степени.

На этом же рисунке приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,3n). Они также близки друг к другу, согласуясь по значениям и форме с сечениями реакции (n,2n). Экспериментальные данные отсутствуют.

Поскольку в результате реакции (n,3n) образуется долгоживущий изомер Тс-97m ($T_{1/2}=91.4$ д.) то целесообразно включить в файл данные о вероятности образования этого долгоживущего изомера. Их можно взять из библиотеки EAF-2003.

В РОСФОНД рекомендуется оценка ENDF/B-VII.

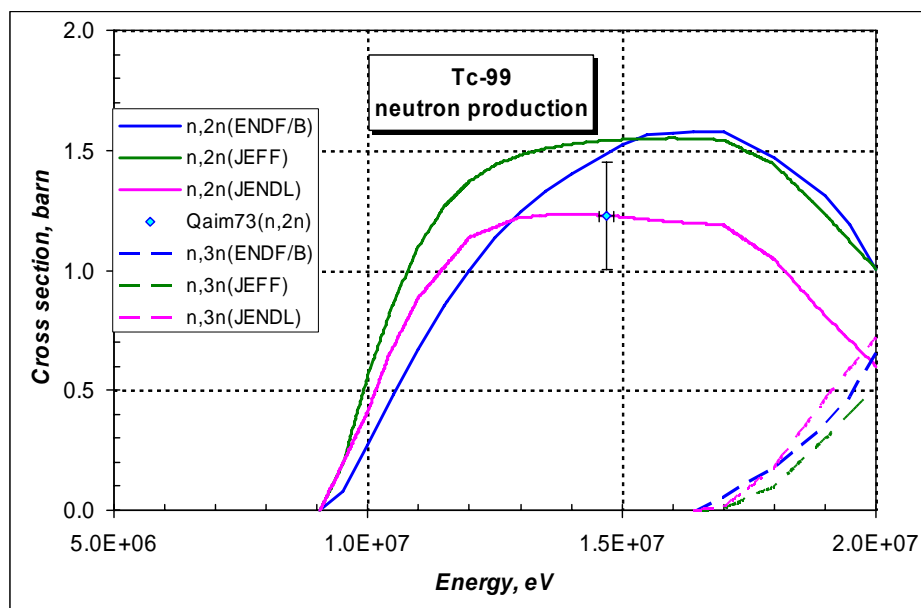


Рис.11. Сечение реакции (n,2n).

2.5. Сечения реакций (n,p).

Реакция (n,p) имеет порог 1.007 МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рисунке 12. Там же приводятся и имеющиеся экспериментальные данные.

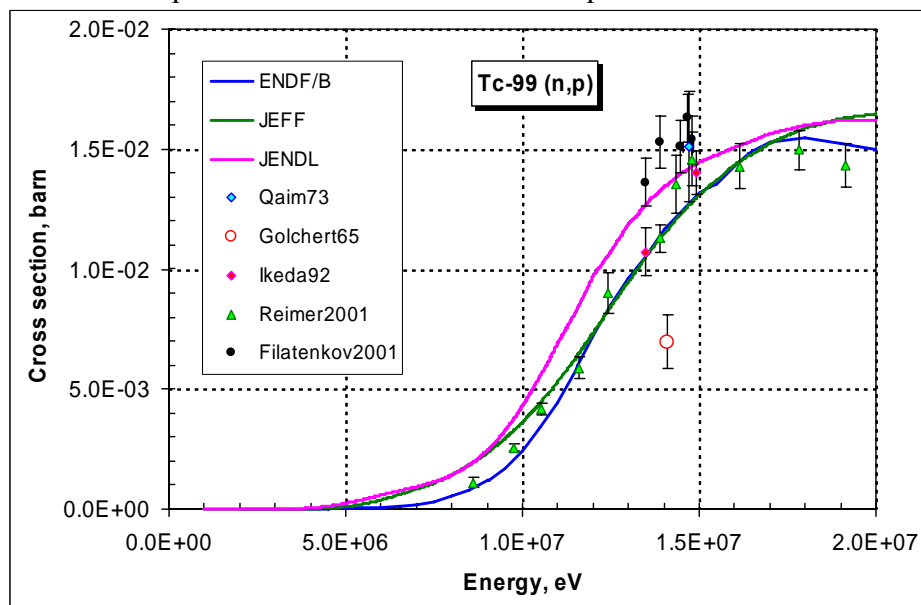


Рисунок 12. Сечение реакций (n,p) на Тс-99.

Из приведенного на рисунке 12 сравнения видно, что наилучшим образом с экспериментальными данными согласуется оценка ENDF/B-VII. Оценка JEF-3.1 так же неплохо описывает экспериментальные данные. Оценка JENDL-3.3 завышает сечение реакции ориентируясь на эксперимент Qaim (1973 г.).

В РОСФОНД рекомендуются оценки ENDF/B-VII.

2.6. Сечения реакций (n,a) и (n,na).

Реакция(n,a) теоретически не имеет порога реакции, однако заметной она становится при энергиях выше 5. МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рисунке 13 вместе с имеющимися экспериментальными данными. Здесь наблюдается ситуация аналогичная ситуации с сечением реакции (n,p).

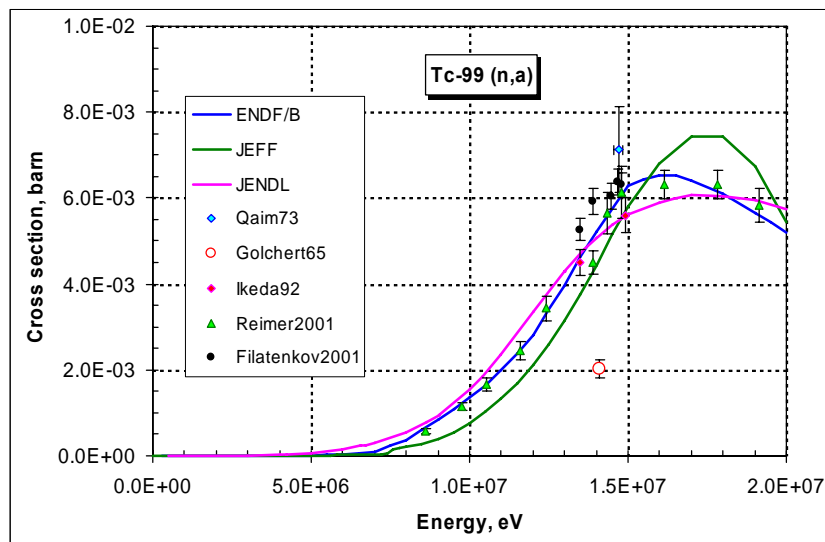


Рисунок 13. Сечение реакции (n,a) на Тс-99.

В РОСФОНД рекомендуется оценка ENDF/B-VII.

Реакция(n,na) имеет порог 2.996 МэВ, однако заметной она становится при энергии ~ 13 МэВ. В результате этой реакции может образовываться долгоживущий изотоп Nb-95m ($T_{1/2}=86.6$ ч.). Оцененные сечения этой реакции из библиотек общего пользования приведены на рисунке 14 вместе с экспериментальными данными.

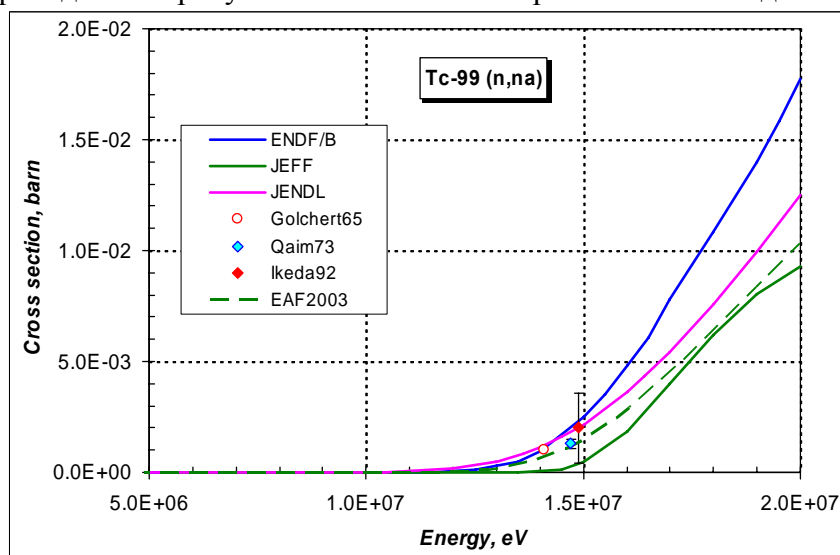


Рисунок 14. Сечение реакции (n,na) на Тс-99.

Из приведенного на рисунке 14 сравнения видно, что наиболее оптимальной является оценка JENDL и EAF. В то время, как оценка ENDF/B представляется завышенной в области энергий выше 15 МэВ, а в оценка JEFF явно занижена вблизи порога реакции. Для этой реакции следует добавить данные об вероятности образования долгоживущего изомера Nb95m.

В РОСФОНД следует включить оценку сечения реакции (n, na) из библиотеки EAF2003. Оттуда же целесообразно использовать данные о вероятности образования долгоживущего изомера $Nb95m$.

2.7. Сечение упругого рассеяния

Как и в других оценках, сечение упругого рассеяния в РОСФОНДе рекомендуется получить из условия баланса.

3. Данные об угловых распределениях

Поскольку, большая часть данных о сечениях нейтронных реакций для РОСФОНДА рекомендуется из оценки ENDF/B-VII, то целесообразно и данные об угловых распределениях использовать из тех же источников.

4. Данные об энерго-угловых распределениях

Поскольку, большая часть данных о сечениях нейтронных реакций для РОСФОНДА рекомендуется из оценки ENDF/B-VII, то целесообразно и данные об энерго-угловых распределениях использовать из тех же источников.

5. Данные о гамма-квантах, образующихся в нейтронных реакциях.

Поскольку, большая часть нейтронных данных для РОСФОНДА рекомендуется из оценки ENDF/B-VII, то целесообразно и данные о гамма-квантах, образующихся в нейтронных реакциях использовать из ENDF/B-VII.

6. Заключение

Файл оцененных нейтронных данных для библиотеки РОСФОНД строится на основе файла из библиотеки ENDF/B-VII со следующими изменениями

1. В области разрешенных резонансов устранить расхождение в резонансном интеграле за счет изменения значений резонансных параметров для первых резонансных уровней (см. раздел 1.1).
2. В области неразрешенных резонансов принять оценку Гансинга (см. раздел 1.2).
3. Вне резонансной области полное сечение и сечения радиационного захвата принять из JEF-3.1 (см. раздел 2.1 и 2.2).
4. Сечение реакции ($n, n'\alpha$) взять из EAF-2003 для согласия с данными о вероятности образования долгоживущего изомера $Nm95m$. (см. раздел 2.6).
5. Ввести файл MF=9 с данными о сечениях образования долгоживущих изомеров в реакциях ($n, 3n$) и (n, na) взяв информацию из EAF-2003.

Автор отбора данных:

Кошечев В.Н.