

74.ВОЛЬФРАМ

Ниже будут рассмотрены оценки нейтронных данных для 5 долгоживущих ($T_{1/2}$ более суток) и 5 стабильных изотопов вольфрама.

74.1. Вольфрам-178

Радиоактивен. Спин и четность 1^+ . Испытывая захват орбитального электрона ($T_{1/2} = 21.6$ дн.) превращается в изомер $^{178}\text{Ta}^m$, который с периодом 9.31 мин. распадается в стабильный $^{178}\text{Hf}^1$. В реакторе этот изотоп может быть образован в реакции $^{180}\text{W}(n,3n)$. Полных оценок нейтронных данных для ^{178}W неизвестно. Оценка сечений нейтронных реакций, основанная на теоретических расчетах и полуэмпирических систематиках, содержится в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из последней версии библиотеки EAF – EAF-2003. Сечения образования конечных ядер в основном и изомерном состояниях в реакциях (n,p) и $(n,2p)$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

74.2. Вольфрам-180

Содержание в естественной смеси 0.12%. Спин и четность – 0^+ . Полных наборов оцененных нейтронных данных нет ни в одной библиотеке не содержится. В EAF-2003 приведены энергетические зависимости сечений реакций, отличных от рассеяния. В ФОНД-2.2 содержится только секция параметров разрешенных резонансов (9 резонансов с максимальной энергией 614 эВ; область разрешенных резонансов распространена до 215 эВ). Г.Н. Мантуров по программе EVPAR подобрал средние резонансные параметры, описывающие экспериментальные данные Кононова-87 по полному сечению и Боховко-86 по сечению захвата (см. рис. 1 и 2). Никаких иных данных по полному сечению не имеется, а что касается сечения захвата, то существует лишь результат измерения при тепловой энергии, полученный в 1952 г. с погрешностью более 100%.

¹ Является ли состояние гафния, образующееся при распаде вольфрама-178, изомерным ($I=7^-$) или основным ($I=1^+$) достоверно неизвестно.

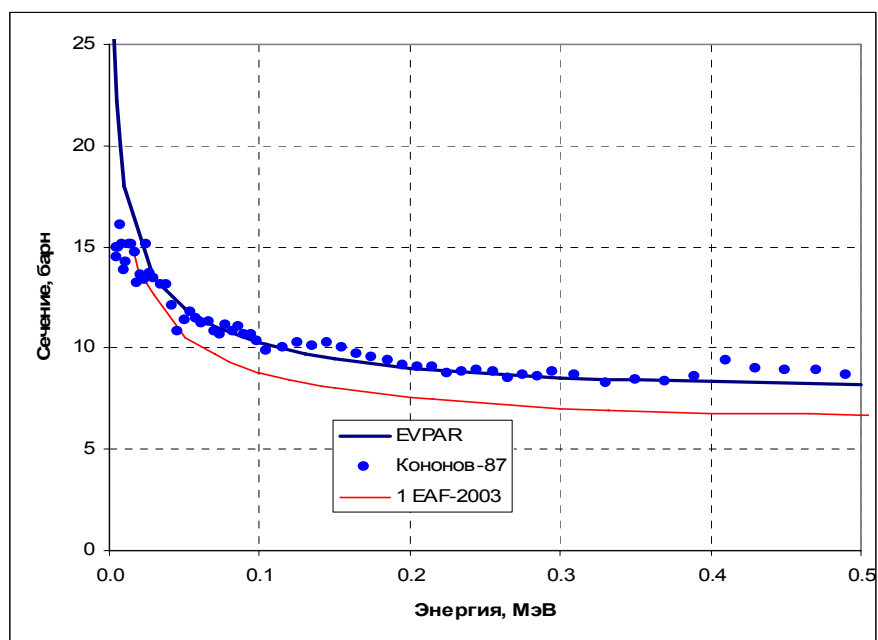


Рис. 1. Полное сечение.

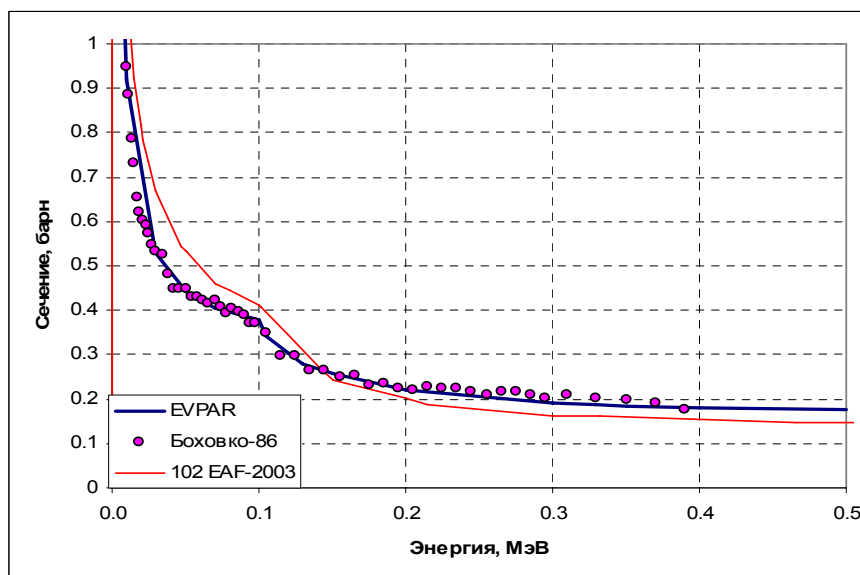


Рис.2. Сечение захвата.

Заключение.

Целесообразно создать для РОСФОНДа полный файл оцененных нейтронных данных для вольфрама-180 используя имеющиеся оценки в резонансной области энергий и близость свойств ^{180}W и ^{182}W :

1. Параметры разрешенных резонансов принять в соответствии с оценкой Л.П.Абагян (ФОНД-2.2), дополнив их связанным состоянием, оцененным Мухабхабом. Границу области разрешенных резонансов установить при 500 эВ.

2. Средние параметры неразрешенных резонансов принять в соответствии с оценкой Г.Н.Мантурова. Границу области неразрешенных резонансов принять равной 100 кэВ.

3. Сечения всех реакций вне резонансной области, принять на основе файла для вольфрама-182, внеся в них следующие изменения.

- (а) Полное сечение в интервале от 2 МэВ до 100 кэВ плавно увеличить от 0 до 18% для обеспечения стыковки с расчетом по резонансным параметрам при 100 кэВ.

(б) Сечение радиационного захвата модифицировать аналогичным образом для обеспечения стыковки при 100 кэВ.

(с) Энергии пороговых реакций принять равными тем, что указаны в EAF-2003.

В сечения неупругого рассеяния никаких изменений не вводить, поскольку схемы уровней ^{180}W и ^{182}W достаточно близки друг к другу.

Все угловые и энерго-угловые распределения, а также данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях принять такими, как для вольфрама-182, внося коррективы лишь на различие порогов реакций.

Ввести файл MF=9 с секцией MT=103, содержащей вероятности образования тантала-180 в основном (короткоживущем) и изомерном (долгоживущем) состояниях на основе данных EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

74.3. Вольфрам-181

Радиоактивен. Спин и четность $9/2^+$. Испытывая захват орбитального электрона ($T_{1/2} = 21.6$ дн.) превращается в стабильный ^{181}Ta . В реакторе этот изотоп может быть образован в реакции $^{180}\text{W}(n,\gamma)$ и $^{180}\text{W}(n,2n)$. Полных оценок нейтронных данных для ^{181}W неизвестно. Оценка сечений нейтронных реакций, основанная на теоретических расчетах и полуэмпирических систематиках, содержится в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из последней версии библиотеки EAF – EAF-2003. Сечения образования конечных ядер в основном и изомерном состояниях в реакциях $(n,3n)$, $(n,n'\alpha)$, $(n,n'p)$, $(n,n't)$, (n,d) , $(n,^3\text{He})$ и (n,α) , содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=10 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях (n,α) , $(n,^3\text{He})$, а также (n,d) и $(n,n'p)$, получив их из данных о сечениях из MF=10. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

74.4. Вольфрам-182

Содержание в естественной смеси 26.50%. Спин и четность – 0^+ . Достаточно полные наборы независимо оцененных данных содержатся:

в ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Ottewite, Rose and Young из ENDF/B-IV, с пересмотренной в 1983 г. резонансной областью – разрешенные резонансы оценены Л.П.Абагян, средние резонансные параметры подобраны Г.Н.Мантуровым для описания данных по сечению захвата и полному сечению;

в ENDF/B-VIIb2 – оценка Chadwick, Young and Arthur 1996 г.;

в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 – оценка Watanabe and Asami 1983 г.

1. Тепловая область и область разрешенных резонансов.

В таблице 1 сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы, рассчитанные на основе перечисленных выше оценок². Там же приведены данные, рекомендованные Мухабхабом.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл.

	$\sigma_{\text{tot}}(0.0253 \text{ eV})$	$\sigma_{\text{el}}(0.0253 \text{ eV})$	$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$	RI_c	
ENDF/B-VII	32.403	11.857	20.546		596.822
FOND-2.2	25.481	4.474	21.007		601.957
JEFF-3.1	29.579	8.869	20.710		627.965
Мухабхаб		8.840	19.900		604.000
		± 0.300	± 0.200		± 60.000

Как видно, по параметрам, приведенным в таблице, с рекомендацией Мухабхаба лучше всего согласуется оценка JEFF-3.1 (-JENDL-3.3).

Область разрешенных резонансов в рассматриваемых оценках описывается по-разному. В FOND-2.2 даны параметры 159 s-резонанса и 3 p-резонансов; максимальная резонансная энергия- 13253 эВ, однако область разрешенных резонансов распространена только до 4650 эВ (за ней начинается область неразрешенных резонансов). Ниже энергии 1-го резонанса сечения в этой оценке заданы поточечно.

В ENDF/B-VII приводятся параметры только 69 резонансов, максимальная резонансная энергия – 4492 эВ. Область разрешенных резонансов простирается до 4500 эВ, после чего следует область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 приводятся параметры 144 резонансов, максимальная энергия – 13253 эВ (как и в ФОНДе, где, однако, ниже этой энергии описано на 15 s-резонансов, а всего на 18 резонансов больше). Область разрешенных резонансов распространена до 12 кэВ; область неразрешенных резонансов отсутствует.

На рис. 1. приведена нарастающая сумма числа s-резонансов. Здесь рассматриваются только оценки из ФОНД-2.2 и JEFF-3.1, поскольку в ENDF/B-VII описано слишком мало резонансов.

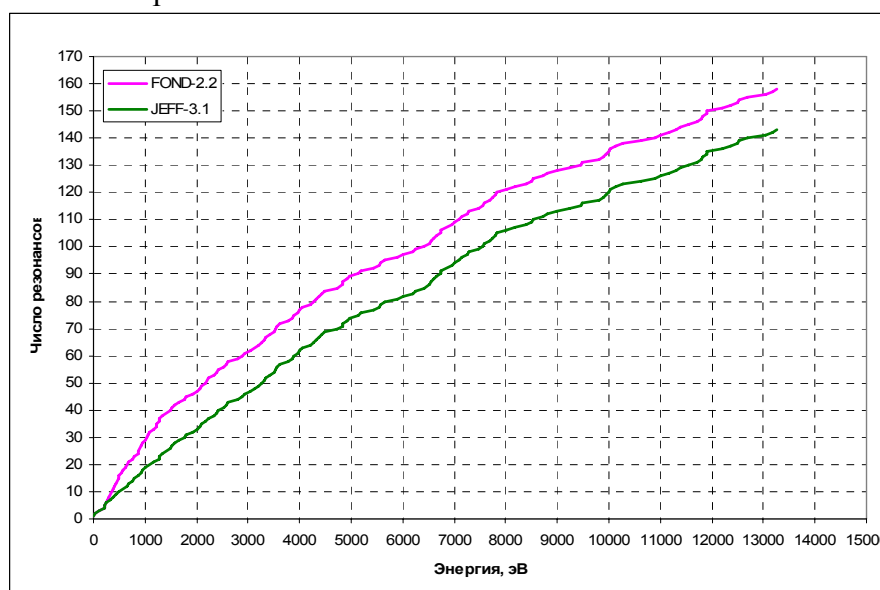


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

² Для этой цели по программе NJOY рассчитывался детальный ход сечений в резонансной области и затем с помощью программы INTER рассчитывались нужные величины.

Различие в числе резонансов накопилось уже на первом-втором килоэлектронвольте и далее не меняется. По оценке Абагян пропуск уровней становится существенным начиная с 1 кэВ. В JEFF-3.1 пропуск намечается только с 5 кэВ.

На рис. 2. приведены нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин. Как видно, до 5500 эВ эти суммы почти совпадают, т.е. различие в числе низколежащих резонансов обусловлено резонансами с малыми ширинами.

Эта сумма нарастает практически линейно до 5.5 кэВ, т.е. все пропущенные имели малые ширины, что позволяет, видимо, распространить область разрешенных резонансов до 5 кэВ. В то же время, видно, что пропуск резонансов до 12 кэВ, существенен и обоснованность распространения области разрешенных резонансов до столь высокой энергии, как это сделано в JENDL-3.3 (и JEFF-3.1), представляется сомнительной.

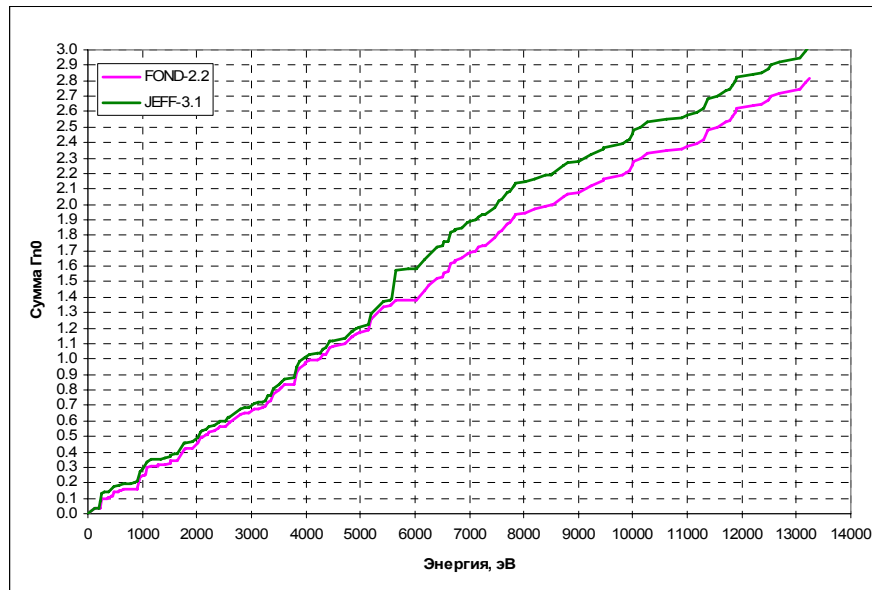


Рис. 2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин.

Сравним распределение приведенных нейтронных ширин с теоретически ожидаемым распределением Портера –Томаса. . Сравнение удобно проводить сравнивая число резонансов, попавших в 10-процентные квантили. Такое сравнение проводится на рис. 3 для различных рассматриваемых энергетических областей. В каждом из интервалов средняя приведенная ширина выбиралась такой, чтобы в верхних квантилях, где пропуск маловероятен, отклонения наблюдаемых чисел резонансов от статистически ожидаемых имели бы разные знаки и не превосходили бы существенно статистически ожидаемые.

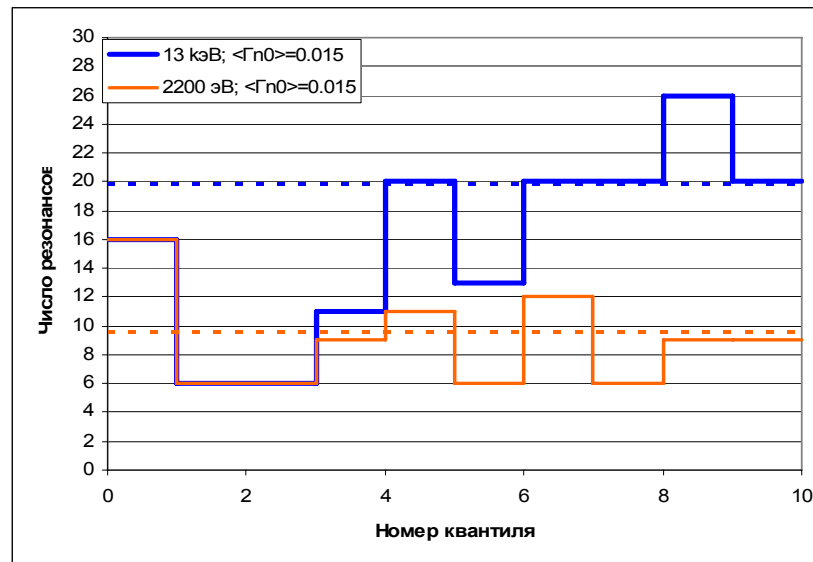


Рис.3. Распределение приведенных нейтронных ширин s-резонансов по квантилям распределения Портера-Томаса.

Средняя приведенная нейтронная ширина принималась одной и той же и в широком и в узком интервалах. Видно, что число резонансов, попавших в нижние три квантиля, при расширении интервала не изменилось: все эти резонансы лежат при низких энергиях. Соответственно доля резонансов, попавших в нижние квантили с расширением интервала сократилась, что и указывает на наличие пропуска: ожидаемое число резонансов в области до 13 кэВ около 200. Создается впечатление, что резонансы, попавшие в первый квантиль – это достаточно широкие р-резонансы, а s-резонансы пропущены. Ширины трех резонансов, принятых в оценке Абагян за р-резонансы, настолько малы, что если их рассматривать как s-резонансы, то они попадут в первый квантиль, увеличив полное число попавших в него резонансов до 20. Как бы то ни было, из рис. 3 видно, что в области до 5 кэВ пропущены только узкие резонансы, которые не могут дать в нейтронные сечения большого вклада. Исходя из изложенного представляется целесообразным **включить в РОСФОНД резонансные параметры из оценки Л.П.Абагян, как наиболее полной, но расширить область разрешенных резонансов до 5кэВ.**

2. Область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 (=JENDL-3.3) область неразрешенных резонансов, как говорилось выше, не описывается; в ENDF/B-VII и в FOND-2.2 она простирается до 100 кэВ (т.е. практически до порога неупругого рассеяния, 100.6 кэВ), причем приводимые параметры рекомендуются не только для расчета резонансной самоэкранировки, но и самих сечений. В обеих оценках сечения описываются с учетом вкладов s-, р- и d –волн. Никаких плавных подложек к сечениям нет.

Сравнение средних параметров, подобранных для описания измеренных сечений, для выбора оценки смысла, видимо, нет. Сравним результаты расчетов, выполненных на основе этих параметров, с помощью программы NJOY, с экспериментальными данными в интересующей нас области энергий.

На рис. 4. оцененные данные по сечению захвата сравниваются с экспериментальными. Пунктиром проведены результаты расчетов по средним резонансным параметрам. В свете всей совокупности экспериментальных данных оценка, принятая в ENDF/B-VII, представляется заниженной, а оценка, принятая в JEFF-3.1 – заниженной. В ФОНД-2.2 включена оценка, выполненная с учетом всего набора имеющихся экспериментов, с точки зрения качества описания сечения захвата она, очевидно, предпочтительнее.

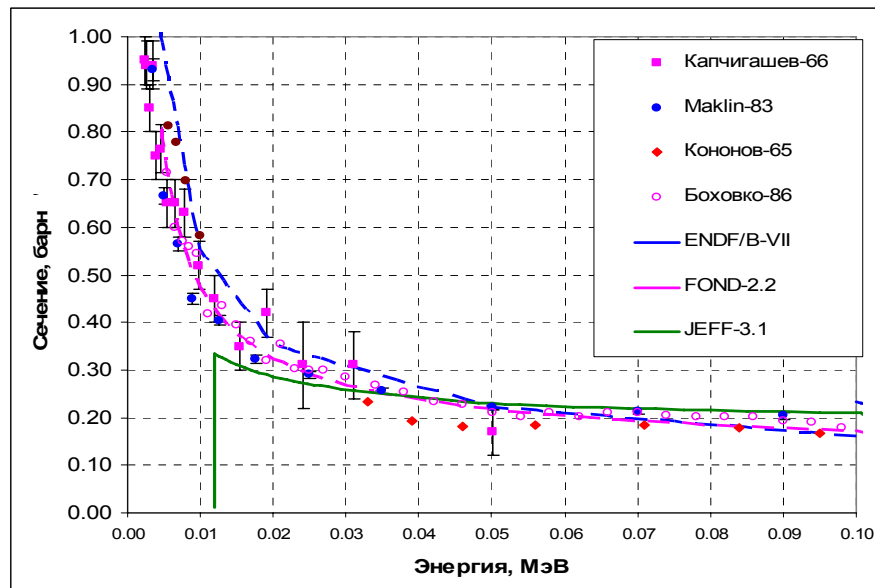


Рис.4. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов.

На рис. 5 проводится сравнение оцененных и измеренных данных по полному сечению. Экспериментальная информация весьма скудна. Данные Кононова в EXFORe приводятся в виде пропусканий T через образец толщиной $n=0.0431$ ядер/барн и приведенные здесь сечения получены как $-\ln(T)/n$, т.е. при низких энергиях данные занижены за счет самоэкранировки. При энергиях выше 60 кэВ эти искажения становятся несущественными.

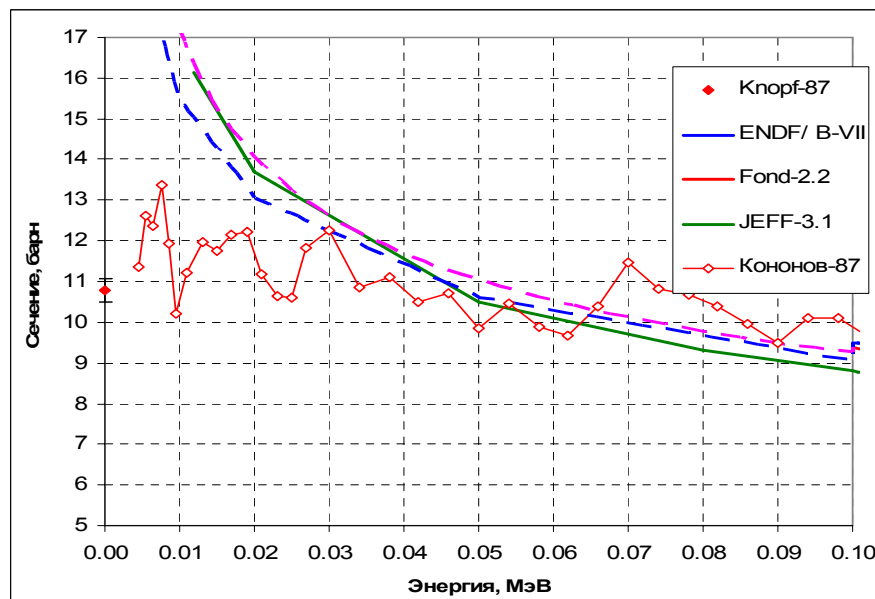


Рис. 5. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

Расчеты по средним резонансным параметрам из указанных в легенде библиотек изображены пунктирными кривыми. Все оценки близки друг к другу. **Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку из ФОНД-2.2, поскольку она лучше других описывает сечение захвата.**

3. Сечения вне резонансной области

3.1. Полное сечение

На рис. 6 различные оценки полного сечения сравниваются с экспериментальными данными. На рис. 8б в более крупном масштабе изображены данные вблизи нижней границы рассматриваемой области. Оценка, принятая в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1, представляется несколько заниженной в области 7 – 15 МэВ. Между двумя другими оценками трудно сделать выбор: они весьма близки.

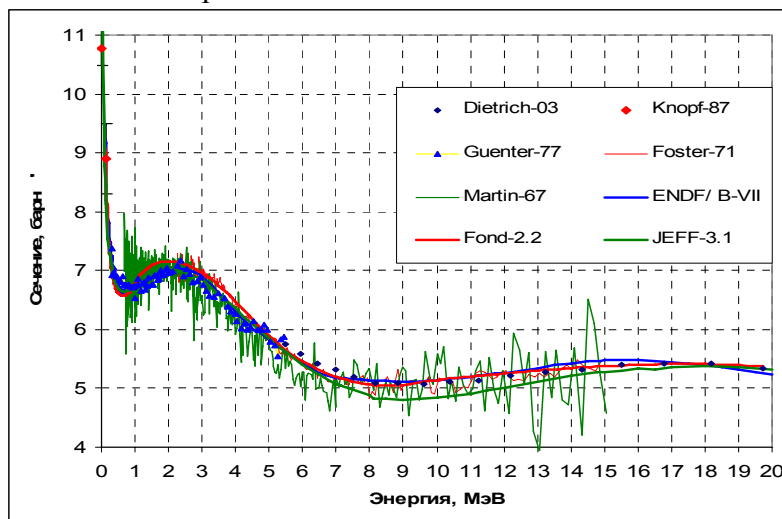


Рис.6а. Полное сечение

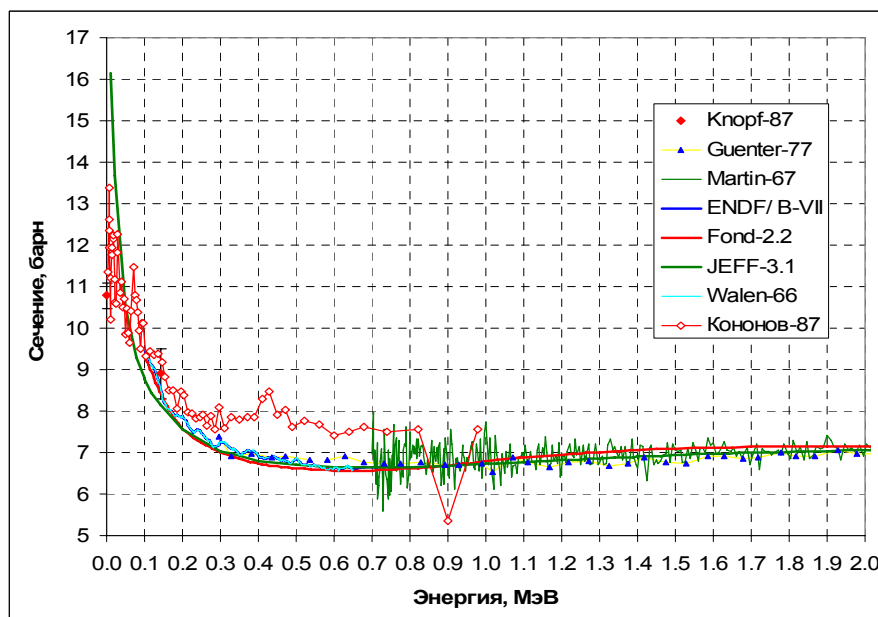


Рис.6б. Полное сечение

3.2. Сечение упругого рассеяния.

На рис. 7 сравниваются оцененные и измеренные сечения упругого рассеяния. Здесь некоторое преимущество имеет оценка JENDL-3.3.

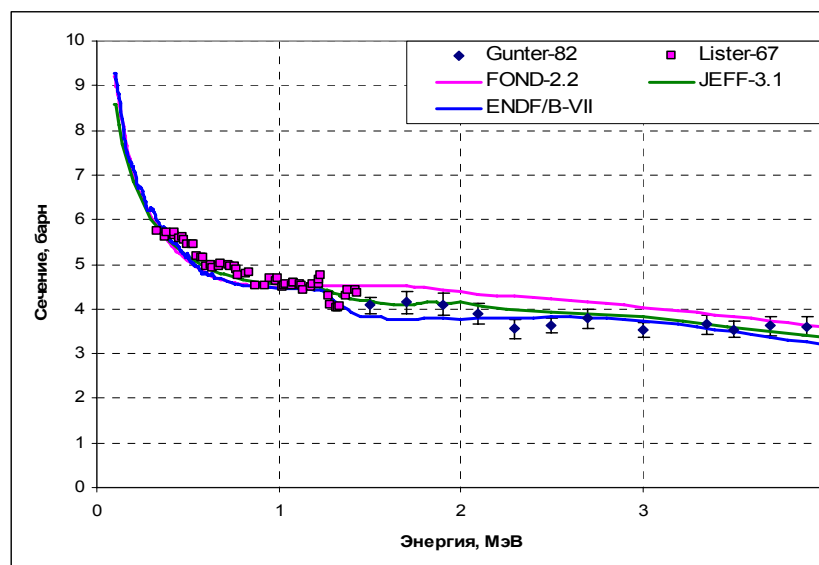


Рис.7. Сечение упругого рассеяния

3.3. Сечение захвата.

На рис.8 и оцененные и измеренные сечения захвата сравниваются друг с другом. В этом случае очевидно некоторое преимущество оценки из ФОНД-2.2.

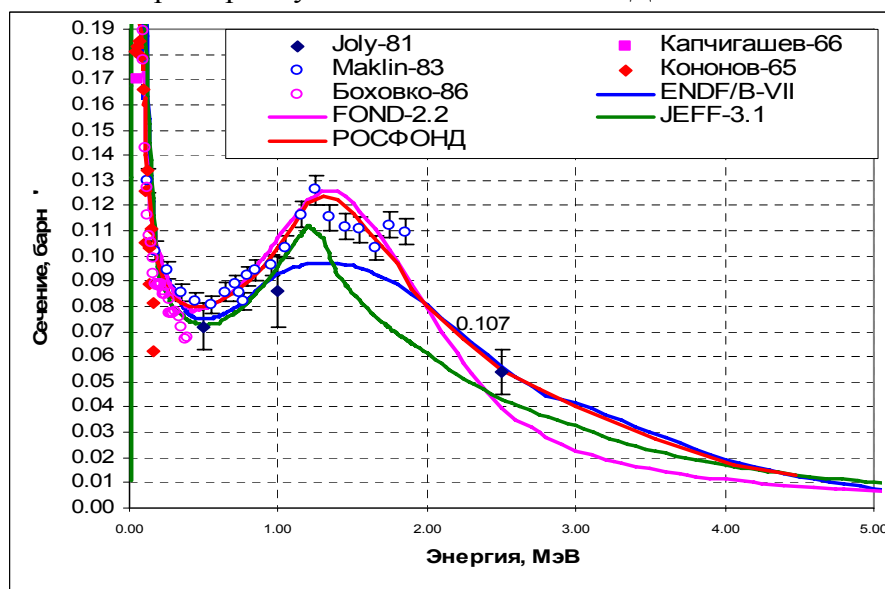


Рис. 8. Сечение радиационного захвата

3.4. Сечение неупругого рассеяния, реакций $(n,2n)$, $(n,3n)$, (n,α) и других.

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния не имеется.

Имеющиеся экспериментальные данные о сечениях других реакций сравниваются с оцененными на рис.10. и 11. Сечение реакции $(n,2n)$ в ФОНД-2.2, очевидно завышено. То же можно сказать и о сечении реакции $(n,3n)$.

Оценки сечения реакции (n,p) , принятые в ФОНД-2.2 и в ENDF/B-VII, с одной стороны, и в JEFF-3.1 и JENDL-3.3 с другой различаются тем, что отдают предпочтение разным группам авторов. При 20 МэВ, где экспериментальные данные отсутствуют оценки различаются в 1.5 раза (JEFF-3.1 ниже).

Экспериментальные данные о реакции (n,α) отсутствуют. При 14.7 МэВ оцененные сечения варьируются от 1.5 до 2.5 миллибарн; при 20 МэВ – от 4 до 13 миллибарн (в EAF-2003 сечение этой реакции после 17 МэВ резко падает до 0.7 миллибарн при 20 МэВ).

Данные о сечении реакции (n,d) приводятся только в JEFF-3.1 и, конечно, в EAF-2003. Оценки очень различаются: в JEFF-3.1 к 20 МэВ сечение возрастает до 10 миллибарн, в EAF-2003 – только до 1 миллибарна.

В JENDL-3.3 дано также сечение реакции $(n,n'\alpha)$, достигающее при 20 МэВ 1.3 миллибарна. В EAF-2003 сечение этой реакции оценено при 20 МэВ в 6.5 миллибарн – считается, очевидно, что она конкурирует с реакцией (n,α) , обуславливая отмеченное выше снижение сечения последней.

При энергиях ниже 20 МэВ энергетически возможны также реакции (n,t) , $(n,n'd)$, $(n,n't)$ и $(n,2p)$. Оцененные сечения этих реакций приведены в EAF-2003. Все они, кроме сечения первой реакции, пренебрежимо малы. Сечение реакции (n,t) , при 20 МэВ согласно оценке EAF-2003 достигает 3 миллибарн.

3.5. Заключение

Проведенное рассмотрение привело к выводу, что вне резонансной области файл РОСФОНДа целесообразно формировать на основе JEFF-3.1, заменив в нем сечение захвата в области ниже 4.5 МэВ на оценку, близкую к принятой в РОСФОНД (см. красную кривую на рис. 8), добавив сечения реакций (n,t) и $(n,n'\alpha)$, взяв данные из EAF-2003. Сечение упругого рассеяния получить из баланса.

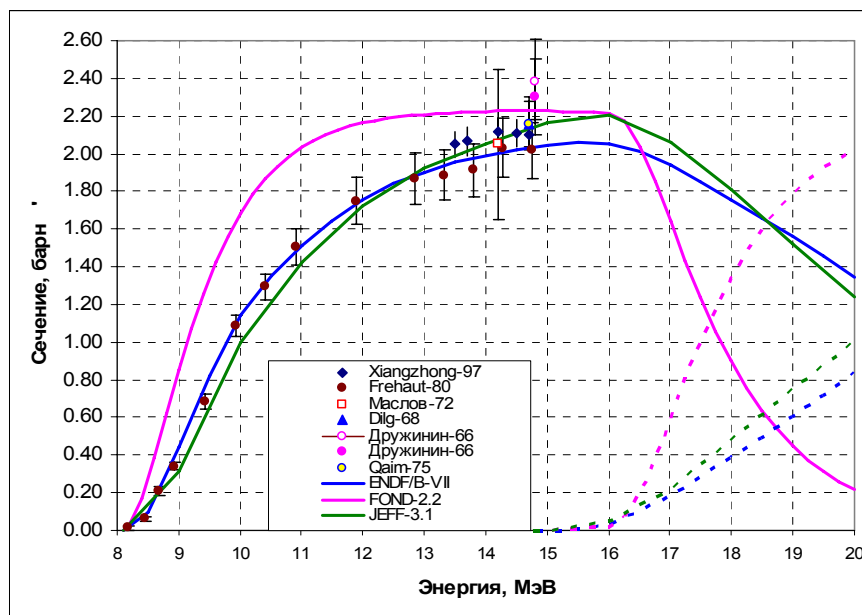


Рис.12. Сечения реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$

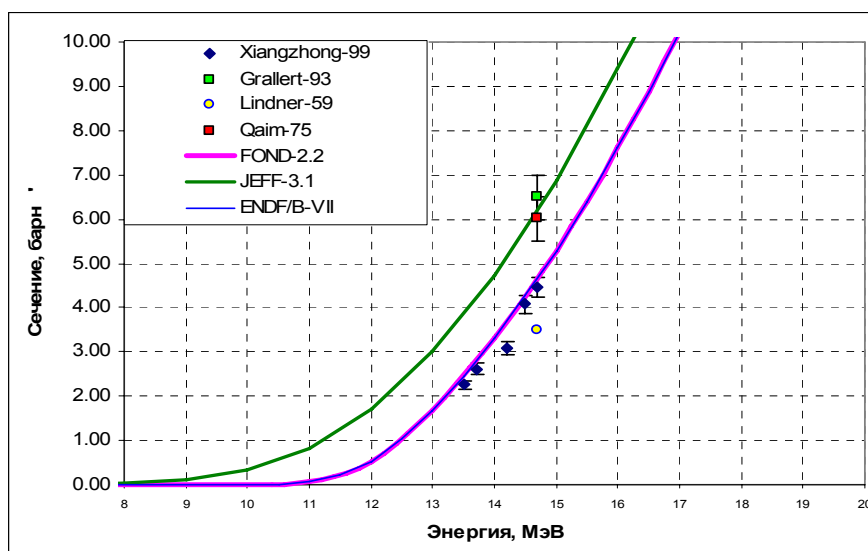


Рис. 13. Сечение реакции (n,p)

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов и образование гамма-квантов

Приняв в РОСФОНД оценки сечений основных реакций вне резонансной области из JEFF-3.1, естественно стремление принять из этой библиотеки и данные об энерго-угловых распределениях и об образовании фотонов в нейтронных реакциях, если что-либо не препятствует этому. Таких препятствий не просматривается. В JEFF-3.1 учитывается возбуждение 20 уровней ядра-мишени с энергиями до 1.87 МэВ. Возбуждение уровней, лежащих при более высокой энергии учитывается через возбуждение континуума уровней (которое в этой оценке имеет порог 1.87 МэВ). Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов и нейтронов неупруго рассеянных с возбуждением дискретных уровней, рассчитанные по теоретическим моделям, представлены в форме коэффициентов разложения по полиномам Лежандра.

Энергетические и угловые распределения реакций с непрерывным спектром нейтронов описываются секциями файла MF=6. Что касается образования фотонов, то оно учтено в JEFF-3.1 для реакций радиационного захвата, неупругого рассеяния, (n,2n) и (n,3n). Эти данные и принимаются в РОСФОНД.

5. Заключение

Для РОСФОНДа следует скомпилировать новый файл данных, основываясь в резонансной области на оценке из ФОНД-2.2, вне резонансной области – на оценке из JEFF-3.1, внося в нее коррективы и добавления, указанные выше в п. 3.5.

Ввести файл MF=9 с вероятностями образования изомерных состояний ^{178}Hf в реакции (n,n'alfa), ^{179}Hf в реакции (n,alfa) и ^{180}Ta в реакции (n,t), приняв данные, следующие из EAF-2003.

6. Автор рекомендации –

М.Н.Николаев.

74.5. Вольфрам-183

Содержание в естественной смеси 14.31%. Спин и четность – 1/2-. Достаточно полные наборы независимо оцененных данных содержатся:

в ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Ottewite, Rose and Young из ENDF/B-IV, с пересмотренной в 1983 г. резонансной областью – разрешенные резонансы оценены Л.П.Абагян, средние резонансные параметры подобраны Г.Н.Мантуровым для описания данных по сечению захвата и полному сечению;

в ENDF/B-VIIb2 – оценка Chadwick, Young and Arthur 1996 г.;

в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 – оценка Watanabe and Asami 1983 г.

1. Тепловая область и область разрешенных резонансов.

В таблице 1 сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы, рассчитанные на основе перечисленных выше оценок³. Там же приведены данные, рекомендованные Мухабхабом.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл.

	$\sigma_{\text{tot}}(0.0253 \text{ eV})$	$\sigma_{\text{el}}(0.0253 \text{ eV})$	$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$	RI_c
ENDF/B-VII	13.424	3.418	10.006	355.978
FOND-2.2	15.985	5.437	10.548	358.962
JEFF-3.1	12.501	2.388	10.113	334.430
Мухабхаб		2.400	10.300	337.000
		0.600	0.200	50.000

Как видно, все оценки хорошо согласуются с рекомендованными Мухабхабом тепловым сечением захвата и резонансным интегралом. Что касается сечения рассеяния, то в FOND-2.2 оно завышено по сравнению с рекомендацией Мухабхаба более, чем вдвое.

Область разрешенных резонансов в рассматриваемых оценках описывается по-разному. В FOND-2.2 даны параметры 102 s-резонансов; максимальная резонансная энергия – 3444 эВ, однако область разрешенных резонансов распространена только до 500 эВ (за ней начинается область неразрешенных резонансов). Ниже энергии 1-го резонанса (точнее, ниже 7 эВ) сечения в этой оценке заданы поточечно несмотря на то, что введен и резонанс при отрицательной энергии $E_0 = -5$ эВ.

В ENDF/B-VII приводятся параметры только 50 резонансов, максимальная резонансная энергия – 760 эВ. Область разрешенных резонансов простирается до 765 эВ, после чего следует область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 приводятся параметры 126 резонансов, последний резонанс лежит при энергии 2316 эВ (в ФОНДе этот резонанс имеет номер 101). Область разрешенных резонансов распространена до 2200 эВ; область неразрешенных резонансов отсутствует.

На рис. 1. приведена нарастающая сумма числа s-резонансов.

³ Для этой цели по программе NJOY рассчитывался детальный ход сечений в резонансной области и затем с помощью программы INTER рассчитывались нужные величины.

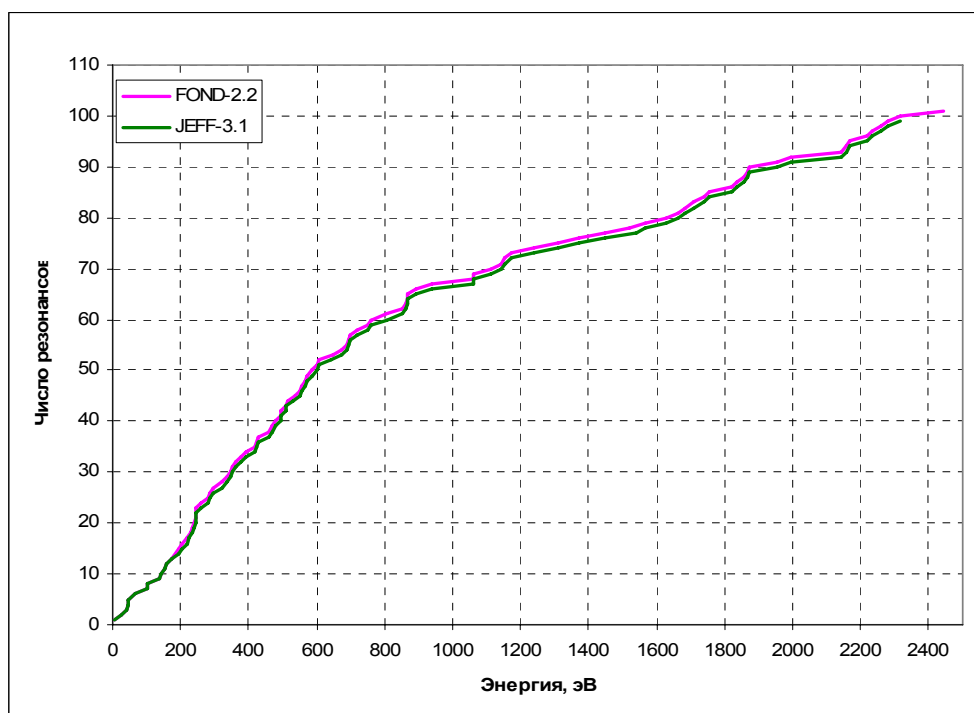


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Данные ENDF/B-VII не приводятся поскольку до 760 эВ в двух других оценках наличествует не 50, а 59 -60 резонансов. Различие между оценками FOND-2.2 и JEFF-3.1 состоит лишь в том, что в первой из них наличествует “лишний” очень слабый резонанс при 184 эВ.

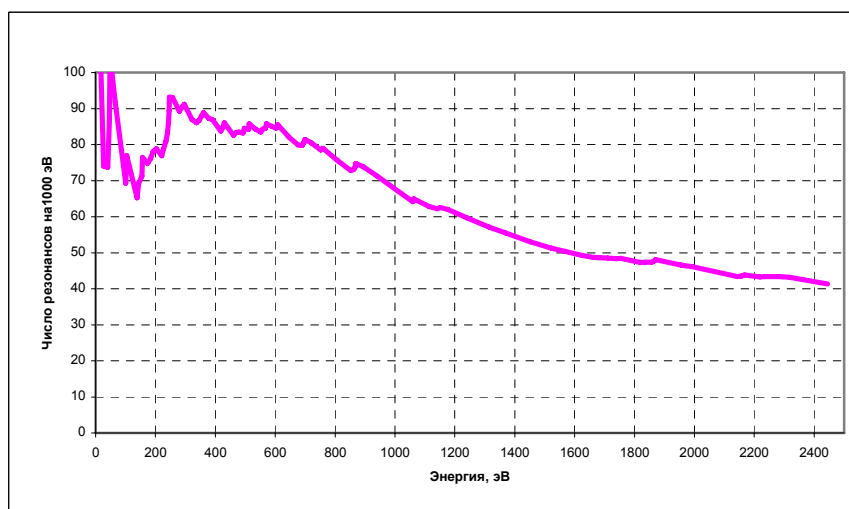


Рис.2. Среднее число резонансов на 1 кэВ.

Ниже 600 - 800 эВ очевидно наличие пропуска резонансов. На рис. 2 показана зависимость среднего числа резонансов, приходящихся на 1 кэВ, в зависимости от границы рассматриваемой области, на котором наличие пропуска уровней выше 600 эВ более очевидно.

На рис. 3. приведена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин. Эта сумма нарастает практически линейно до 750 эВ, т.е. резонансы, пропущенные в интервале 600-750 кэВ, имели малые ширины, что позволяет распространить область разрешенных резонансов по крайней мере до 750 кэВ. В то же время, что пропуск резонансов до 2.2 кэВ очевидно существенен и распространение области разрешенных резонансов до этой энергии, как это сделано в JENDL-3.3 (и JEFF-3.1), совершенно не

обосновано. Из рис. 3 видно, что оценки нейтронных ширин в FOND-2.2 и JEFF-3.1, хотя и различаются, но не радикально (по крайней мере до 750 эВ).

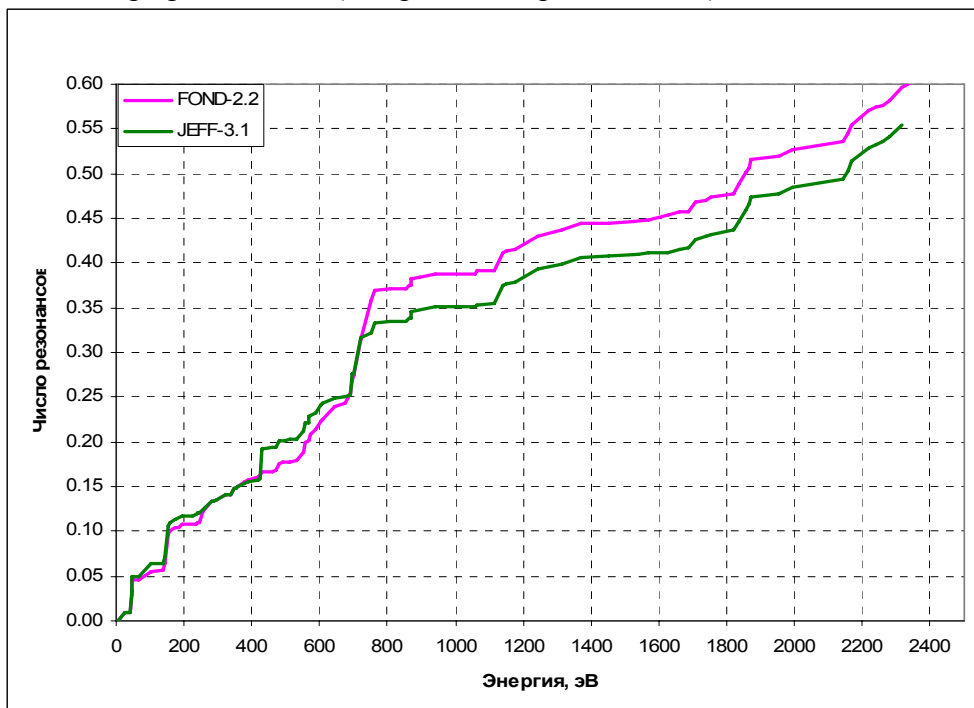


Рис. 3. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин.

Сравним распределение приведенных нейтронных ширин с теоретически ожидаемым распределением Портера –Томаса. Сравнение удобно проводить сравнивая число резонансов, попавших в 10-процентные квантили. Такое сравнение проводится на рис. 4 для различных рассматриваемых энергетических областей. При рассмотрении области до 750 эВ, наблюдаемое распределение удовлетворительно согласуется с ожидаемым при выборе средней приведенной нейтронной ширины, равной $0.006 \text{ эВ}^{1/2}$.

Если рассматривать область энергий до 2200эВ, то число резонансов в трех нижних квантилях сохраняется (т.е. таких резонансов выше 750 эВ не зарегистрировано). В то же время распределение приведенных ширин и в этом случае не слишком отличается от распределения Портера-Томаса, что, очевидно, и послужило основанием японским оценщикам для распространения области разрешенных резонансов до 2200 эВ.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНДе границу области разрешенных резонансов равной 1000эВ. В этом интервале, как можно судить из приведенных графиков, пропуск не превышает 15% резонансов с малыми нейтронными ширинами, вклад которых в нейтронные сечения невелик. Резонансные параметры примем в соответствии с рекомендацией Л.П. Абагян, кроме связанного состояния, которое примем из JEFF-3.1, чтобы понизить сечение рассеяния при 0.0253 эВ. Нижнюю границу области неразрешенных резонансов примем при 10^{-5} эВ.

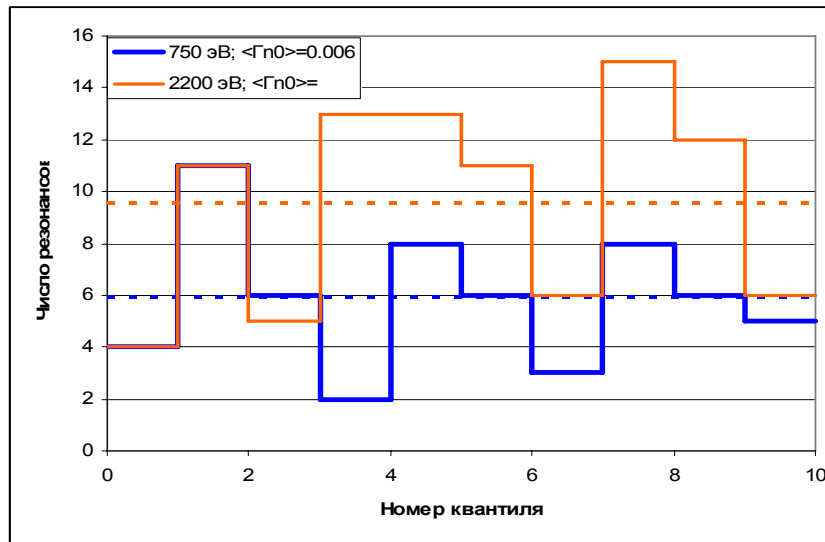


Рис.4. Распределение приведенных нейтронных ширин s-резонансов по квантилям распределения Портера-Томаса.

2. Область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 (=JENDL-3.3) область неразрешенных резонансов, как говорилось выше, не описывается; в FOND-2.2 она простирается до 100 кэВ (т.е. выше порога неупругого рассеяния, равного 46.6 кэВ), а в ENDF/B-VII - до 45 кэВ. Приводимые параметры рекомендуются не только для расчета резонансной самоэкранировки, но и самих сечений. В обеих оценках сечения описываются с учетом вкладов s-, p- и d –волн. Никаких плавных подложек к сечениям нет.

Сравнение средних параметров, подобранных для описания измеренных сечений, для выбора оценки смысла, видимо, нет. Сравним результаты расчетов, выполненных на основе этих параметров, с помощью программы NJOY, с экспериментальными данными в интересующей нас области энергий.

На рис. 5. оцененные данные по сечению захвата сравниваются с экспериментальными. Пунктиром проведены результаты расчетов по средним резонансным параметрам, приведенным в соответствующих библиотеках. На рис. 6

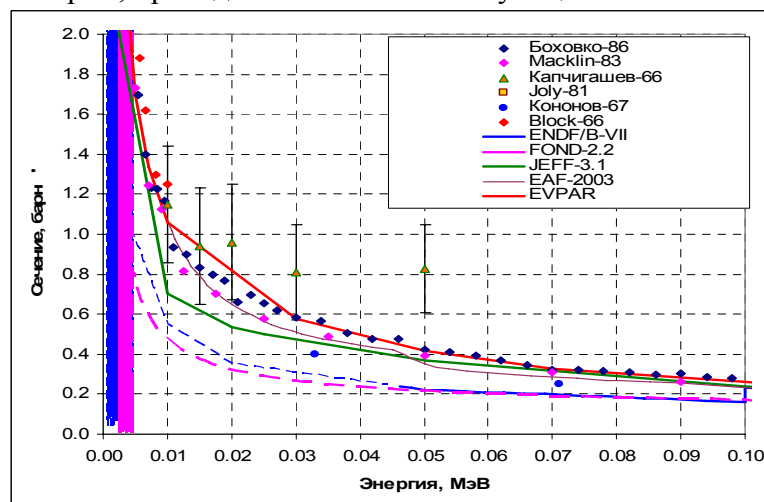


Рис.5. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов.

Проводится такое же сравнение по полному сечению. Видно, что во всех библиотеках сечение захвата переоценивается, а полное сечение недооценивается. Г.Н.Мантуровым с

помощью программы EVPAR⁴ были подобраны средние резонансные параметры, позволяющие описать совокупность имеющихся экспериментальных данных по сечению захвата и полному сечению. Полученные им результаты проведены красной линией. Она, несомненно, много лучше согласуется с результатами экспериментов и подобранные Мантуровым средние резонансные параметры и следует использовать в РОСФОНДе. Область неразрешенных резонансов целесообразно ограничить 45 кэВ. Заметим, что при этой энергии лучше других с красной кривой состыкуется оценка JEFF-3.1.

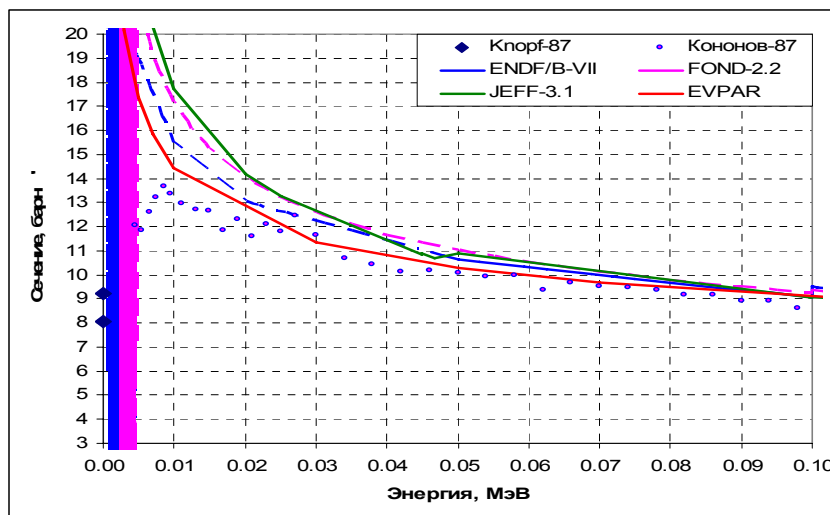


Рис. 6. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

3. Сечения вне резонансной области

3.1. Полное сечение

На рис. 7 различные оценки полного сечения сравниваются с экспериментальными данными. На рис. 7б в более крупном масштабе изображены область, в которой имеются экспериментальные данные. Все оценки согласуются друг с другом, все они недооценивают данные Кононова 87 г. при энергии выше 300 кэВ. Надо заметить, что в EXFORe эти данные приводятся в виде пропусканий T через образец толщиной $n=0.0399$ ядер/барн. Сечение приведенное на рис. 8б получено как $-\ln T/n$. Изотопический состав образца не указан. Следует отметить, что в случае вольфрама-182, для которого имеются данные по полному сечению, полученные несколькими авторами, данные Кононова настолько же выше других, насколько в случае вольфрама-183 они выше оцененных данных. В связи с отмеченным не представляется целесообразным проводить переоценку полного сечения для обеспечения согласия с этими единственными данными, поведение которых вблизи 1 МэВ существенно отличается от результатов оценок, выполненных на основе оптической модели с параметрами, проверенными на других изотопах вольфрама.

В РОСФОНД принимается оценка JEFF-3.1.

⁴ Мантуров Г.Н. и др. ВАНТ. Сер. «Ядерные константы» вып. 1 (50), с.50. М. ЦНИИАтоминформ, 1983.

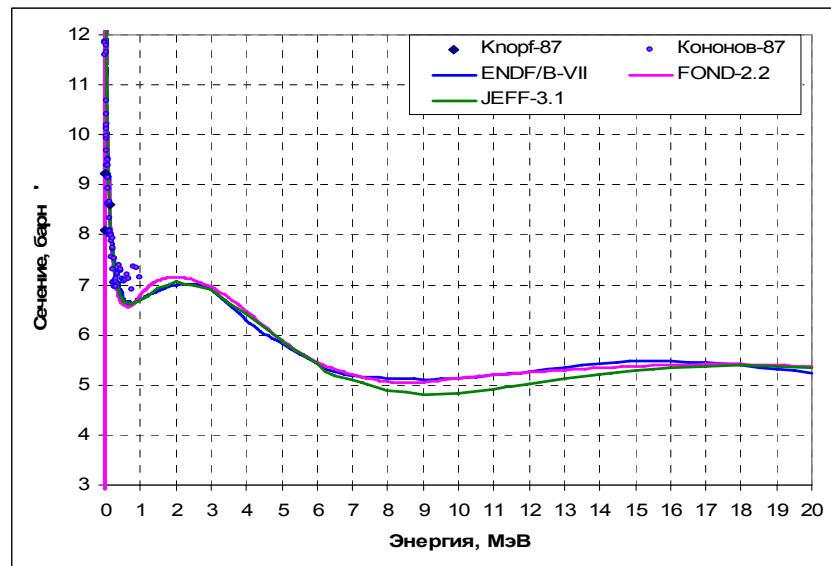


Рис.7а. Полное сечение

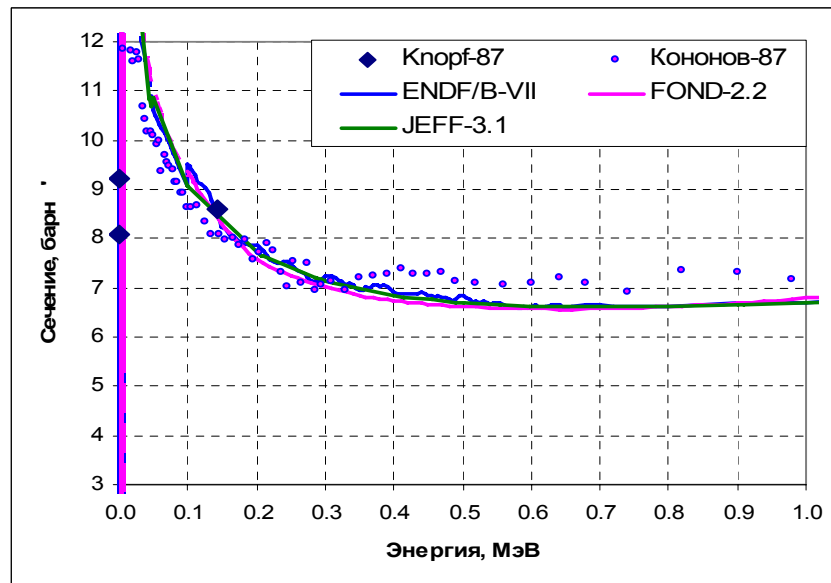


Рис.7б. Полное сечение

3.2. Сечение захвата.

На рис.8 и оцененные и измеренные сечения захвата сравниваются друг с другом. Данные Маклина не были учтены ни в одной оценке. Представляется целесообразным внести в оценку JEFF-3.1 коррективу (красная кривая на рис. 8) и в таком виде включить ее в РОСФОНД.

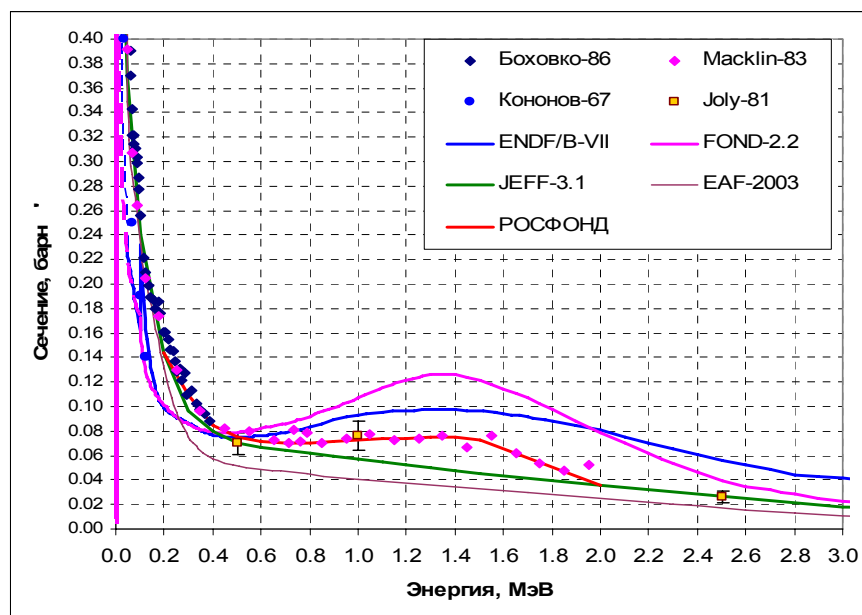


Рис. 8. Сечение радиационного захвата

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния на вольфраме-186 не имеется. Все оценки близки друг к другу. В РОСФОНД принимается оценка JEFF-3.1.

3.5. Сечение реакций $(n,2n)$, $(n,3n)$, (n,p) , (n,α) и других.

Имеющиеся экспериментальные данные о сечениях этих реакций сравниваются с оцененными на рис.9. и 10. Имеется экспериментальный результат для суммы реакций $(n,n'p)$ и (n,d) – см. рис.11. Приведенная на этом рисунке красная кривая проходит через точки, приведенные в JEFF-3.1, но к ним добавлены ещё и промежуточные для обеспечения приемлемой плавности. Для реакций (n, α) , $(n,n'\alpha)$, и $(n,3n)$ экспериментальные данные отсутствуют. Как видно, есть все основания принять в РОСФОНД сечения всех этих реакций из JEFF-3.1 (=JENDL-3.3). Сечение реакции $(n,n'p)$ будет сглажено так, как показано на рис.11.

Вообще говоря, в рассматриваемой области энергий возможны также реакции $(n,n'd)$, $(n,n't)$, и $(n,2p)$; оценки сечений этих реакций содержатся в EAF-2003. Сечения всех этих реакций при 20 МэВ не превышают нескольких микробарна. Учет их в библиотеке РОСФОНД едва ли целесообразен.

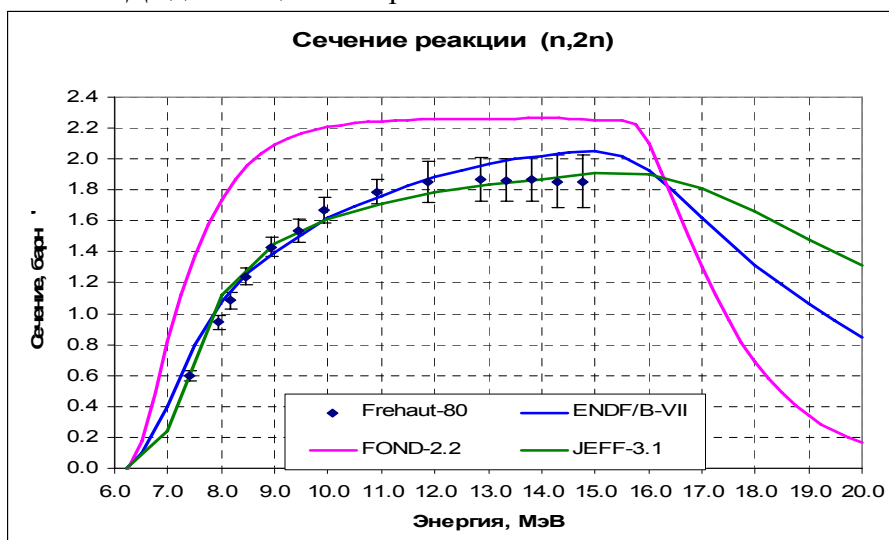


Рис.9. Сечения реакции $(n,2n)$

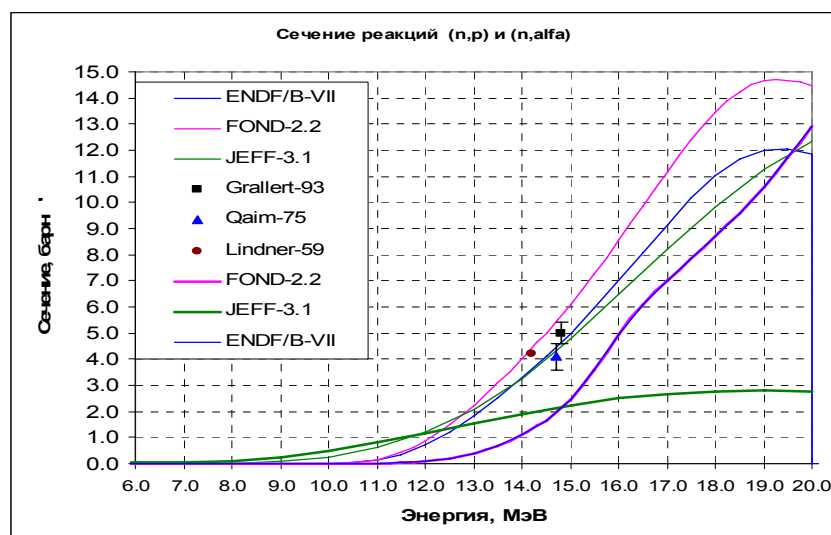


Рис. 10. Сечение реакций (n,p) и (n,α)

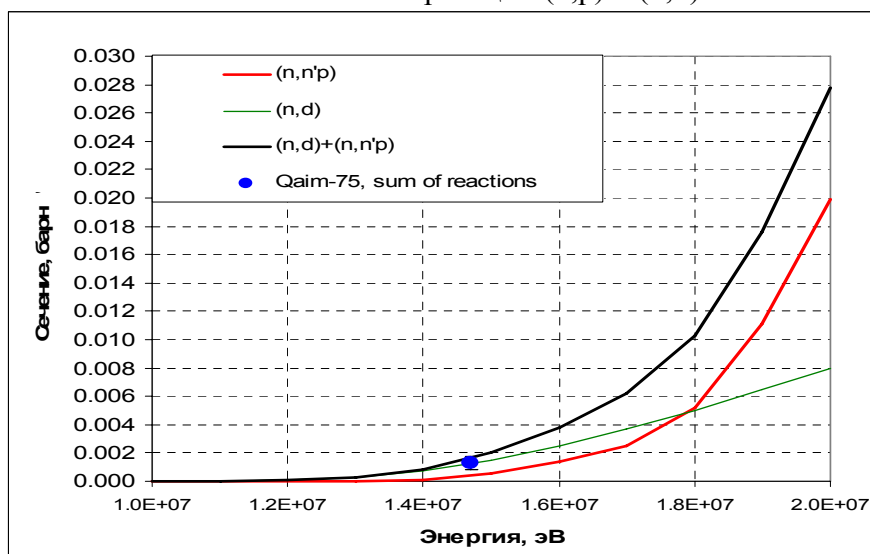


Рис.11. Сечения реакций (n,n'p), (n,d) и их суммы. Кривые – оцененные данные из JEFF-3.1.

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов и образование гамма-квантов

Приняв в РОСФОНД оценки сечений основных реакций вне резонансной области из JEFF-3.1, естественно стремление принять из этой библиотеки и данные об энерго-угловых распределениях и об образовании фотонов в нейтронных реакциях, если что-либо не препятствует этому. Таких препятствий не просматривается.

5. Заключение

Для РОСФОНДа следует скомпилировать новый файл данных, основываясь в области разрешенных резонансов на оценке из ФОНД-2.2, распространив эту область с 10-5 эВ до 1000 эВ и приняв параметры первого и отрицательного резонансов из JEFF-3.1; в области неразрешенных резонансов принять параметры, рекомендованные Г.Н. Мантуровым; вне резонансной области принять оценку из JEFF-3.1, внося небольшие коррективы в сечения захвата и реакции (n,n'p). Энерго-угловые распределения нейтронов и данные об образовании гамма-квантов взять из JEFF=3.1.

Ввести файл MF=9 с вероятностями образования изомерных состояний ^{179}Hf в реакции (n,n'alpha), приняв данные, следующие из EAF-2003.

6. Автор рекомендации –
М.Н.Николаев.

74.6. Вольфрам-184

Содержание в естественной смеси 28.43%. Спин и четность – 0^+ . Достаточно полные наборы независимо оцененных данных содержатся:

в ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Ottewite, Rose and Young из ENDF/B-IV, с пересмотренной в 1983 г. резонансной областью – разрешенные резонансы оценены Л.П.Абагян, средние резонансные параметры подобраны Г.Н.Мантуровым для описания данных по сечению захвата и полному сечению;

в ENDF/B-VIIb2 – оценка Chadwick, Young and Arthur 1996 г.;

в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 – оценка Watanabe and Asami 1983 г.

1. Тепловая область и область разрешенных резонансов.

В таблице 1 сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы, рассчитанные на основе перечисленных выше оценок⁵. Там же приведены данные, рекомендованные Мухабхабом.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл.

	$\sigma_{\text{tot}}(0.0253 \text{ eV})$	$\sigma_{\text{el}}(0.0253 \text{ eV})$	$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$	RI_c
ENDF/B-VII	6.047	4.297	1.749	16.369
FOND-2.2	6.617	4.783	1.833	16.013
JEFF-3.1	9.071	7.373	1.698	16.017
Мухабхаб		7.350	1.700	14.700
		± 0.017	± 0.100	± 1.500

Как видно, все оценки несколько завышают резонансный интеграл по сравнению с рекомендацией Мухабхаба, который, помимо результатов измерений сечений захвата в резонансной области принимал во внимание и результаты непосредственных измерений резонансного интеграла, что могло явиться причиной занижения оценки из-за недоучета эффекта резонансной самоэкранировки.

Область разрешенных резонансов в рассматриваемых оценках описывается по-разному. В FOND-2.2 даны параметры 140 s-резонанса и 4 p-резонансов; максимальная резонансная энергия – 16450 эВ, однако область разрешенных резонансов распространена только до 2600 эВ (за ней начинается область неразрешенных резонансов). Ниже энергии 1-го резонанса сечения в этой оценке заданы поточечно.

В ENDF/B-VII приводятся параметры только 38 резонансов, максимальная резонансная энергия – 2621 эВ. Область разрешенных резонансов простирается до 2650 эВ, после чего следует область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 приводятся параметры 126 резонансов, максимальная энергия – 16450 эВ (как и в ФОНДе, где, однако ниже этой энергии описано на 14 резонансов больше).

⁵ Для этой цели по программе NJOY рассчитывался детальный ход сечений в резонансной области и затем с помощью программы INTER рассчитывались нужные величины.

Область разрешенных резонансов распространена до 15 кэВ; область неразрешенных резонансов отсутствует.

На рис. 1. приведена нарастающая сумма числа s-резонансов.

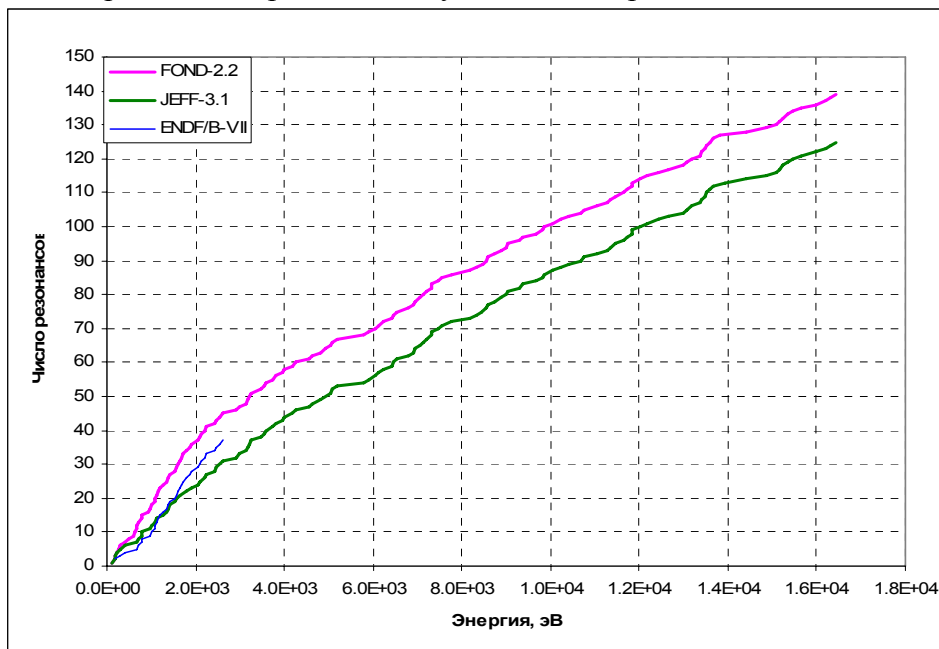


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Наличие пропуска резонансов прослеживается во всех оценках; в ФОНД-2.2 этот пропуск минимален. Поэтому далее только эту оценку резонансных параметров и будем рассматривать. На рис. 2 показана зависимость среднего числа резонансов, приходящихся на 1 кэВ, в зависимости от границы рассматриваемой области.

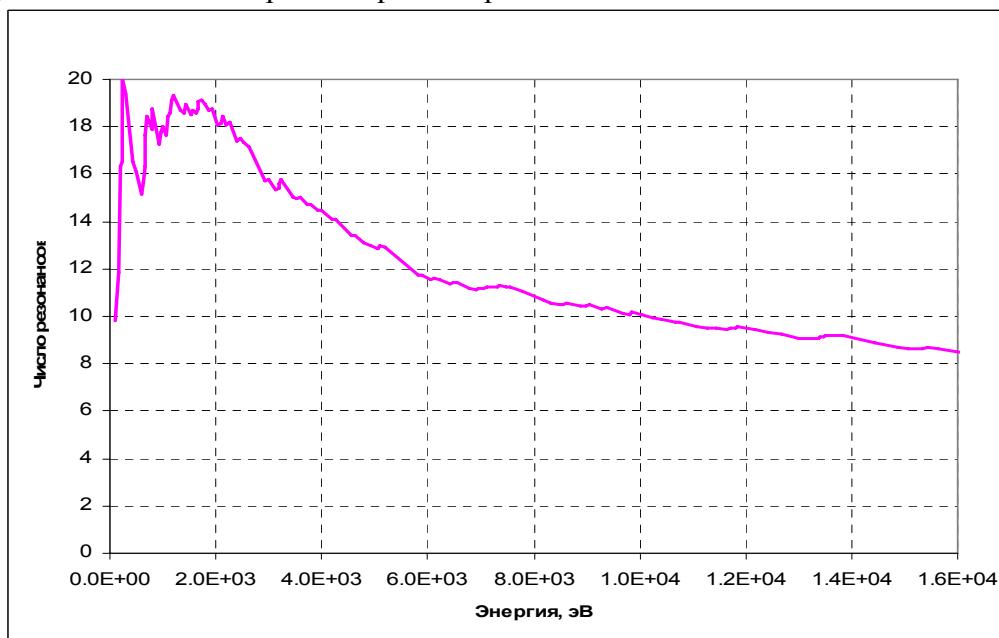


Рис.2. Среднее число резонансов на 1 кэВ.

Видно, что выше 2 кэВ это число начинает монотонно снижаться, что и свидетельствует о пропуске части резонансов. Однако в пределах области разрешенных резонансов, принятой в ФОНД-2.2 (2.6 кэВ) пропуск несущественен.

На рис. 3. приведена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин. Эта сумма нарастает практически линейно до 4 кэВ, т.е. резонансы, пропущенные в интервале

2 – 4 кэВ, имели малые ширины, что позволяет, видимо, распространить область разрешенных резонансов до 4 кэВ. В то же время, что пропуск резонансов до 15 кэВ, видимо, существен и обоснованность распространения области разрешенных резонансов до 15 кэВ, как это сделано в JENDL-3.3 (и JEFF-3.1), представляется сомнительной.

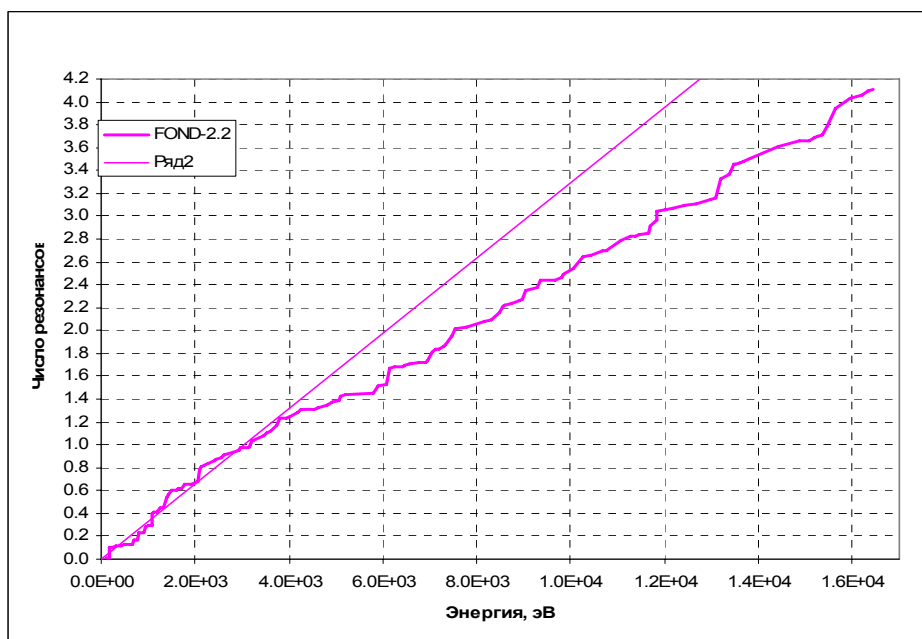


Рис. 3. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин.

Наличие пропуска резонансов с малыми ширинами ведет к возрастанию средней приведенной нейтронной ширины в зависимости от интервала усреднения (см. рис.4).

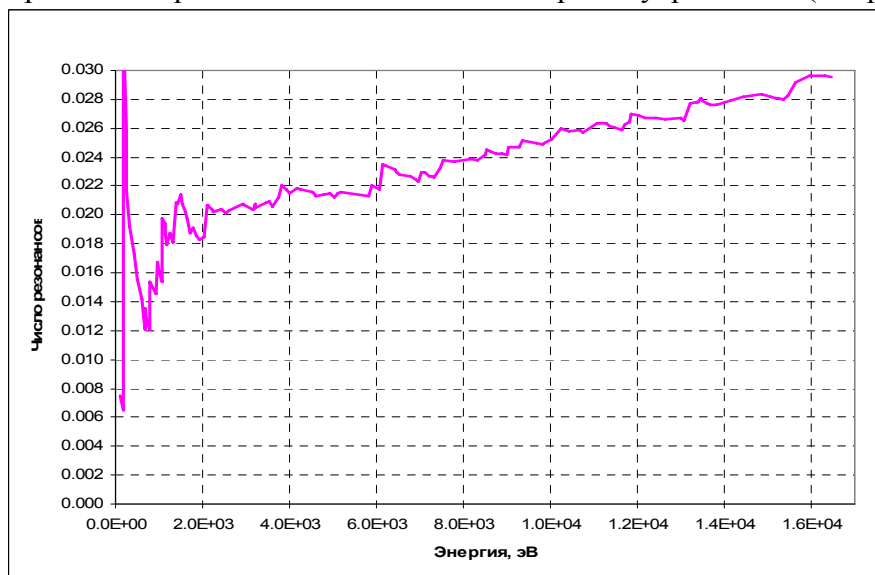


Рис. 4. Зависимость оценки средней приведенной нейтронной ширины от интервала усреднения.

Исходя из этого графика также можно заключить, что до 4 кэВ пропущены только слабые резонансы, а при более высоких энергиях пропускаются и сравнительно широкие. Этот вывод, однако, не подтверждается при сравнении распределения приведенных нейтронных ширин с теоретически ожидаемым распределением Портера –Томаса. . Сравнение удобно проводить сравнивая число резонансов, попавших в 10-процентные квантили. Такое сравнение проводится на рис. 5 для различных рассматриваемых энергетических областей.

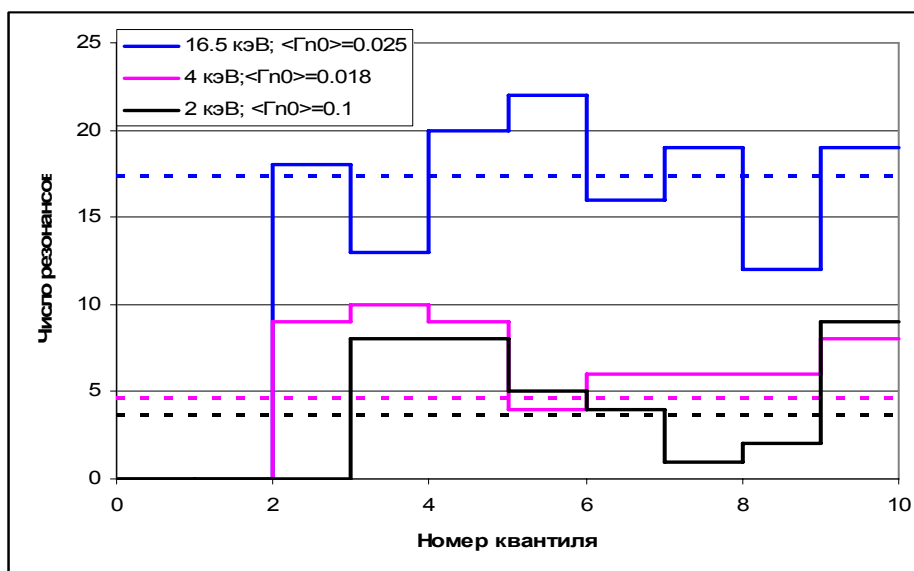


Рис.5. Распределение приведенных нейтронных ширин s-резонансов по квантилям распределения Портера-Томаса.

В каждом из интервалов средняя приведенная ширина выбиралась такой, чтобы в верхних квантилях, где пропуск маловероятен, отклонения наблюдаемых чисел резонансов от статистически ожидаемых имели бы разные знаки и не превосходили бы существенно статистически ожидаемые.

Видно, что характер расхождений оказывается одним и тем же и в области до 2 кэВ, и в области до 4 кэВ, и в области до 16.5 кэВ, хотя в последнем случае приходится принимать большее значение средней приведенной нейтронной ширины. Ни в каком энергетическом интервале не удастся непротиворечиво описать наблюдаемые нейтронные ширины распределением Портера-Томаса: в нижних квантилях во всех случаях наблюдается нехватка резонансов несмотря на снижение средней нейтронной ширины, принимаемой для более узких интервалов. Видимо, именно это обстоятельство побудило распространить область разрешенных резонансов до 15 кэВ (предполагая, что пропущенные резонансы не дают существенного вклада в средние нейтронные сечения).

Исходя из изложенного представляется целесообразным **включить в РОСФОНД резонансные параметры из оценки Л.П.Абагян, как наиболее полной, но расширить область разрешенных резонансов до 4 кэВ** (паллиативное решение).

2. Область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 (=JENDL-3.3) область неразрешенных резонансов, как говорилось выше, не описывается; в ENDF/B-VII и в FOND-2.2 она простирается до 100 кэВ (т.е. почти до порога неупругого рассеяния, 111,8 кэВ), причем приводимые параметры рекомендуются не только для расчета резонансной самоэкранировки, но и самих сечений. В обеих оценках сечения описываются с учетом вкладов s-, p- и d –волн. Никаких плавных подложек к сечениям нет.

Сравнение средних параметров, подобранных для описания измеренных сечений, для выбора оценки смысла, видимо, нет. Сравним результаты расчетов, выполненных на основе этих параметров, с помощью программы NJOY, с экспериментальными данными в интересующей нас области энергий.

На рис. 6. оцененные данные по сечению захвата сравниваются с экспериментальными. Пунктиром проведены результаты расчетов по средним резонансным параметрам. В свете всей совокупности экспериментальных данных оценка, принятая в ENDF/B-VII, представляется заниженной. В ФОНД-2.2 включена оценка,

выполненная с учетом всего набора имеющихся экспериментов, с точки зрения качества описания сечения захвата, очевидно, предпочтительнее.

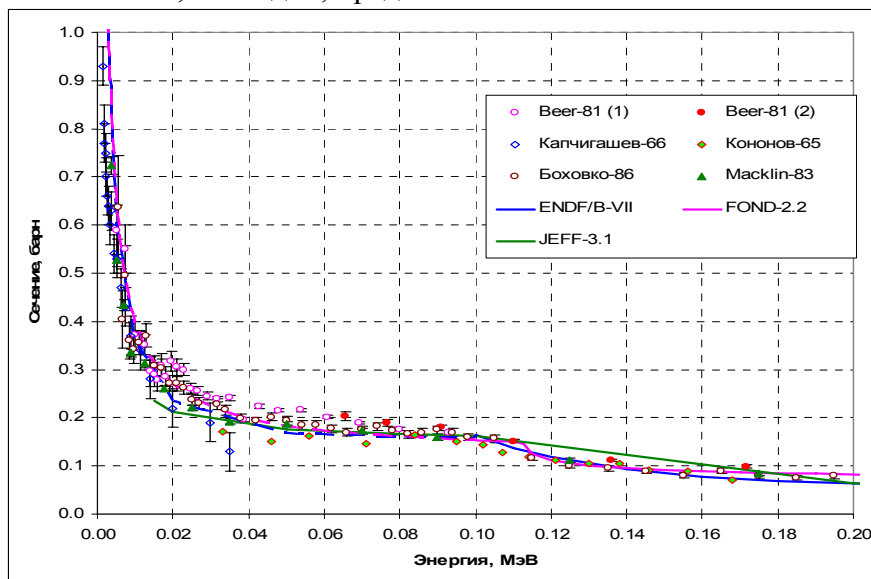


Рис.6. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов.

На рис. 7 проводится сравнение оцененных и измеренных данных по полному сечению. Экспериментальная информация весьма скудна. Данные Кононова в EXFORе приводятся в виде пропусканий T через образец толщиной $n=0.0431$ ядер/барн и приведенные здесь сечения получены как $-\ln(T)/n$, т.е. при низких энергиях данные занижены за счет самоэкранировки. При энергиях выше 60 кэВ эти искажения становятся несущественными и при 142 кэВ результаты этой работы идеально согласуются с гораздо более поздним измерением Кнопфа.

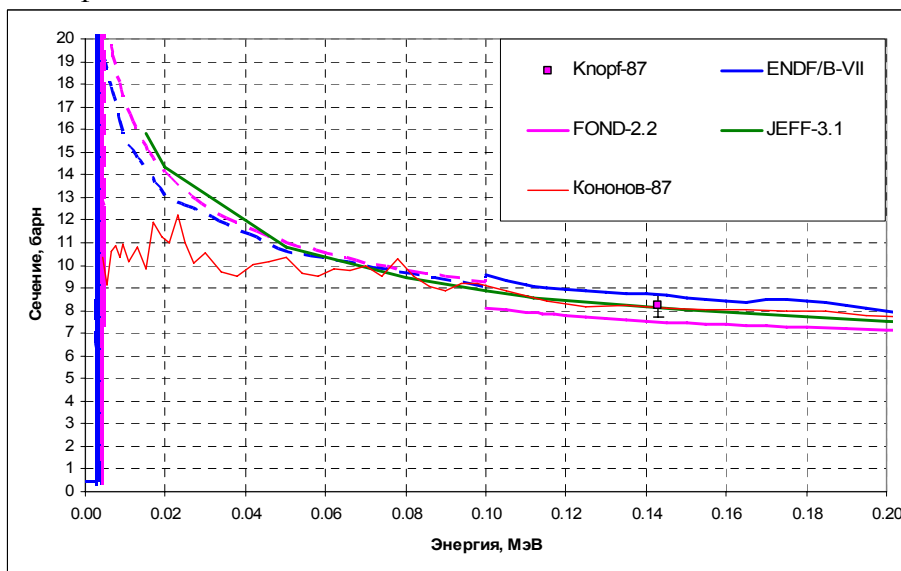


Рис. 7. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

Расчеты по средним резонансным параметрам изображены пунктирными кривыми. Они близки друг к другу и согласуются с оценкой, принятой в JENDL-3.3 (=JEFF-3.1). Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку из ФОНД-2.2, распространив область неразрешенных резонансов до 111.8 кэВ, т.е. до порога неупругого рассеяния.

3. Сечения вне резонансной области

3.1. Полное сечение

На рис. 8 различные оценки полного сечения сравниваются с экспериментальными данными. На рис. 8б в более крупном масштабе изображены данные вблизи нижней границы рассматриваемой области. Прежде всего видно, что оценка, принятая в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1, наименее удачна во всех частях области. Данные Дитриха 2003 г., естественно, ни в одной оценке не учитывались. Приписываемая этим данным погрешность не превышает размера точек, изображенных на рис. 8а. Оценки ФОНД-2.2 и ENDF/B-VII достаточно близки и к новым данным Гюнтера и, естественно, к данным более ранних работ.

В низкоэнергетической части рассматриваемой области обе названные оценки плохо стыкуются с результатами расчета по средним резонансным параметрам. Представляется целесообразным в интервале от порога неупругого рассеяния до 0.7 МэВ принять кривую, изображенную на рис. 8 красной линией. Выше этой энергии решено принять оценку ENDF/B-VII, лучше согласующуюся с данными Гюнтера.

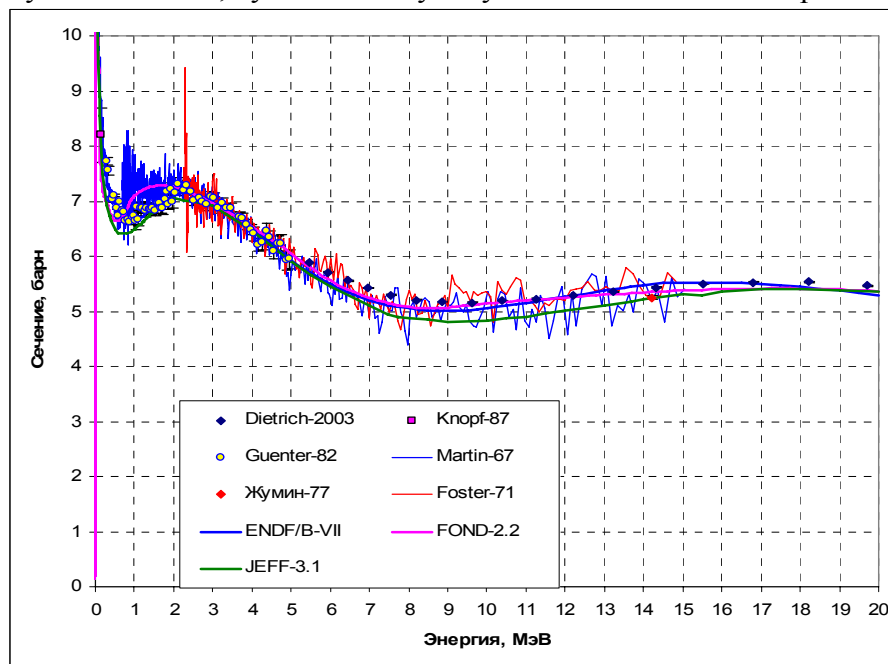


Рис.8а. Полное сечение

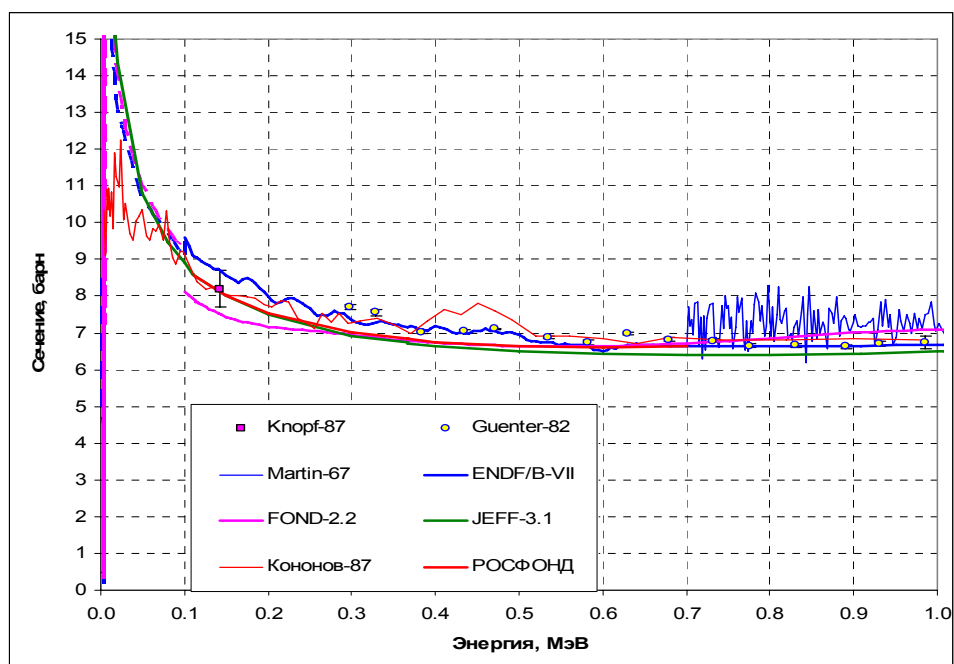


Рис.86. Полное сечение

3.2. Сечение упругого рассеяния.

На рис. 9 сравниваются оцененные и измеренные сечения упругого рассеяния. Преимущество ENDF/B-VII перед более ранней американской оценкой, принятой в ФОНД-2.2, очевидно.

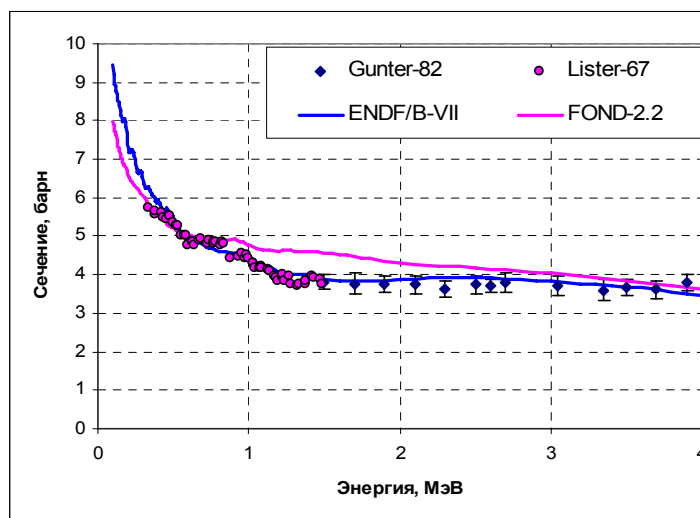


Рис.9. Сечение упругого рассеяния

3.3. Сечение захвата.

На рис.10 и оцененные и измеренные сечения захвата сравниваются друг с другом. В этом случае очевидно преимущество оценки из ФОНД-2.2.

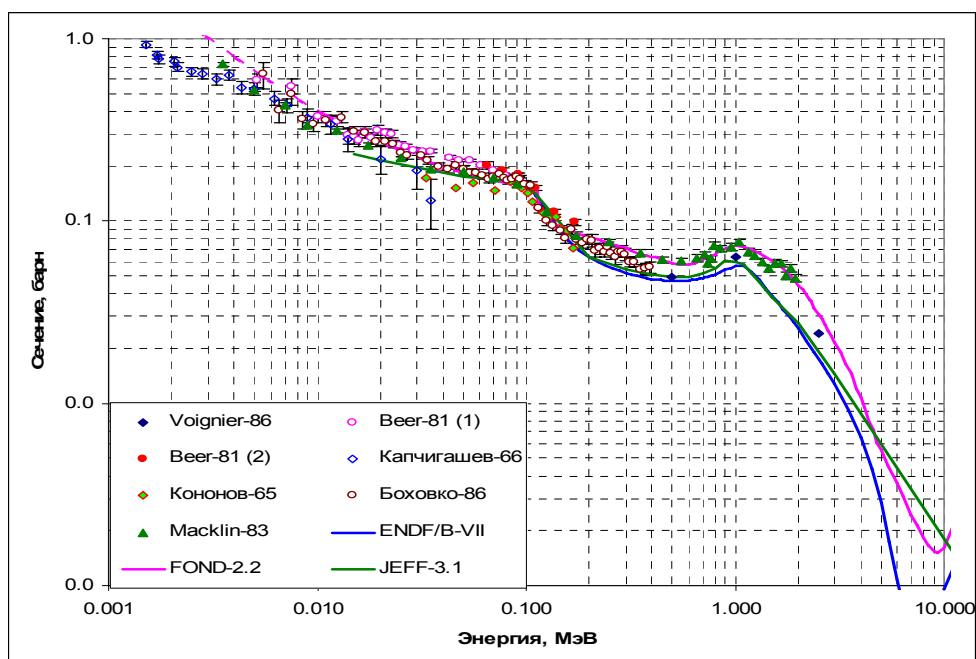


Рис. 10. Сечение радиационного захвата

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния на вольфраме-186 не имеется. Все оценки близки друг к другу и нет оснований не принять в РОСФОНД самую последнюю из них – оценку из ENDF/B-VII.

3.5. Сечение реакции $(n,2n)$, $(n,3n)$, (n,α) и другие.

Экспериментальные данные о сечениях этих реакций сравниваются с оцененными на рис.12. и 13. Как видно, есть все основания принять в РОСФОНД сечения этих реакций из ENDF/B-VII. В ENDF/B-VII приводятся также сечение реакций (n,p) и $(n,n'p)$, для которых экспериментальные данные отсутствуют. Вообще говоря, в рассматриваемой области энергий возможны также реакции (n,d) , (n,t) , $(n,n'\alpha)$, $(n,^3\text{He})$, $(n,n'd)$, $(n,n't)$, и $(n,2p)$; оценки сечений этих реакций содержатся в EAF-2003. Сечения всех этих реакций, кроме реакций $(n,n'\alpha)$ и $(n,^3\text{He})$, при 20 МэВ не превышают микробарна. Учет их в библиотеке РОСФОНД едва ли целесообразен. Сечение экзотермической реакции $(n,n'\alpha)$ при 20 МэВ составляет по данным EAF-2003 1 миллибарн и лишь чуть ниже по оценке JENDL-3.3. Эту реакцию целесообразно включить в РОСФОНД (скомпенсировав это уменьшением сечения упругого рассеяния), приняв сечение и энерго-угловые распределения вторичных нейтронов из JENDL-3.3.

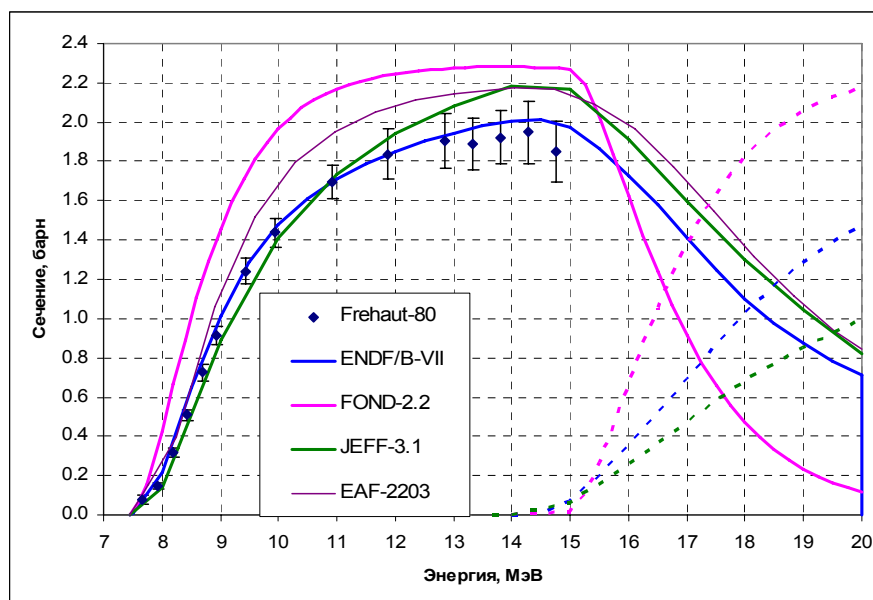


Рис.12. Сечения реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$

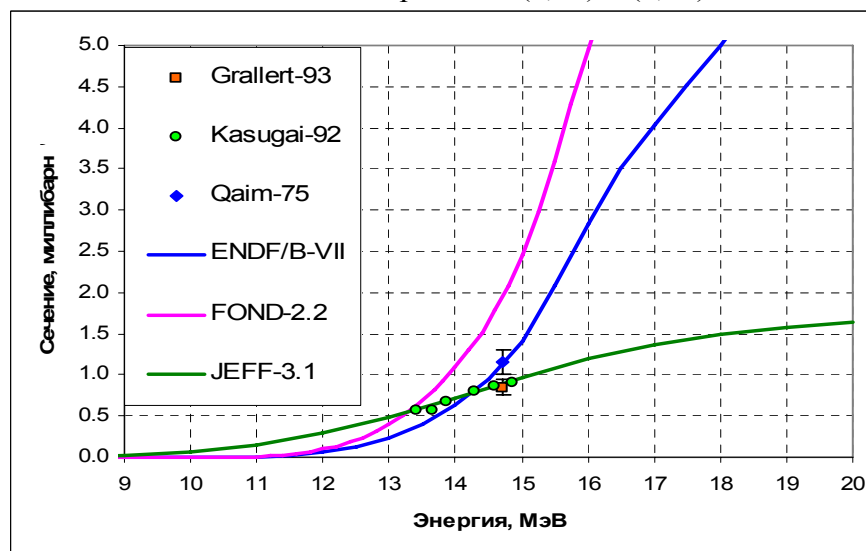


Рис. 13. Сечение реакции (n,α)

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов и образование гамма-квантов

Приняв в РОСФОНД оценки сечений основных реакций вне резонансной области из ENDF/B-VII, естественно стремление принять из этой библиотеки и данные об энерго-угловых распределениях и об образовании фотонов в нейтронных реакциях, если что-либо не препятствует этому. Таких препятствий не просматривается. В ENDF/B-VII учитывается возбуждение 18 уровней ядра-мишени с энергиями до 1.43 МэВ. Возбуждение не учтенных явно уровней приближенно учитывается через возбуждение континуума уровней (которое в этой оценке имеет порог -0.5 МэВ). При 1.6 МэВ вклад возбуждения континуума в сечении неупругого рассеяния составляет 5%.

В двух других рассматривавшихся нами оценках учтено возбуждение меньшего числа уровней ядра-мишени, т.е. на долю статистически описываемых процессов приходится больше.

Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов и нейтронов неупруго рассеянных с возбуждением дискретных уровней, рассчитанные по теоретическим моделям, представлены в форме коэффициентов разложения по полиномам Лежандра.

Энергетические и угловые распределения реакций с непрерывным спектром нейтронов в ENDF/B-VII рассматриваются как независимые и описываются файлами MF=4 и MF=5. В оценке принятой в JEFF-3.1, корреляции этих распределений учтены – они описываются секциями файла MF=6. Целесообразно в РОСФОНД включить энерго-угловые распределения нейтронов из JEFF-3.1 для всех реакций, кроме неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней, поскольку для этой реакции в JEFF-3.1 и в ENDF/B-VII пороги кардинально различаются и потому в РОСФОНДе придется сохранить то же описание, что и в ENDF/B-VII – с помощью файлов MF=4 и MF=5.

Что касается образования фотонов, то оно учтено в ENDF/B-VII для реакций радиационного захвата, неупругого рассеяния, (n,2n) и (n,3n). Эти данные и принимаются в РОСФОНД.

5. Заключение

Для РОСФОНДа следует скомпилировать новый файл данных, основываясь в резонансной области на оценке из ФОНД-2.2, вне резонансной области – на оценке из ENDF/B-VII. Угловые распределения рассеянных нейтронов взять из ENDF/B-VII, а энерго-угловые распределения нейтронов континуальных реакций (кроме MT=91) – из JEFF=3.1. Данные об образовании гамма-квантов принимаются такими, как в ENDF/B-VII.

6. Автор рекомендации –

М.Н.Николаев.

74.7. Вольфрам-185⁶

Радиоактивен. Спин и четность 3/2-. В результате бета-распада ($T_{1/2} = 75.1$ дн.) превращается в стабильный ^{185}Re . В реакторе этот изотоп образуется, главным образом, в реакции $^{184}\text{W}(n,g)$. Полных оценок нейтронных данных для ^{185}W неизвестно. Оценка сечений нейтронных реакций, основанная на теоретических расчетах и полуэмпирических систематиках, содержится в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из последней версии библиотеки EAF – EAF-2003. Долгоживущих изомеров в реакциях на ^{185}W не образуется, поэтому все данные о сечениях образования конечных ядер в основном и изомерном состояниях в нейтронных реакциях, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

⁶ После завершения работы над изотопами вольфрама стала известна рекомендация Мухабхаба по выбору резонансных параметров для ^{185}W : 7 резонансов от 10.15 до 6609 эВ. Приводятся тепловое сечение 2.1 ± 0.3 б и резонансный интеграл 116б. Из принятого файла эти величины получаются большими: 3.3 б и 170 б соответственно. На чем основана рекомендация Мухабхаба неизвестно: в списке источников указание на какие-либо измерения сечений этого изотопа в резонансной области нет.

74.8. Вольфрам-186

Содержание в естественной смеси 28.43%. Спин и четность – 0^+ . Достаточно полные наборы независимо оцененных данных содержатся:

в ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Ottewite, Rose and Young из ENDF/B-IV, с пересмотренной в 1983 г. резонансной областью – разрешенные резонансы оценены Л.П.Абагян, средние резонансные параметры подобраны Г.Н.Мантуровым для описания данных по сечению захвата и полному сечению;

в ENDF/B-VIIb2 – оценка Chadwick, Young and Arthur 1996 г.;

в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 – оценка Watanabe and Asami 1983 г.

1. Тепловая область и область разрешенных резонансов.

В таблице 1 сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы, рассчитанные на основе перечисленных выше оценок⁷. Там же приведены данные, рекомендованные Мухабхабом.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл.

	$\sigma_{\text{tot}}(0.0253 \text{ eV})$	$\sigma_{\text{el}}(0.0253 \text{ eV})$	$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$	RI_c
ENDF/B-VII	37.994	0.239	37.455	518.712
FOND-2.2	38.345	0.089	38.257	528.599
JEFF-3.1	40.384	0.934	39.450	528.402
Мухабхаб		0.147	38.500	485.000
		± 0.012	$\pm \mathbf{0.500}$	± 15.000

Как видно, все оценки несколько завышают резонансный интеграл по сравнению с рекомендацией Мухабхаба, который, помимо результатов измерений сечений захвата в резонансной области принимал во внимание и результаты непосредственных измерений резонансного интеграла, что могло явиться причиной занижения оценки из-за недоучета эффекта резонансной самоэкранировки.

Область разрешенных резонансов в рассматриваемых оценках описывается по-разному. В FOND-2.2 даны параметры 121 s-резонанса и 2 p-резонансов; максимальная резонансная энергия – 17340 эВ, однако область разрешенных резонансов распространена только до 4650 эВ (за ней начинается область неразрешенных резонансов). Ниже энергии 1-го резонанса сечения в этой оценке заданы поточечно.

В ENDF/B-VII приводятся параметры только 40 резонансов, максимальная резонансная энергия – 3158 эВ. В тепловой области введена ничтожно малая плавная подложка в сечение захвата. Область разрешенных резонансов простирается до 3200 эВ, после чего следует область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 приводятся параметры 102 резонансов, максимальная энергия – 17340 эВ (как и в ФОНДе, где, однако ниже этой энергии описано на 21 резонанс больше). Область разрешенных резонансов распространена до 15 кэВ; область неразрешенных резонансов отсутствует.

На рис. 1. приведена нарастающая сумма числа s-резонансов.

⁷ Для этой цели по программе NJOY рассчитывался детальный ход сечений в резонансной области и затем с помощью программы INTER рассчитывались нужные величины.

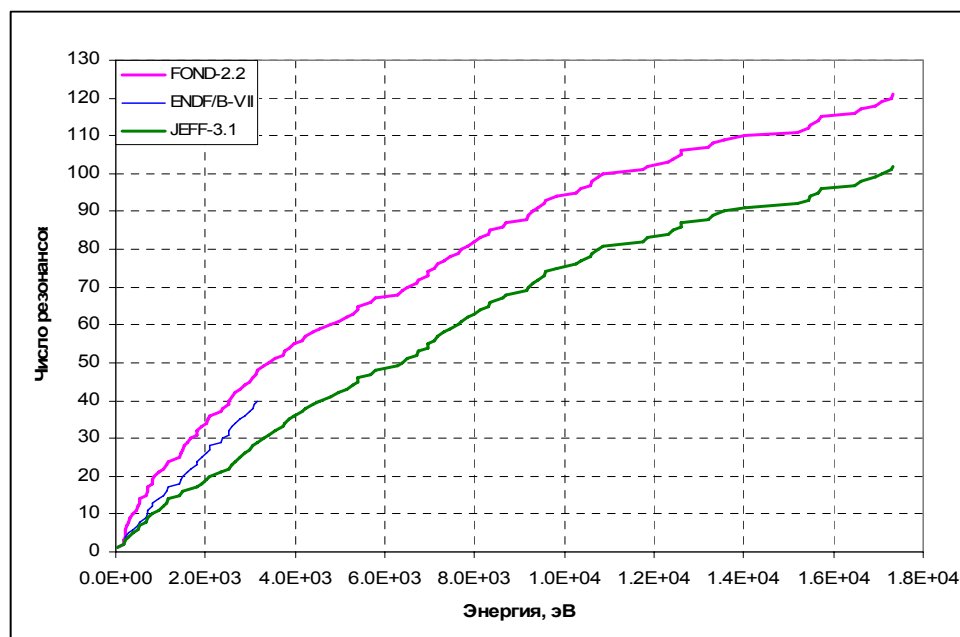


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Наличие пропуска резонансов прослеживается во всех оценках; в ФОНД-2.2 этот пропуск минимален. Поэтому далее только эту оценку резонансных параметров и будем рассматривать. На рис. 2 показана зависимость среднего числа резонансов, приходящихся на 1 кэВ, в зависимости от границы рассматриваемой области.

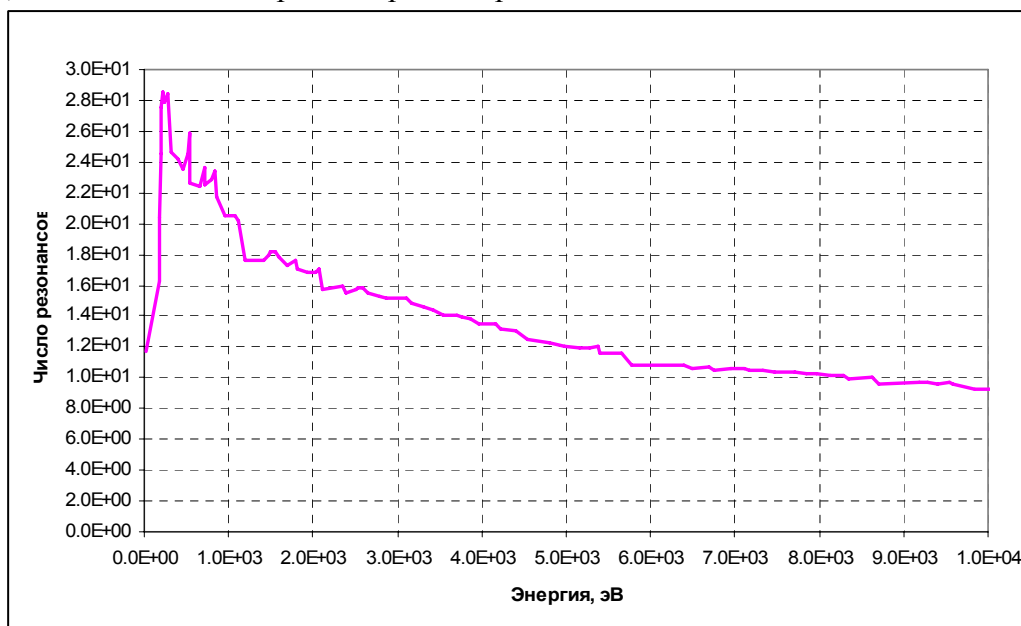


Рис.2. Среднее число резонансов на 1 кэВ.

Видно, что выше 0.5 кэВ это число начинает монотонно снижаться, что и свидетельствует о пропуске части резонансов. К границе области разрешенных резонансов, принятой в ФОНД-2.2 (4.65 кэВ) оказываются пропущенным примерно половина резонансов.

На рис. 3. приведена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин. Судя по тому, что эта сумма нарастает практически линейно, пропущенные резонансы имели малые ширины. Несомненно, именно это обстоятельство и побудило распространить в JENDL-3.3 (и JEFF-3.1) область неразрешенных резонансов до 15 кэВ.

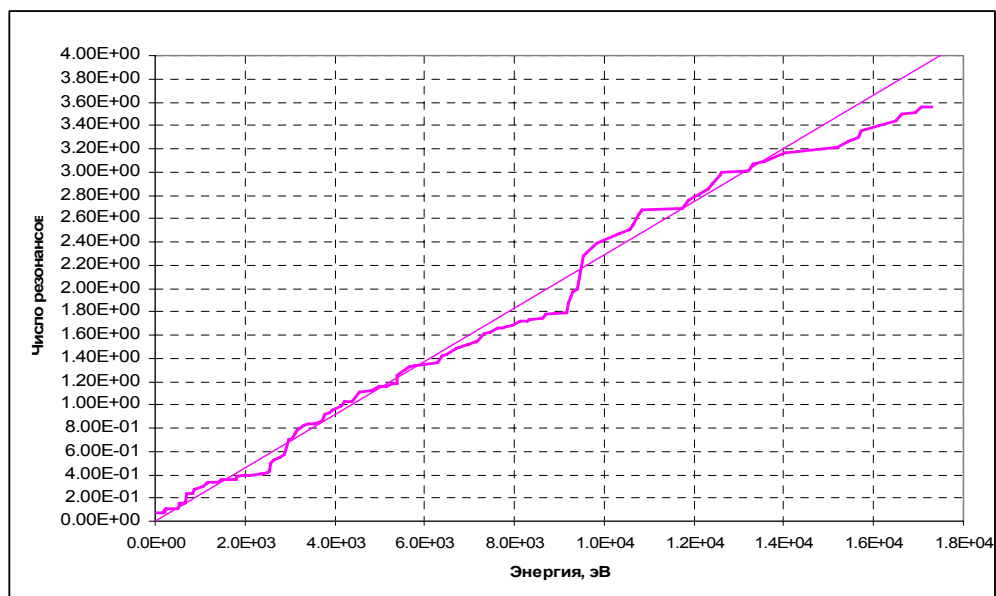


Рис. 3. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин.

Этот рост, однако, опережает рост числа резонансов, что приводит к возрастанию средней приведенной нейтронной ширины в зависимости от интервала усреднения (см. рис.4)

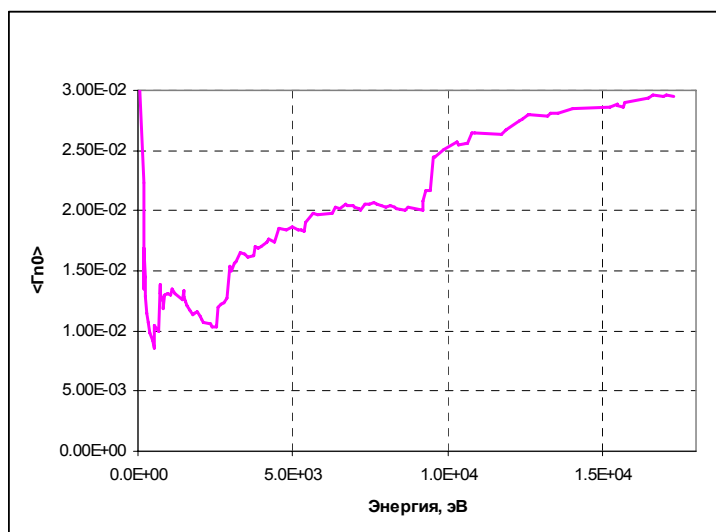


Рис. 4. Зависимость оценки средней приведенной нейтронной ширины от интервала усреднения.

Для того, чтобы уяснить, что за резонансы пропущены, целесообразно сравнить распределение наблюдаемых ширин с распределением Портера-Томаса. Сравнение удобно проводить сравнивая число резонансов, попавших в 10-процентные квантили. Такое сравнение проводится на рис. 5 для различных рассматриваемых энергетических областей. Для каждой из них подбирались такая оценка средней приведенной нейтронной ширины, чтобы отклонения числа резонансов в 5 верхних квантилях (где пропуск резонансов маловероятен) от среднего значения знакопеременны и статистически оправданы (т.е. если ожидаемое число резонансов в квантиле равно n , то наблюдаемое не должно отличаться от него много более, чем на \sqrt{n}). Линии, соответствующие числам n , приведены на рис. 5 пунктиром. Если эти числа умножить на 10, получим ожидаемое число резонансов в рассматриваемом интервале. Если рассматриваемая область ограничена 4.65 кэВ (как в ФОНД-2.2), то ожидаемое число резонансов оказывается равным 56, тогда как реально в этом интервале наблюдается 59 резонансов. Распределение

достаточно близко к Портер-Томасовскому (не считая избытка узких резонансов, к которому еще вернемся ниже). Если рассматриваемую область распространить до 14 кэВ (почти как в JEFF-3.1), то для согласования с распределением Портера-Томаса хотя бы в верхних квантилях, необходимо принять более высокую оценку средней приведенной ширины. При этом в нижних квантилях (не считая первого), проявляется заметный дефицит резонансов. То, что наблюдаемое распределение лишь случайно отклоняется от теоретического, довольно маловероятно (в 2-х случаях из 10 расхождения достигают двух стандартных отклонений). Пропуск резонансов проявляется в том, что по оценке из рассматриваемого распределения их число должно быть равно 124, тогда как число наблюдаемых резонансов - 110.

Если рассматривать область энергий до 9 кэВ, согласие с распределением Портера-Томаса улучшается; ожидаемый из этого рассмотрения пропуск составляет 5 резонансов из 89.

Смущающим обстоятельством является избыток резонансов, лежащих в первом квантиле, ширины которых менее 1.6% от средней ширины. Все эти резонансы (их 14) лежат ниже 2 кэВ. К ним можно добавить еще 2 узких резонанса, которые в данной оценке считаются р-резонансами. Они тоже лежат ниже 2 кэВ. Создается впечатление, что избыток узких резонансов обусловлен примесью р-резонансов, скрывающим пропуск узких резонансов (и р- и s-) при энергиях выше 2 кэВ.

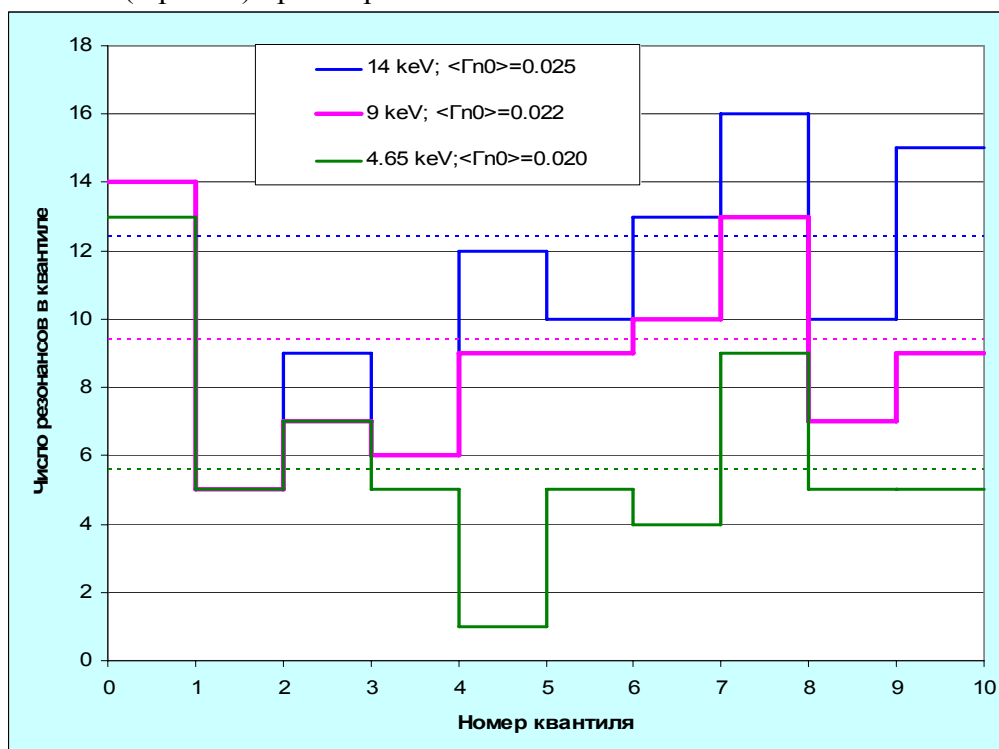


Рис. 5. Сравнение распределения приведенных нейтронных ширин с теоретическим.

Как бы то ни было, проведенное рассмотрение показывает, что расширение области разрешенных резонансов до 14- 15 кэВ, как это сделано в японской оценке, вполне оправдано: нет оснований полагать, что оценка сечений по средним резонансным параметрам позволит повысить точность расчета сечений за счет учета вклада пропущенных слабых резонансов.

Итак, представляется целесообразным **принять в РОСФОНД оценку резонансных параметров Л.П.Абагян, распространив область разрешенных резонансов до 15 кэВ**. Что касается области низких энергий, то поскольку она в этой оценке описывается поточно, целесообразно, **подкорректировать ход сечения рассеяния, так, чтобы обеспечить согласие с оценкой Мухабхаба (см. рис.6).**

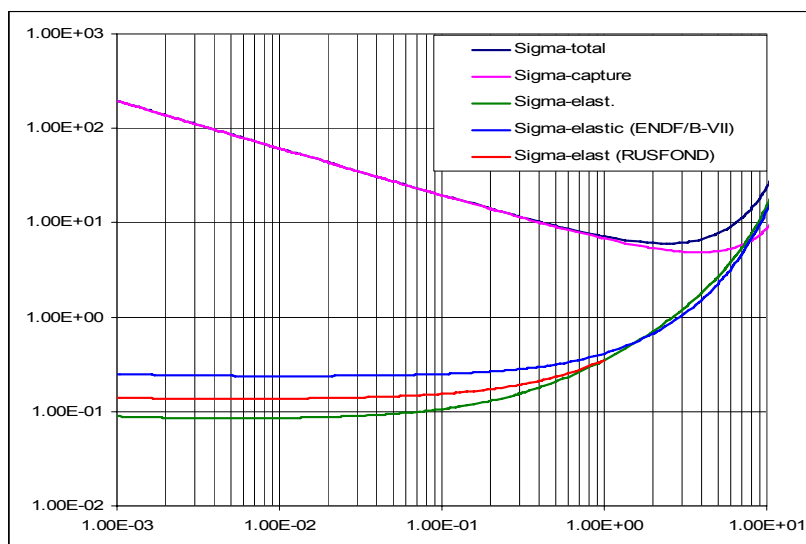


Рис.6. Ход сечений при низких энергиях.

2. Область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 (=JENDL-3.3) область неразрешенных резонансов, как говорилось выше, не описывается; в ENDF/B-VII и в FOND-2.2 она простирается до 100 кэВ (т.е. почти до порога неупругого рассеяния, 123 кэВ), причем приводимые параметры рекомендуются не только для расчета резонансной самоэкранировки, но и самих сечений. В обеих оценках сечения описываются с учетом вкладов s-, p- и d –волн.

Сравнение средних параметров, подобранных для описания измеренных сечений, для выбора оценки смысла, видимо, нет. Сравним результаты расчетов, выполненных на основе этих параметров, с помощью программы NJOY, с экспериментальными данными в интересующей нас области энергий.

На рис. 7. оцененные данные по сечению захвата сравниваются с экспериментальными. Пунктиром проведены результаты расчетов по средним резонансным параметрам. Тонким красным пунктиром приведены результаты ранних расчетов по программе EVPAR⁸, учитывавших только данные Боховко, Кононва (1965) и Капчигашева. Кривая показывает, что описание сечений в терминах средних резонансных параметров позволяет правдоподобно описать сечения далеко за границей области неразрешенных резонансов. В свете всей совокупности экспериментальных данных эта оценка, как и оценка, принятая в ENDF/B-VII, представляется заниженной. В ФОНД-2.2 включена оценка, выполненная с использованием той же программы EVPAR с учетом всего набора имеющихся экспериментов, и с точки зрения качества описания сечения захвата она, очевидно, предпочтительнее. Заметим, что несмотря на то, что ниже этой оценки лежит много большее число экспериментальных точек, чем над кривой, число независимо выполненных работ, в которых эти точки получены, с той и с другой стороны, примерно одинаковы. Низкие значения, полученные Боховко, подтверждаются данными Маклина и поддерживают еще более низкие значения, измеренные ранее Кононовым. Высокие значения, полученные Стависким, подтверждены результатами Мискела и большинством результатов измерений сечения захвата при 24 кэВ.

⁸ Мантуров Г.Н. и др. ВАНТ. Сер. «Ядерные константы». Вып. 1 (50), с.50. М. ЦНИИатоминформ, 1983.

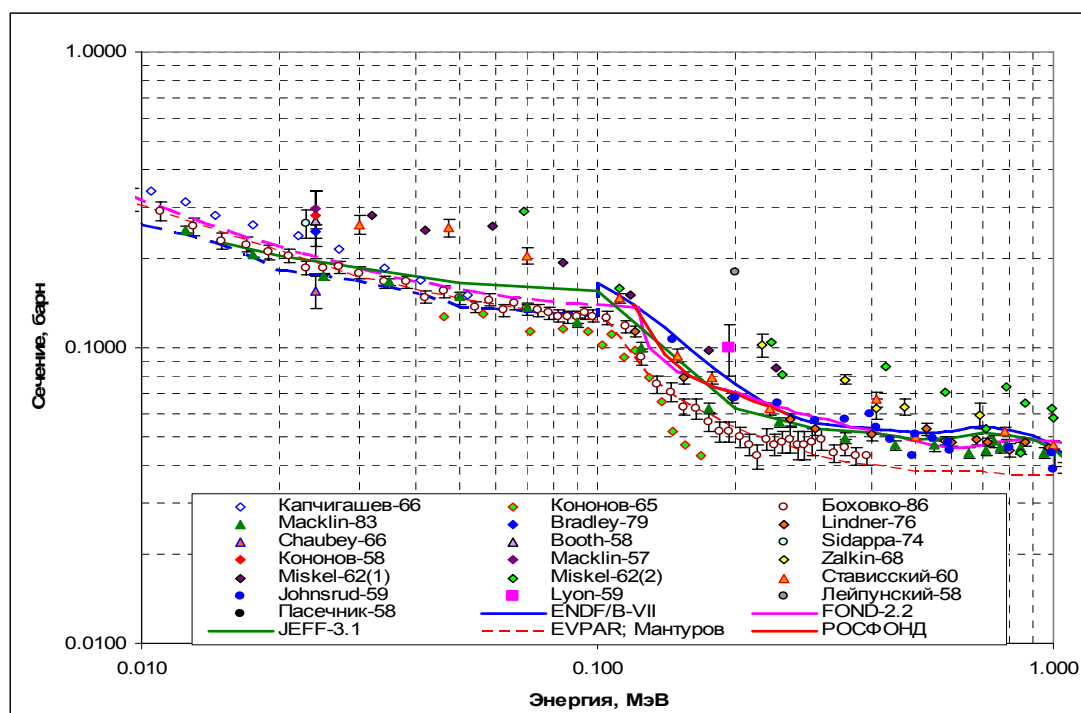


Рис.7. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов и выше.

На рис. 8а проводится сравнение оцененных и измеренных данных по полному сечению. Экспериментальная информация весьма скудна. Данные Бартоломи в EXFORе приводятся в виде пропусканий T через образец толщиной $n=0.0294$ ядер/барн и приведенные здесь сечения получены как $-\ln(T)/n$, т.е. при низких энергиях данные занижены за счет самоэкранировки. При энергиях выше 60 кэВ данные этой работы испытывают необъяснимые флуктуации (шириной в несколько кэВ), то возрастая до 50 барн и более, то проваливаясь до нуля (и ниже: пропускания превышают единицу!) а выше 200 кэВ среднее сечение оказывается равным 16-17 барнам, что противоречит результатам всех остальных измерений (см.также рис.9).

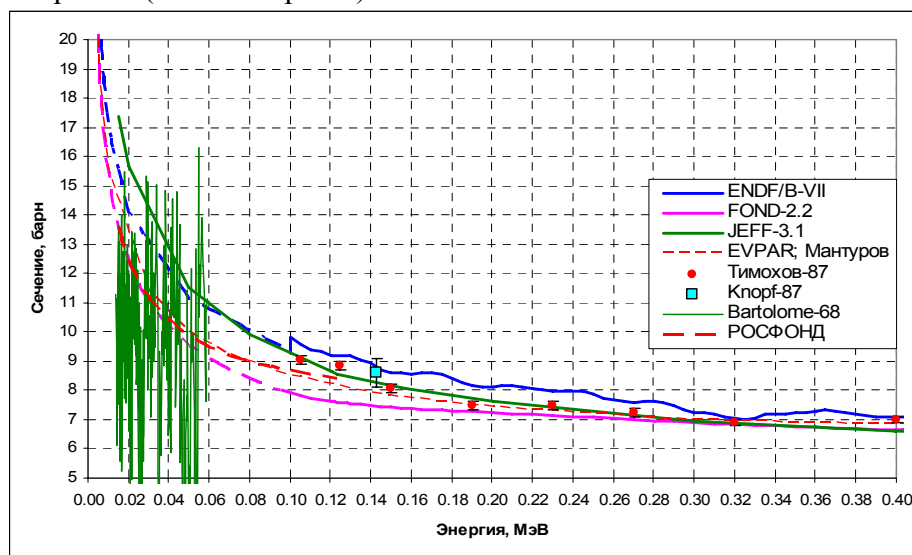


Рис. 8. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

Оценка, принятая в ФОНД-2.2, при 10-15 кэВ представляется заниженной, примерно на 1 барн. Проведенное рассмотрение приводит к заключению, что в области неразрешенных резонансов в РОСФОНД целесообразно принять оценку средних резонансных параметров из ФОНД-2.2; границы области неразрешенных резонансов изменить – от 15 кэВ до 123 кэВ (порог неупругого рассеяния), чтобы “стык” сечения захвата на

верхней границе области неразрешенных резонансов с плавным сечением был естественным; в сечение упругого рассеяния **ввести плавную подложку, возрастающую от нуля на нижней границе области до 1.0 барна на верхней ее границе.** Соответствующая кривая полного сечения изображена на рис. 8 толстой прерывистой линией.

3. Сечения вне резонансной области

3.1. Полное сечение

На рис. 8а различные оценки полного сечения сравниваются с экспериментальными данными. На рис. 8б в более крупном масштабе изображены данные вблизи нижней границы рассматриваемой области. Прежде всего видно, что оценка, принятая в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1, наименее удачна во всех частях области. Данные Дитриха 2003 г., естественно, ни в одной оценке не учитывались. Приписываемая этим данным погрешность не превышает размера точек, изображенных на рис. 8а. При энергиях выше 5 МэВ ближе всего этим данным соответствует оценка, принятая в ФОНД-2.2. Однако при более низких энергиях эта оценка явно завышает полное сечение, поскольку во время ее проведения данные Гюнтера еще не были доступны. Представляется целесообразным при энергиях выше 4.5 МэВ внести в оценку ENDF/B-VII коррективу, обеспечивающую согласие с данными Дитриха, и после этого принять эти данные в РОСФОНД (красная кривая на рис. 8а). В интервале от 0.9 МэВ до 4.5 МэВ оценка полного сечения, принятая в ENDF/B-VII удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными и может быть принята в РОСФОНД. Заметим, что имеющиеся в этой области данные по сечению упругого рассеяния также удовлетворительно описываются оценкой ENDF/B-VII (см. ниже).

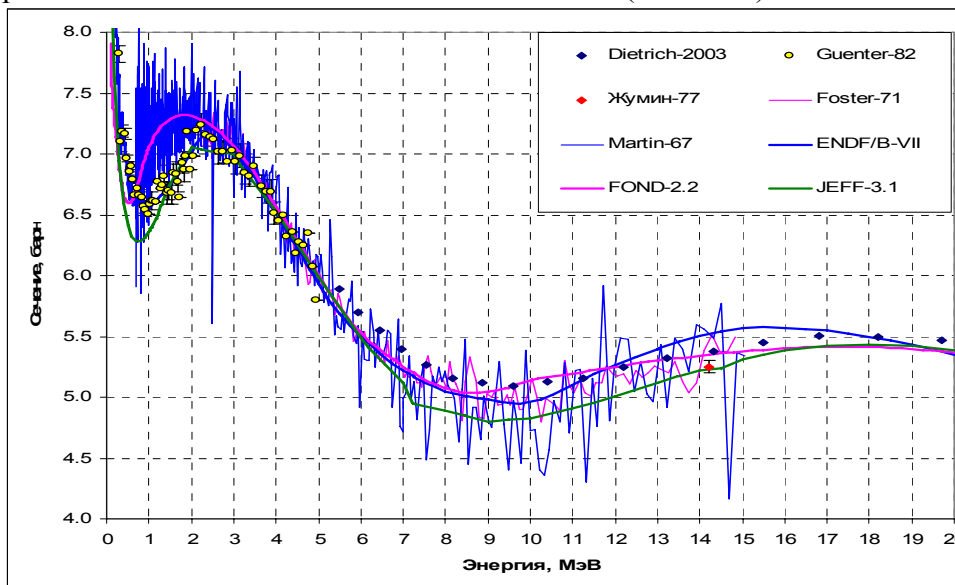


Рис.8а. Полное сечение

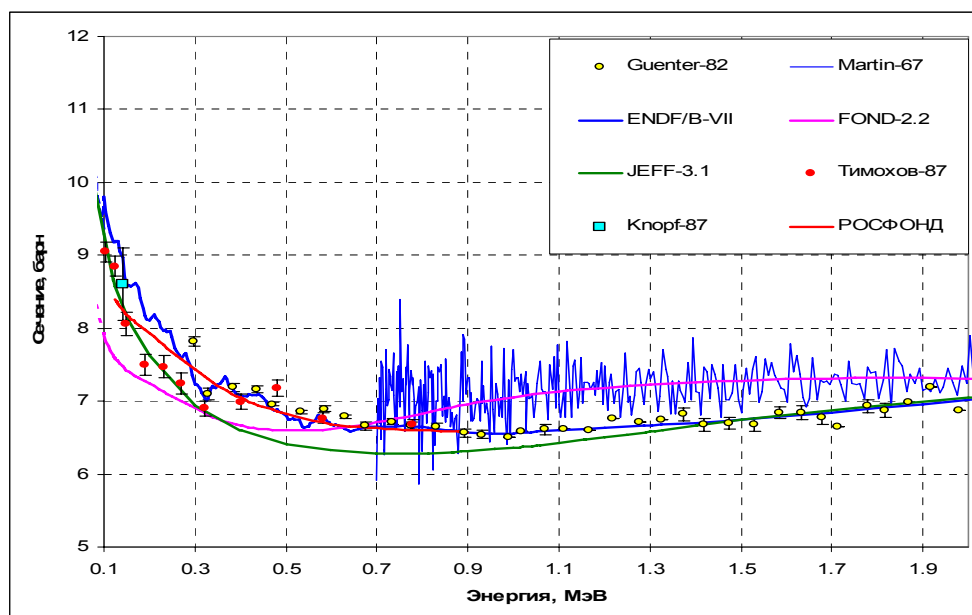


Рис.86. Полное сечение

Ниже 900 кэВ в оценку из ENDF/B-VII требуется внести коррективу для плавного состыкования с результатами расчетов по средним резонансным параметрам (красная кривая на рис.86). Структура, проявляющаяся в принятом в ENDF/B-VII полном сечении известными нам экспериментальными данными не оправдывается. Практической роли эта структура не играет и ее учет (даже если для того и существуют неизвестные нам экспериментальные основания) представляется излишним.

3.2. Сечение упругого рассеяния.

На рис. 9 сравниваются оцененные и измеренные сечения упругого рассеяния. Кривая, соответствующая сечению упругого рассеяния из РОСФОНДа есть разность между полным сечением, обсужденным выше, и сечениями захвата и неупругого рассеяния, которые будут рассмотрены ниже.

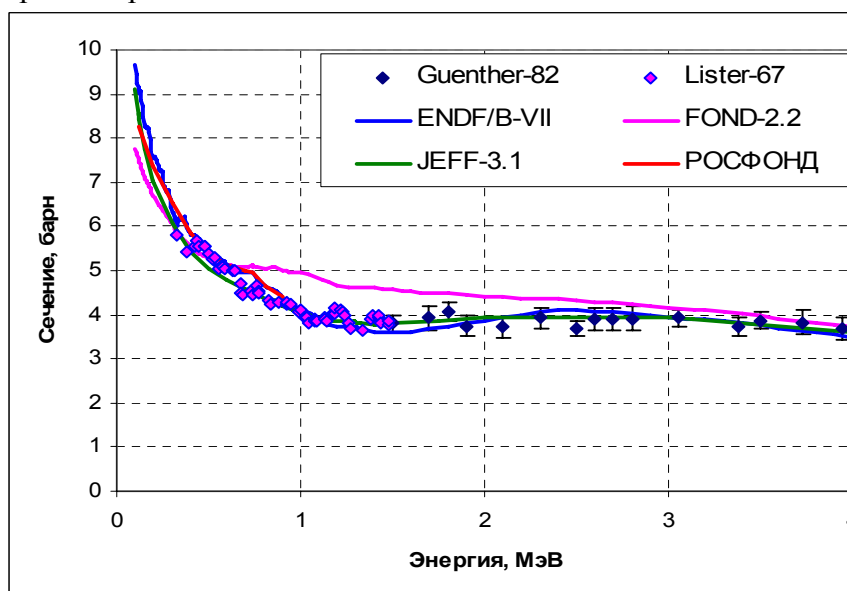


Рис.9. Сечение упругого рассеяния

3.3. Сечение захвата.

На рис.10 и оцененные и измеренные сечения захвата выше 1 МэВ сравниваются друг с другом. При этих энергиях целесообразность выбора оценки ENDF/B-VII очевидна. При энергиях ниже 300 кэВ сравнение оценок и экспериментальных данных показано на рис.7. Очевидно, принимая оценку ENDF/B-VII, целесообразно внести в нее коррективу для состыковки с областью неразрешенных резонансов (см. красную кривую на рис. 10б).

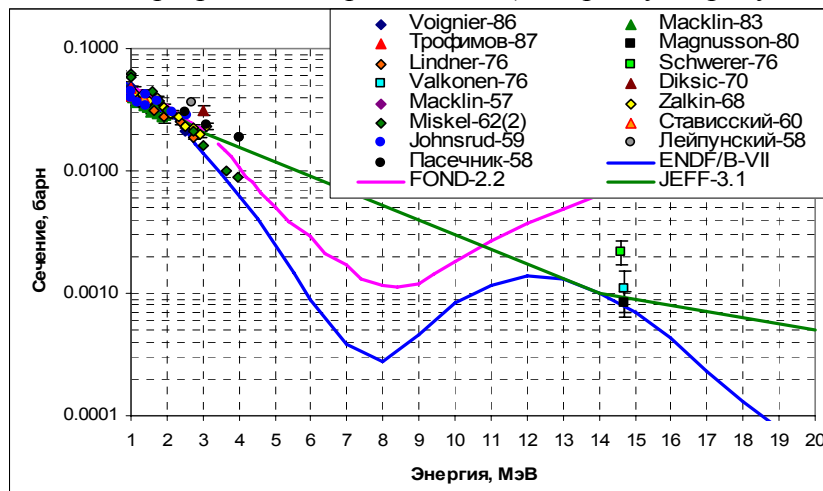


Рис. 10. Сечение радиационного захвата

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния на вольфраме-186 не имеется. На рис. 11 проводится сравнение оцененных данных. Все оценки близки друг к другу и нет оснований не принять в РОСФОНД самую последнюю из них – оценку из ENDF/B-VII.

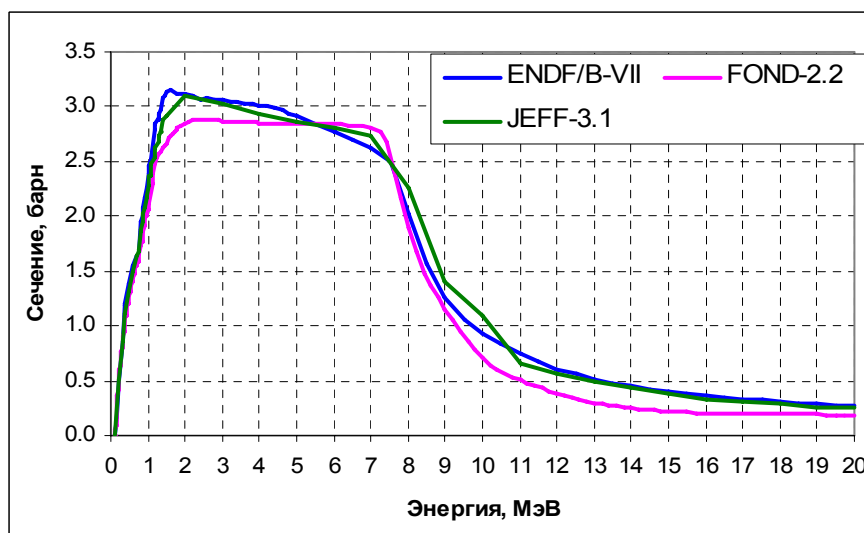


Рис.11. Оцененные сечения неупругого рассеяния.

3.5. Сечение реакции $(n,2n)$, $(n,3n)$, (n,α) и другие.

Экспериментальные данные о сечениях этих реакций сравниваются с оцененными на рис.12. и 13. Как видно, есть все основания принять в РОСФОНД сечения этих реакций из ENDF/B-VII. В ENDF/B-VII приводится также сечение реакций (n,p) и $(n,n'p)$, для которых экспериментальные данные отсутствуют. Вообще говоря, в рассматриваемой области энергий возможны также реакции (n,d) , (n,t) , $(n,n'\alpha)$, $(n,^3\text{He})$, $(n,n'd)$, $(n,n't)$, и $(n,2p)$; оценки сечений этих реакций содержатся в EAF-2003. Сечения первых двух из этих реакций при 20 МэВ составляют 5 - 6 миллибарн, т.е. они сравнимы с сечениями реакций (n,p) и (n,α) . Сечение экзотермической реакции $(n,n'\alpha)$ при 20 МэВ составляет по данным EAF-2003 0.1 миллибарна, а по оценке JENDL-3.3 – в 5 раз больше. Сечения всех этих трех реакций целесообразно включить в РОСФОНД (скомпенсировав это уменьшением сечения упругого рассеяния). Сечения остальных реакций $(n,^3\text{He})$, $(n,n'd)$, $(n,n't)$ и $(n,2p)$ - даже при 20 МэВ не превышают первых микробарн. Учет их в библиотеке РОСФОНД едва ли целесообразен.

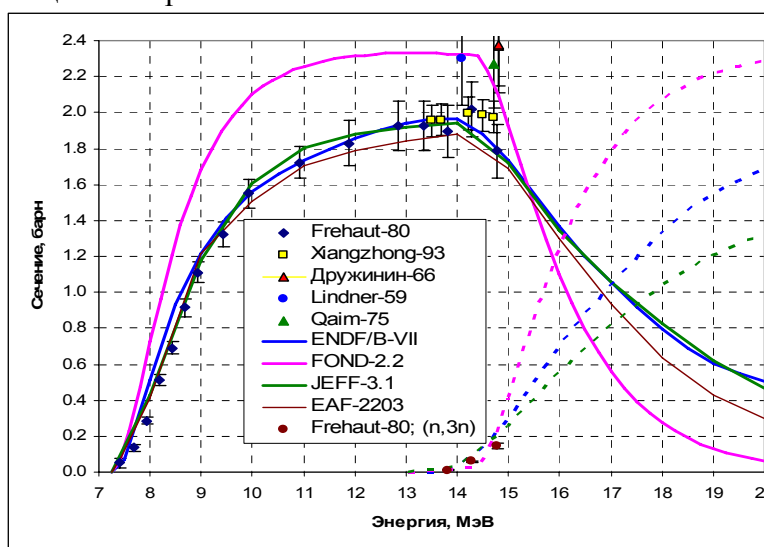


Рис.12. Сечения реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$

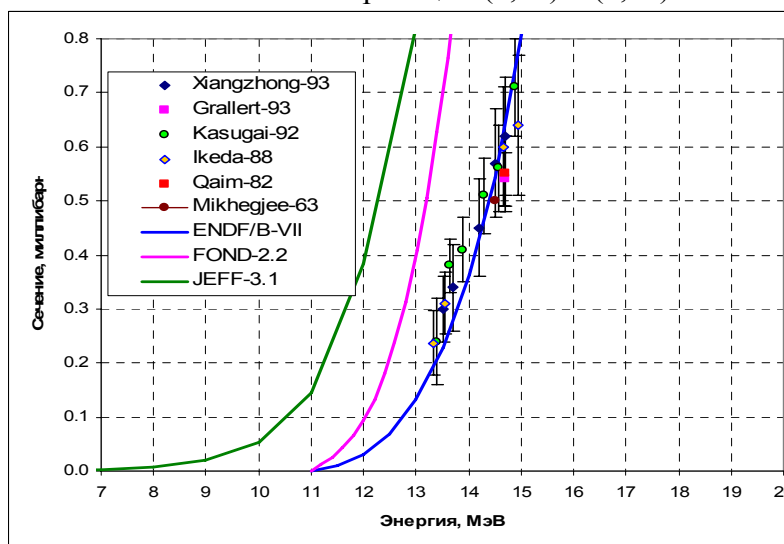


Рис. 13. Сечение реакции (n,α) в области, где имеются экспериментальные данные.

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов и образование гамма-квантов

Приняв в РОСФОНД оценки сечений основных реакций вне резонансной области из ENDF/B-VII, естественно стремление принять из этой библиотеки и данные об энерго-угловых распределениях и об образовании фотонов в нейтронных реакциях, если что-либо не препятствует этому. Таких препятствий не просматривается. В ENDF/B-VII учитывается возбуждение 18 уровней ядра-мишени с энергиями до 1.52 МэВ; первый уровень из числа перечисленных в ENSDF и не учтенный в ENDF/B-VII, лежит при энергии 1.17 МэВ. Все пропущенные уровни имеют высокие спины и их возбуждение нейтронами при энергиях до 1 ю5 МэВ маловероятно. Тем не менее оно приближенно учитывается через возбуждение континуума уровней (которое в этой оценке имеет очень низкий порог –0.3 МэВ). При 2 МэВ и ниже вклад возбуждения континуума в сечении неупругого рассеяния составляет менее 0.2%.

В двух других рассматривавшихся нами оценках учтено возбуждение меньшего числа уровней ядра-мишени, т.е. на долю статистически описываемых процессов приходится больше.

Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов и нейтронов неупруго рассеянных с возбуждением дискретных уровней, рассчитанные по теоретическим моделям, представлены в форме коэффициентов разложения по полиномам Лежандра.

Энергетические и угловые распределения реакций с непрерывным спектром нейтронов в ENDF/B-VII рассматриваются как независимые и описываются файлами MF=4 и MF=5. В оценке, принятой в JEFF-3.1, корреляции этих распределений учтены – они описываются секциями файла MF=6. Целесообразно в РОСФОНД включить энерго-угловые распределения нейтронов из JEFF-3.1 для всех реакций, кроме неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней, поскольку для этой реакции в JEFF-3.1 и в ENDF/B-VII пороги кардинально различаются и потому в РОСФОНДе придется сохранить то же описание, что и в ENDF/B-VII – с помощью файлов MF=4 и MF=5.

Что касается образования фотонов, то оно учтено в ENDF/B-VII для реакций радиационного захвата, неупругого рассеяния, (n,2n) и (n,3n). Эти данные и принимаются в РОСФОНД.

5. Заключение

Для РОСФОНДа следует скомпилировать новый файл данных, основываясь в резонансной области на оценке из ФОНД-2.2, вне резонансной области – на оценке из ENDF/B-VII. Угловые распределения рассеянных нейтронов взять из ENDF/B-VII, а энерго-угловые распределения нейтронов континуальных реакций (кроме MT=91) – из JEFF=3.1. Данные об образовании гамма-квантов принимаются такими, как в ENDF/B-VII.

6. Автор рекомендации –

М.Н.Николаев.

74.9. Вольфрам-187

Радиоактивен. Спин и четность 3/2-. В результате бета-распада ($T_{1/2} = 23.72$ ч.) превращается в ^{187}Re , который обладает огромным ($5 \cdot 10^{10}$ лет) периодом полураспада в ^{187}Os . В реакторе этот изотоп может быть образован в реакции $^{186}\text{W}(n,\gamma)$. Полных оценок нейтронных данных для ^{187}W неизвестно. Экспериментальных данных нет. Оценка сечений нейтронных реакций, основанная на теоретических расчетах и полуэмпирических систематиках, содержится в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из последней версии библиотеки EAF – EAF-2003. Сечения образования конечного ядра в основном и изомерном состояниях в реакции $(n,3n)$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и сумму записать в соответствующую секцию файла MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

74.10. Вольфрам-188

Радиоактивен. Спин и четность 0^+ . В результате бета-распада ($T_{1/2} = 69$ дн.) превращается в ^{188}Re , который с периодом ($T_{1/2} = 16.98$ ч.) распадается в стабильный ^{188}Os . В реакторе этот изотоп может быть образован в ничтожных количествах в результате двух последовательных захватов: $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}(n,\gamma)^{188}\text{W}$. Полных оценок нейтронных данных для ^{187}W неизвестно. Экспериментальных данных нет. Оценка сечений нейтронных реакций, основанная на теоретических расчетах и полуэмпирических систематиках, содержится в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из последней версии библиотеки EAF – EAF-2003.

Автор заключения

Николаев М.Н.