

72. ГАФНИЙ

72.0. Общие замечания

Гафний имеет 6 стабильных изотопов: ^{174}Hf , ^{176}Hf , ^{177}Hf , ^{178}Hf , ^{179}Hf , ^{180}Hf . Два из них имеют долгоживущие изомеры (причем – вторые). Это $^{178}\text{Hf}^m$ ($T_{1/2}=31\text{г.}$) и $^{179}\text{Hf}^m$ ($T_{1/2}=25\text{дн.}$). Имеется еще 4 долгоживущих радиоактивных изотопов гафния: ^{172}Hf , ^{175}Hf , ^{181}Hf , ^{182}Hf .

Имеет место следующее положение с файлами оцененных данных.

Для всех нуклидов имеются оценки нейтронных сечений в библиотеке EAF-2003(последняя версия). Там содержатся также данные об образовании изомерных состояний ядер-продуктов. Для радионуклидов оценка выполнялась, в основном, на основе теоретических моделей с параметрами, подобранными для описания сходных ядер.

Для стабильных изотопов полные наборы оцененных данных содержатся в библиотеках ENDF/B-VII.b2, JENDL-3.3, и JEFF-3.1.

ENDF/B-VII.b2 содержит оценки, базой для которых послужили файлы, созданные в 1976 г. М.Дрейком и др. (M.Drake, D.Sarges, T.Moung et al). Резонансная область опиралась на оценки резонансных параметров начала 70-х годов. Вне резонансной области оценка опиралась, в первую очередь на имеющиеся экспериментальные данные. В ENDF/B-VII.b2 включены файлы данных из ENDF/B-VI, в которых в 1991 г. Райтом (R.Q.Wright) были пересмотрены данные в области как разрешенных резонансов (приняты параметры, рекомендованные в компиляции Мухабхаба 1984 г.), так и в области неразрешенных резонансов.

JENDL-3.3 содержит оценки, базой для которых послужили файлы, созданные Хиды, Йошида и Шибата (Hida, Yoshida, Shibata) в 1989 г. для JENDL-3. В 1994 г. Накагава (T.Nakagawa) пересмотрел данные по сечениям упругого и неупругого рассеяния. В 2004 г. Шибата ввел еще ряд усовершенствований, в частности принял секцию Резонансных параметров из ENDF/B-VI.

JEFF-3.1 содержит оценки, базой для которых послужили файлы из JENDL-3.3, в которых были изменены параметры резонансов при энергии ниже 200 эВ на основе результатов новых измерений¹. Для расчетов рекомендована формула Райха-Мура, а не многоуровневая формула Брейта-Вигнера, как ранее. Небольшие коррективы внесены и параметры резонансов при более высоких энергиях.

Из сказанного ясно, что наиболее поздней и, вероятно, наиболее корректной оценкой нейтронных данных для стабильных изотопов является JEFF-3.1. Насколько это заключение оправдано будет ясно из рассмотрения данных для каждого изотопа в отдельности.

Следует подчеркнуть, что в JEFF-3.1 и в JENDL-3.3 намного подробнее описывается неупругое рассеяние; представлены сечения по большему числу реакций.

Наконец, заметим, что в библиотеке ФОНД-2.2 полный файл для природного гафния принят из библиотеки ENDF-78 (оценка Хавертона), а для стабильных изотопов приняты файлы из JENDL-2. Для радиоактивных изотопов в эту библиотеку были включены только данные о нейтронных сечениях из ADL-3 (библиотеке, положенной в основу EAF-2003, но в значительной степени устаревшей).

¹ Trbovich M.J. et al. Int. Conf. on Nucl. Data for Sci & Techn. Santa Fe, USA, 2004.

72.1. Гафний-172

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.87$ г.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в лютеций-174, которых, в свою очередь, тем же путем превращается ($T_{1/2}=6.7$ дн.) в стабильный иттербий-174. В реакторах может образовываться в малых количествах за счет реакций $^{174}\text{Hf}(n,3n)$ или $^{174}\text{Hf}(n,2n)$ $^{173}\text{Hf}(n,2n)$. Последняя маловероятна, поскольку ^{173}Hf имеет период полураспада менее суток, первая – из за высокого порога реакции.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7272.

Автор заключения

Николаев М.Н.

72.2. Гафний-174

Содержание в естественной смеси 0.16%.

1. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба². На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

	$\sigma(0.0253\text{эВ})$	RI
JEFF-3.1	549.5	442.3
ENDF/B-VIIb2	561.8	355.2
JENDL-3.3	561.5	363.1
FOND-2.2	390	492
Мухабхаб-03 ²	549.7 \pm 7	436 \pm 35

² S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

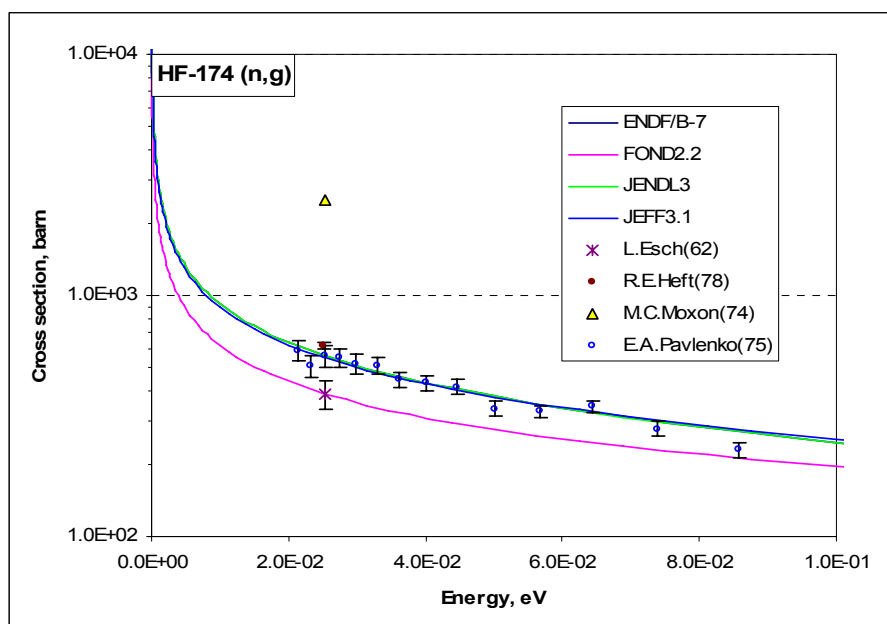


Рис. 1. Сечение захвата

На рис.2. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. Из приводимых данных очевидно преимущество JEFF-3.1.

Область разрешенных резонансов во всех оценках содержит 10 резонансов при энергиях выше энергии связи нейтрона, и простирается до 220 -230 эВ. В JEFF-3.1 эта граница 220 эВ, что вполне оправдано при энергии последнего резонанса 211 эВ.

Область неразрешенных резонансов распространена до 50 кэВ, как и JENDL-3.3. В ENDF/B-VII эта область распространена до 90 кэВ при независимых от энергии средних параметрах.

Вывод ясен: в резонансной области в РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1

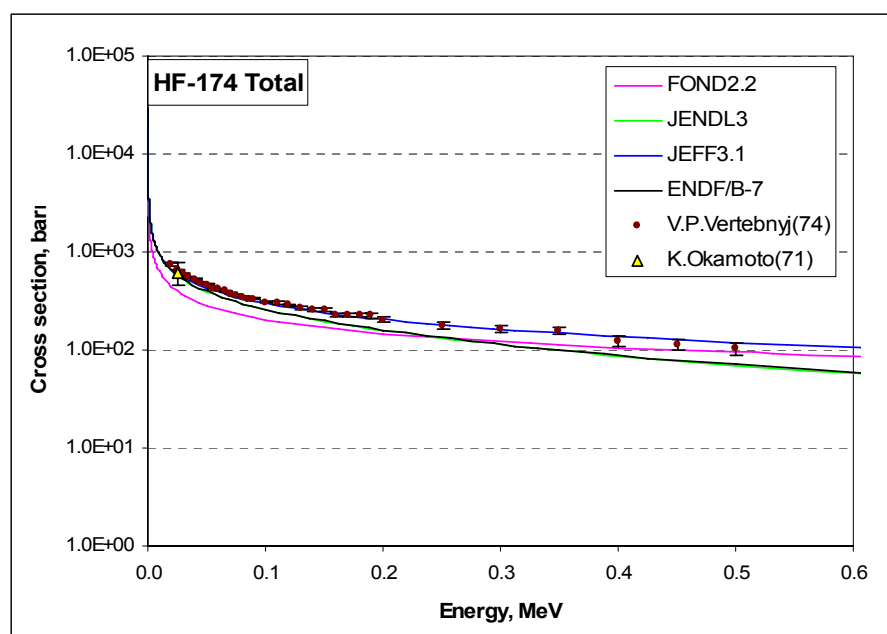


Рис.2. Полное сечение.

2. Данные вне резонансной области

На рис.3. оцененные данные по сечению неупругого рассеяния (толстые линии) и реакциям (n,2n) (тонкие линии) и (n,3n) (пунктир) сравниваются друг с другом. Данные

JEFF-3.1 в точности совпадают с таковыми из JENDL-3.3 и потому не изображены. Данные о реакции (n,3n) в ФОНД-2.2 и в ENDF/B-VII отсутствуют.

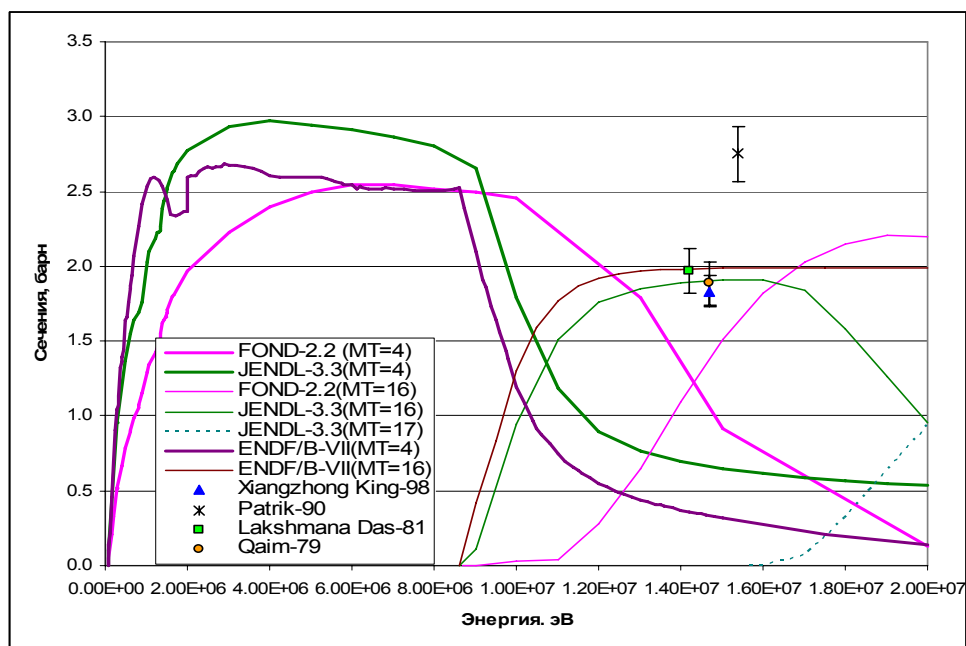


Рис. 3. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n).

Вне резонансной области кроме полного сечения (см. рис. 2) имеются результаты измерений только сечения реакции (n,2n), которые согласуются друг с другом кроме явно завышенного результата Патрика.

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 описывается возбуждение 18 дискретных уровней при неупругом рассеянии; в ENDF/B-VIIb2 только 3. Это ясно проявилось в поведении полного сечения неупругого рассеяния. Зато в этой оценке описывается сечение реакции (n,p), в результате которой с вероятностью около 40% образуется изотоп $^{174}\text{Lu}^m$ с периодом полураспада 142 дня. К сожалению, ни в JEFF-3.1, ни в JENDL-3.3 данные об этой реакции отсутствуют. Ввести сечение этой реакции в файл данных JEFF-3.1 перед включением его в РОСФОНД оказалось не просто, поскольку имеющиеся оценки величины сечения различаются весьма сильно: согласно ENDF/B-VIIb2 при 20 МэВ сечение этой реакции равно 265 миллибарн, а согласно EAF-2003 – всего 5.8 миллибарн. Точно такое же сечение этой реакции было и в библиотеке JENDL-2 (а, следовательно, в в ФОНД-2.2), в которой, кстати, наличествовала и реакция (n, α). Число дискретных уровней, возбуждаемых при неупругом рассеянии, как и в JENDL-3.3 равно 18. Причина, по которой при переходе от JENDL-2 к JENDL-3 из рассматриваемых реакций исчезли (n,p) и (n, α), неизвестны.

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1. В дальнейшем целесообразно ее дополнение данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях и данными об образовании долгоживущего изомера $^{174}\text{Lu}^m$. Сделать это используя данные EAF-2003 невозможно, поскольку в этой библиотеке энергии реакции (n,p) приписано значение +5.145 МэВ, что привело к тепловому сечению достигающему 1 барн. В действительности энергия этой реакции равна – 2.71 МэВ.

Авторы заключения

Забродская С.В., Николаев М.Н.

72.3. Гафний-175

Радиоактивен ($T_{1/2}=70$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный лютеций-174. В реакторах может образовываться в малых количествах за счет реакций $^{174}\text{Hf}(n,\gamma)$ или $^{176}\text{Hf}(n,2n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущего изомера – $^{174}\text{Lu}^m$ – перенести в файл MF=9. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Файлу присвоить MAT=7275.

Автор заключения

Николаев М.Н.

72.4. Гафний-176

Содержание в естественной смеси 5.26%.

1. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба³. На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Как видно, разброс экспериментальных данных весьма велик и погрешность, приписанная Мухабхабом сечению захвата, вероятно, занижена. Сечение захвата при более высоких энергиях изображено на рис. 1б. Современные оценки опираются на данные Бира и не учитывают поле поздние и подробные результаты Боховко. Вследствие этого в области 300 – 450 кэВ сечение захвата, видимо, существенно недооценено.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

	$\sigma(0.0253\text{эВ})$	RI
JEFF-3.1	21.3	694.3
ENDF/B-VIIb2	13.76	401.3
JENDL-3.3	23.48	893.1
FOND-2.2	38.0	360
Мухабхаб-03 ³	23.5 ± 3.1	880 ± 40

³ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

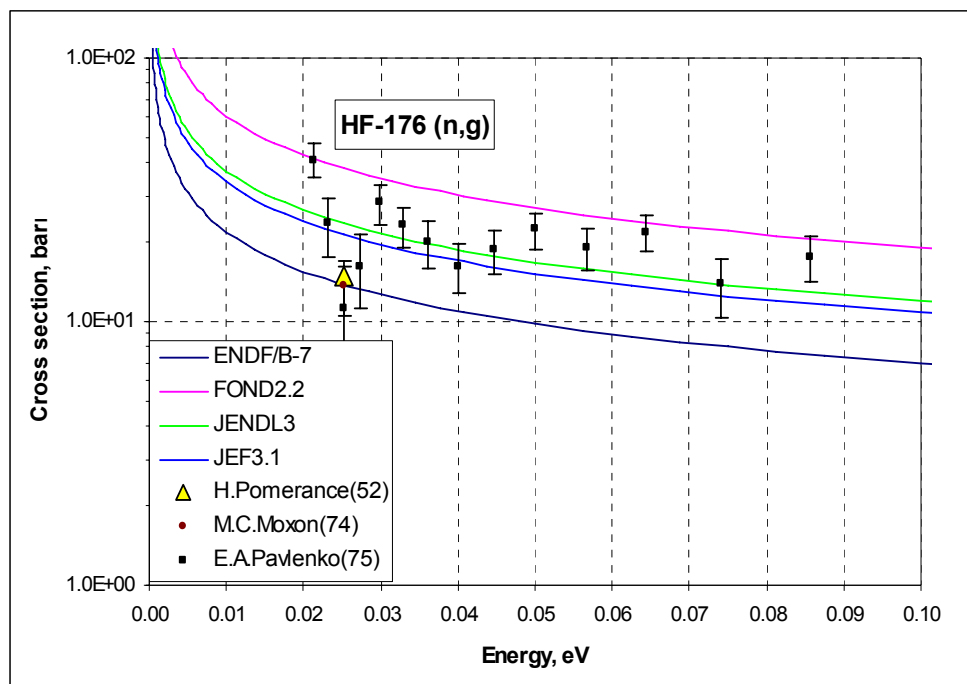


Рис. 1а. Сечение захвата

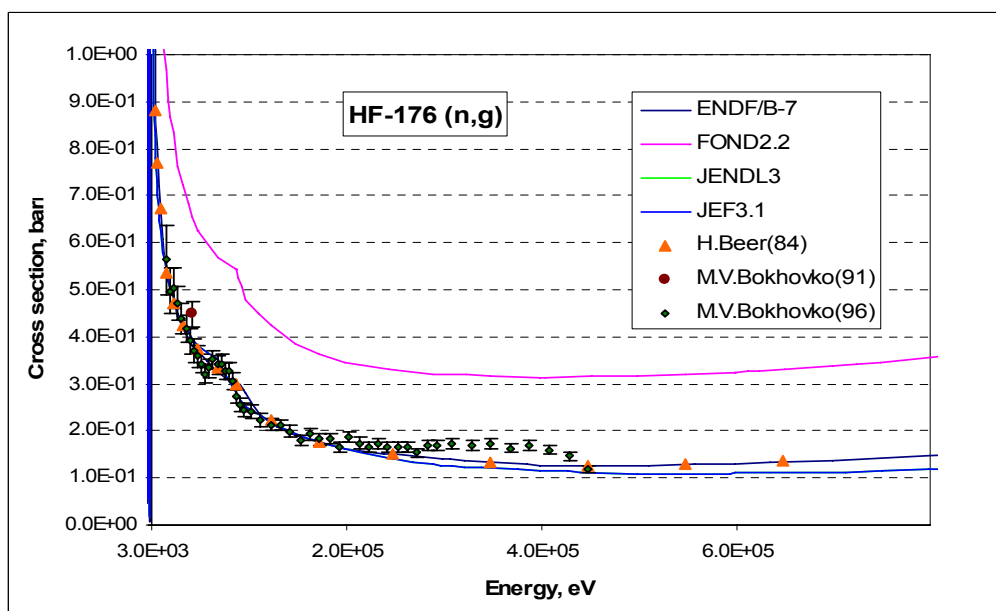


Рис.1б. Сечение захвата

На рис.2. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. Разброс экспериментальных данных весьма велик и не позволяет ни отдать предпочтение той или иной оценке, ни помочь в разрешении противоречия в данных по сечению захвата. Единственный эксперимент по сечению рассеяния тепловых нейтронов был выполнен Вертебным (1974) и дал 15 ± 3 барна, что намного превышает оцененные значения (5.5 барна в JENDL-3.3 и JEFF_3.1 и 6.7 барна в ENDF/B-VII)

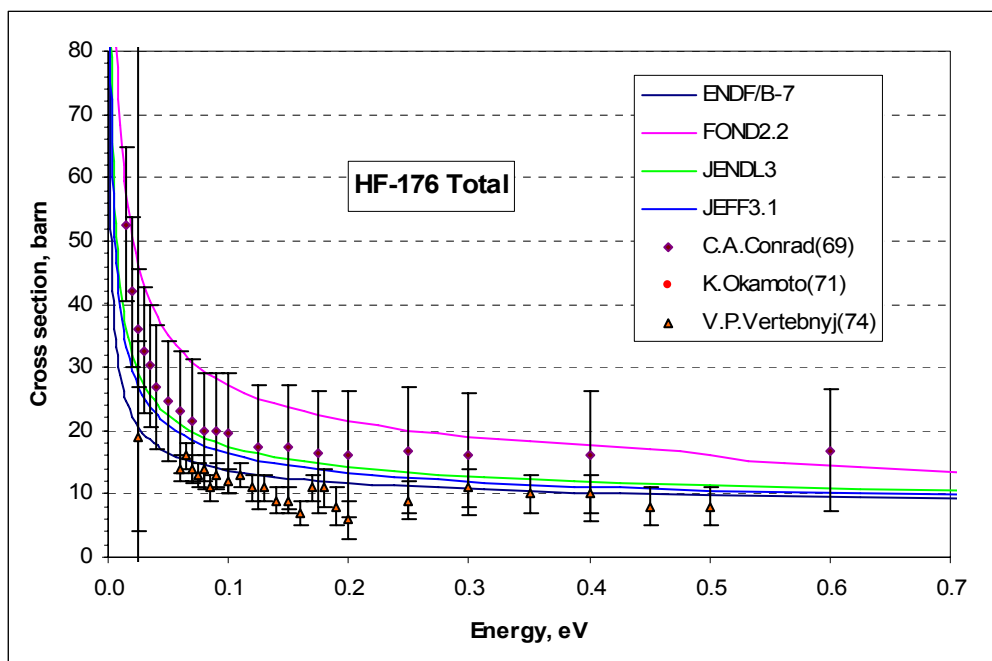


Рис.2. Полное сечение

Область разрешенных резонансов во всех оценках содержит 22 резонанса при энергиях выше энергии связи нейтрона, и простирается до 700 эВ в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 и до 1080 эВ в ENDF/B-VII. В ENDF/B-VII и JEFF-3.1 введено два связанных состояния, для описания аномального поведения сечений в тепловой области, в JENDL-3.3 – одно. Тем не менее, как видно из рисунков, различие сечений между в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 меньше, чем между ними и ENDF/B-VII.

В JEFF-3.1и JENDL-3.3 область разрешенных резонансов ограничена 700 эВ, хотя энергия последнего резонанса равна 1064 эВ. В ENDF/B-VII эта граница установлена при 1080 эВ. Разумеется, в верхней части области разрешенных резонансов в этом случае имеет место пропуск части уровней (см. рис. 3). Однако характер энергетической зависимости нарастающей суммы приведенных нейтронных ширин указывает на то, что пропущены только слабые уровни. Из рис. 3 можно оценить, что среднее расстояние между резонансами составляет 33.3 эВ. Следовательно, в интервале до 1080 эВ пропущено, примерно, 10 резонансов, из которых 4 – в области ниже 700 эВ. Наиболее корректно было бы учесть вклад пропущенных резонансов введением плавной подложки, но коль скоро это не сделано, лучше детально учесть ход сечений в разрешенных сильных резонансах, чем описывать все резонансы из статистических соображений, оснований для которых, при скудости экспериментальных данных, не много.

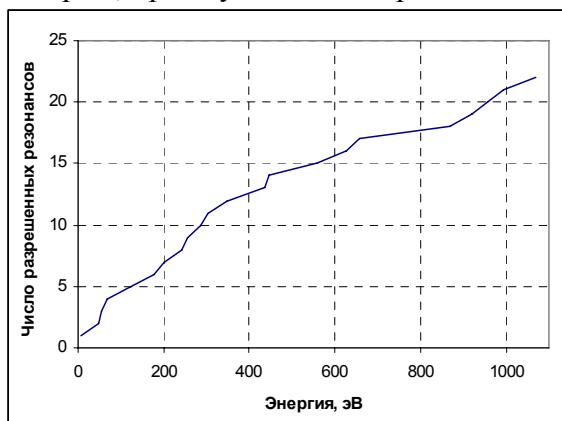


Рис.3. Нарастающая сумма числа резонансов

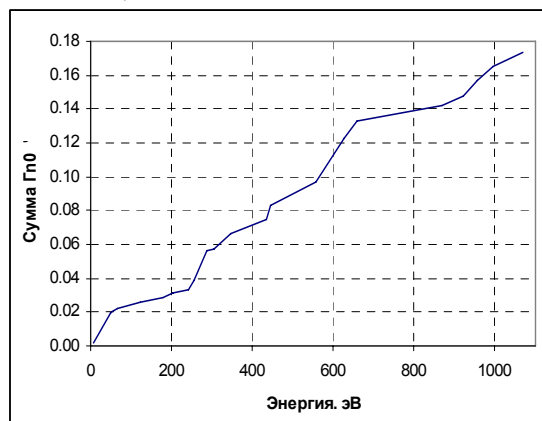


Рис.4. Нарастающая сумма приведенных ширин

Учитывая, что в JEFF-3.1 параметры низколежащих уровней уточнены на основе дополнительной экспериментальной информации, в РОСФОНД целесообразно принять именно эту оценку. Однако область разрешенных резонансов целесообразно продлить до 1080эВ, как в ENDF/B-VII.

Область неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII распространена до 90 кэВ, т.е. до порога неупругого рассеяния. Приведенные нейтронные и радиационные ширины и среднее расстояние между уровнями для всех значений четности и орбитального момента (учтены вклады s-, p- и d-волн) от энергии не зависят. Для s-волны силовая функция равна $2.5 \cdot 10^{-4}$, радиационная $-15 \cdot 10^{-4}$, и та и другая находятся в полном соответствии с оценкой по области разрешенных резонансов.

В японской оценке, принятой и в JEFF-3.1, плотность уровней возрастает с энергией, а нейтронные ширины сокращаются, так что нейтронная силовая функция остается постоянной и равной для s-волны $1 \cdot 10^{-4}$, радиационная силовая функция на нижней границе области равна $20 \cdot 10^{-4}$, а к 50 кэВ дорастает до $36 \cdot 10^{-4}$. Радиационная силовая функция растет, поскольку радиационные ширины приняты независимыми от энергии.

Характер резонансных параметров, принятых в ENDF/B-VII, несомненно, более физически оправдан (по крайней мере, для s-волны). Однако значения этих параметров, как видно, из рис. 1б, подобраны неудачно и на границе области неразрешенных резонансов следующее из них сечение захвата оказывается заниженным втрое. Поэтому в РОСФОНД по необходимости следует принять оценку в области неразрешенных резонансов из JENDL-3.3 (=JEFF-3.1). При этом без дополнительных исследований расширять границу этой области нет оснований.

2. Данные вне резонансной области

На рис.3. оцененные данные по сечению неупругого рассеяния (толстые линии), реакциям (n,2n) (тонкие линии) и (n,3n) (пунктир) сравниваются друг с другом. Данные JEFF-3.1 в точности совпадают с таковыми из JENDL-3.3 и потому не изображены. Данные о реакции (n,3n) в ФОНД-2.2 и в ENDF/B-VII отсутствуют.

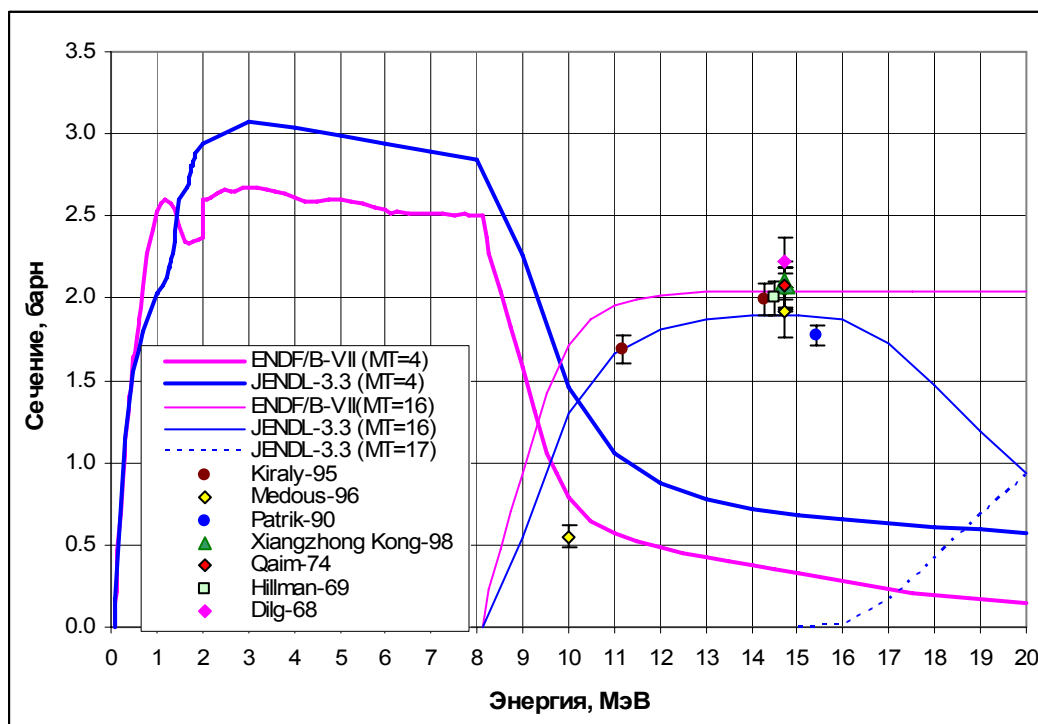


Рис. 3. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n).

Вне резонансной области кроме полного сечения (см. рис. 2) имеются результаты измерений только сечения реакции (n,2n), которые согласуются друг с другом кроме, повидимому, заниженного результата Медоуза про 10 МэВ.

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 описывается возбуждение 23 дискретных уровней при неупругом рассеянии; в ENDF/B-VIIb2 только 3. Это ясно проявилось в поведении полного сечения неупругого рассеяния.

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1. Границу области разрешенных резонансов переместить на 1080 эВ. В дальнейшем целесообразно дополнение оценки данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях и усовершенствование описания области неразрешенных резонансов.

Авторы заключения

Забродская С.В., Николаев М.Н.

72.5. Гафний-177

Содержание в естественной смеси 18.60%.

1. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба⁴. На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Как видно, экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом. Выше 0.05эВ современные оценки лежат несколько выше данных Павленко. Сечение захвата при более высоких энергиях изображено на рис. 1б. Современные оценки опираются на данные Бира и не противоречат более поздним и подробным результатам Боховко при энергиях выше 100 кэВ. При энергиях порядка десятков кэВ расхождения результатов двух последних авторов существенно: достигает 20%.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

	$\sigma(0.0253\text{эВ})$	RI
JEFF-3.1	371.9	7211
ENDF/B-VIIb2	373.5	7175
JENDL-3.3	373.5	7208
FOND-2.2	352	6950
Мухабхаб-03 ⁴	373±10	7173±200

⁴ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

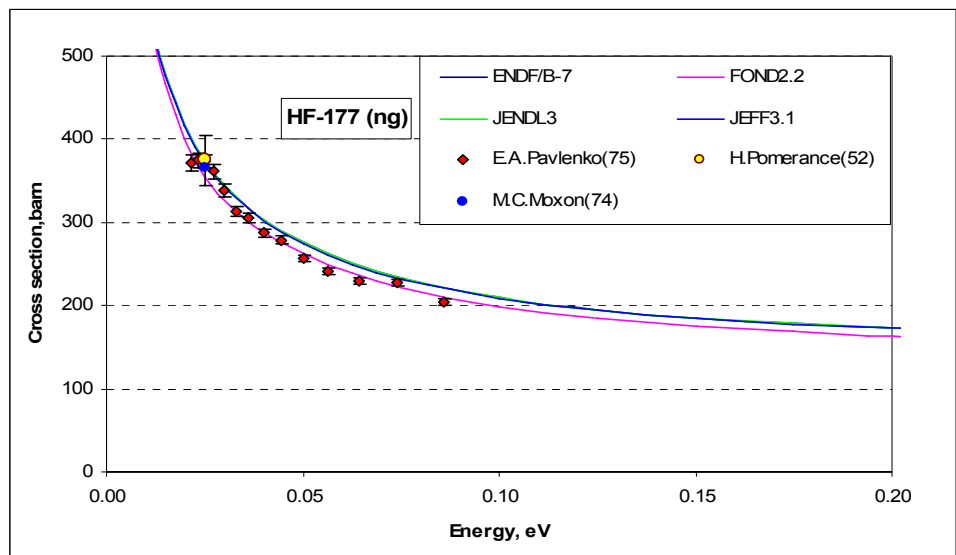


Рис. 1а. Сечение захвата

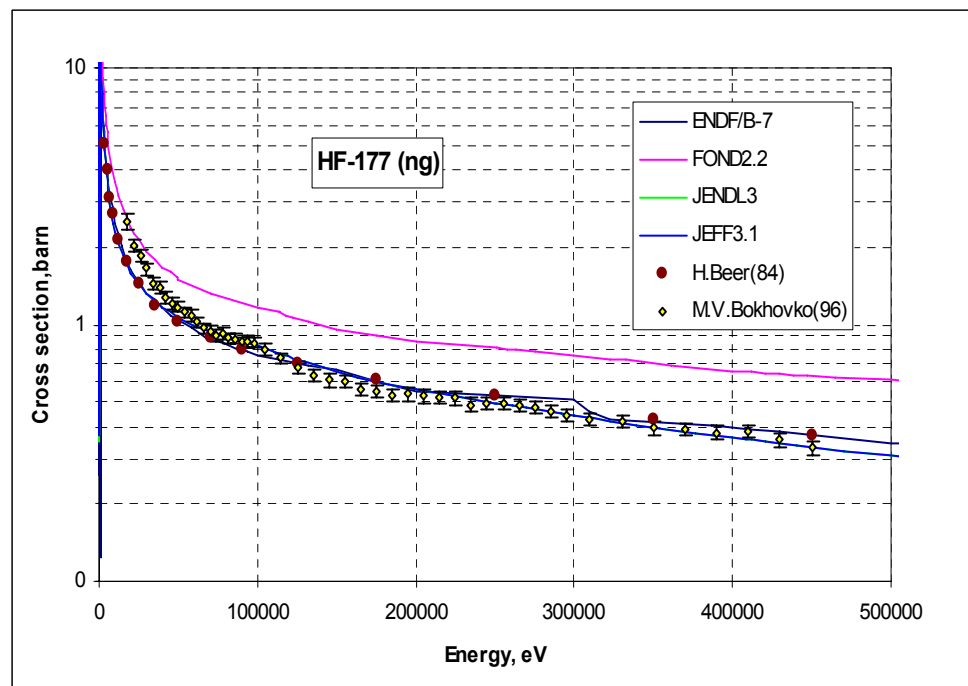


Рис.1б. Сечение захвата

На рис.2. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. Согласие оценок с экспериментальными данными вполне приемлемое.

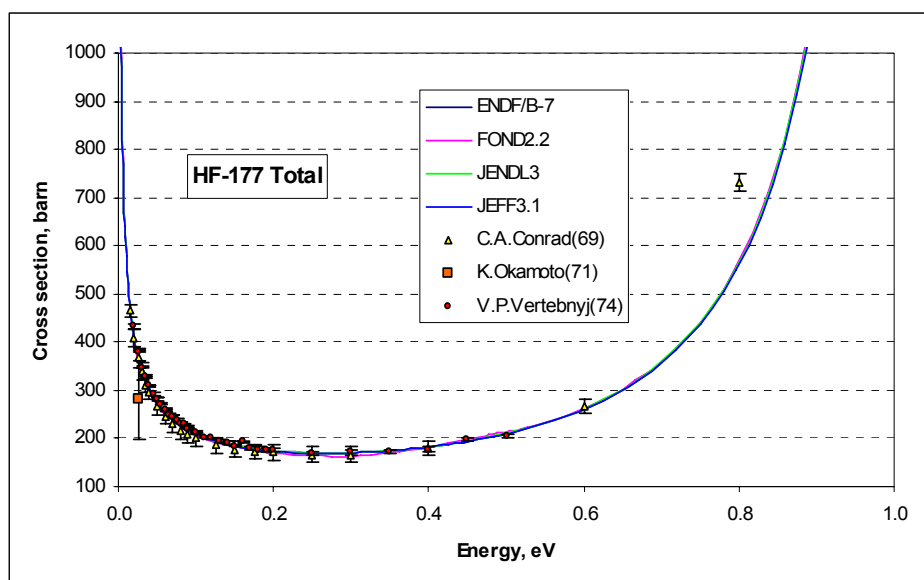


Рис.2. Полное сечение

Область разрешенных резонансов во всех оценках содержит 180 резонансов при энергиях выше энергии связи нейтрона. Связанные состояния ни в одной оценке не введены.

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 область разрешенных резонансов ограничена 250 эВ, хотя энергия последнего резонанса равна 696.6 эВ. В ENDF/B-VII эта граница установлена при 700 эВ. Разумеется, в верхней части области разрешенных резонансов в этом случае имеет место пропуск части уровней (см. рис. 3). Однако характер энергетической зависимости нарастающей суммы приведенных нейтронных ширин указывает на то, что пропущены только слабые уровни. Из рис. 3 можно оценить, что среднее расстояние между резонансами составляет 2.6 эВ. Следовательно, в интервале до 700 эВ пропущено, примерно, 90 резонансов, и все – выше 240 эВ. Это более половины всех резонансов и пренебрегать их вкладом не следовало бы. Наиболее корректно было бы учесть вклад пропущенных резонансов введением плавной подложки, но коль скоро это не сделано, в ENDF/B-VII решено, что детально учесть ход сечений в разрешенных сильных резонансах и пренебречь остальными лучше, чем описывать все резонансы из статистических соображений, оснований для которых, при скудости экспериментальных данных, не много. В случае гафния-176, где число резонансов в сомнительной области было мало, с этим можно было согласиться. В рассматриваемом же случае число резонансов велико и имеются достаточные основания для описания структуры сечений средними резонансными параметрами.

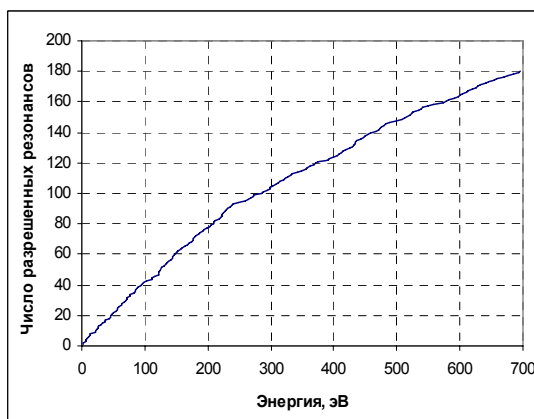


Рис.3. Нарастающая сумма числа резонансов

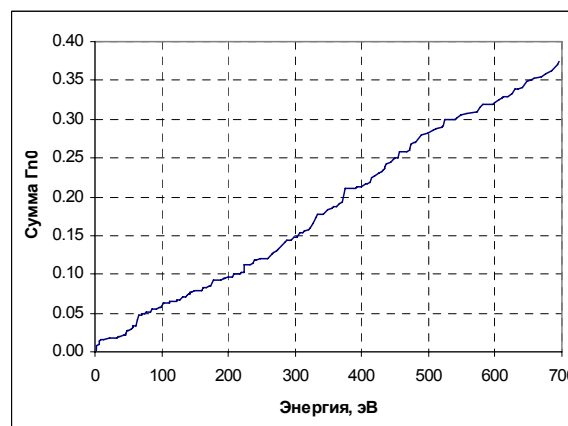


Рис.4. Нарастающая сумма приведенных ширин

Область неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII распространена до 90 кэВ, т.е. почти до порога неупругого рассеяния. Приведенные нейтронные и радиационные ширины и среднее расстояние между уровнями для всех значений четности и орбитального момента (учтены вклады s-, p- и d-волн) от энергии не зависят. Для s-волны силовая функция равна $1.7 \cdot 10^{-4}$, радиационная $-120 \cdot 10^{-4}$; ни одна из них не соответствует оценкам по области разрешенных резонансов: $(5.36 \cdot 10^{-4})$ и $250 \cdot 10^{-4}$.

В японской оценке, принятой и в JEFF-3.1, плотность уровней возрастает с энергией, а нейтронные ширины сокращаются, так что нейтронная силовая функция остается постоянной и равной для s-волны $2.5 \cdot 10^{-4}$, радиационная силовая функция на нижней границе области равна $79 \cdot 10^{-4}$, а к 50 кэВ дорастает до $114 \cdot 10^{-4}$. Радиационная силовая функция растет, поскольку радиационные ширины приняты независимыми от энергии.

Таким образом, противоречие в силовых функциях в области разрешенных и неразрешенных резонансов имеет место в обеих сравниваемых оценках.

2. Данные вне резонансной области

На рис.3. оцененные данные по сечению неупругого рассеяния (толстые линии), реакциям (n,2n) (тонкие линии) и (n,3n) (пунктир) сравниваются друг с другом. Данные JEFF-3.1 в точности совпадают с таковыми из JENDL-3.3 и потому не изображены. Данные о реакции (n,3n) в ФОНД-2.2 и в ENDF/B-VII отсутствуют.

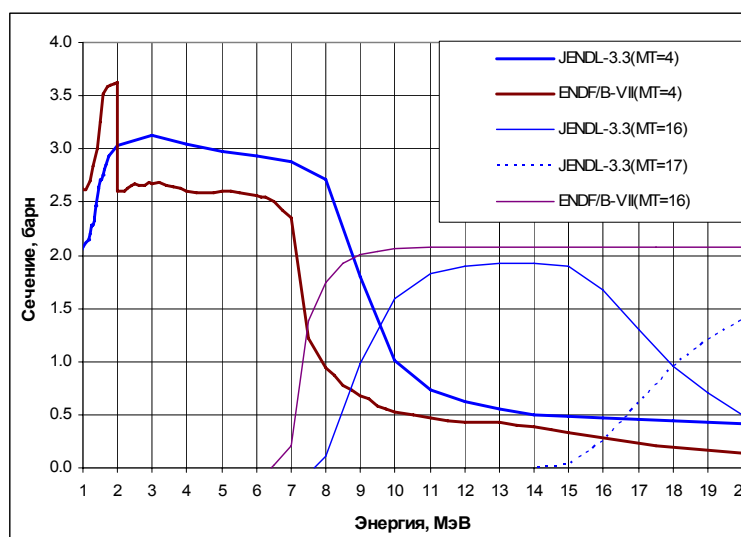


Рис. 3. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n).

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 описывается возбуждение 21 дискретного уровня при неупругом рассеянии; в ENDF/B-VIIb2 только 10, причем их возбуждение учитывается только до 2 МэВ. Это ясно проявилось в поведении полного сечения неупругого рассеяния.

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является также описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1. В дальнейшем целесообразно ее дополнение данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях и усовершенствование описания области неразрешенных резонансов. Включить файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров - $^{177}\text{Lu}^m$ и $^{178}\text{Hf}^n$, используя данные из EAF-2003.

72.6. Гафний-178

Содержание в естественной смеси 27.28%.

1. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба⁵. На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Оцененные сечения хорошо согласуются с результатами последних измерений в тепловой области. В области более высоких энергий в JENDL-3.3, а потому и в JEFF-3.1 почему-то проигнорированы результаты Бира. Сечение захвата здесь явно занижено.

На рис.2. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. Согласие всех оценок с экспериментальными данными вполне приемлемое.

Область разрешенных резонансов во всех оценках содержит 24 резонанса при энергиях выше энергии связи нейтрона и одно связанное состояние.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

	$\sigma(0.0253\text{эВ})$	RI
JEFF-3.1	83.9	1871
ENDF/B-VIIb2	84.0	1905
JENDL-3.3	84.0	1914
FOND-2.2	86	1920
Мухабхаб-03 ⁵	84±4	1950±50

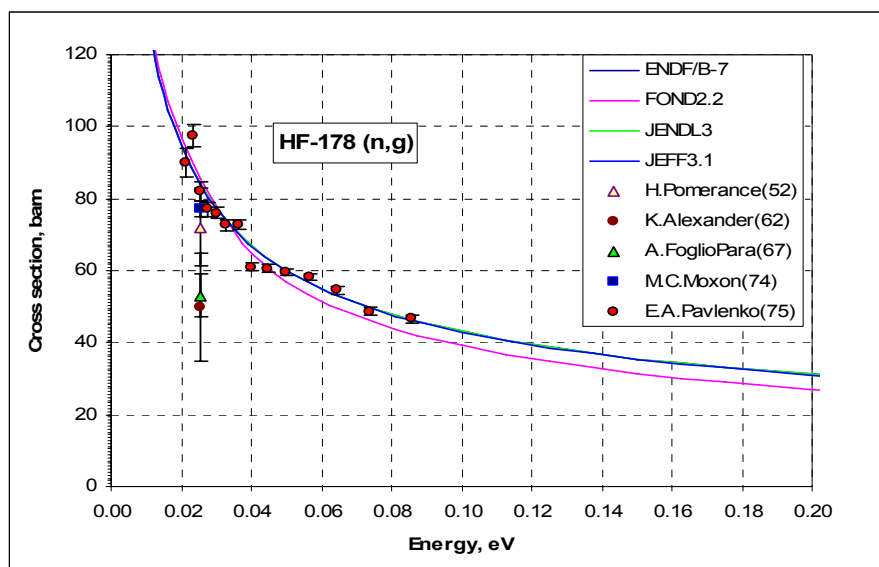


Рис. 1а. Сечение захвата

⁵ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

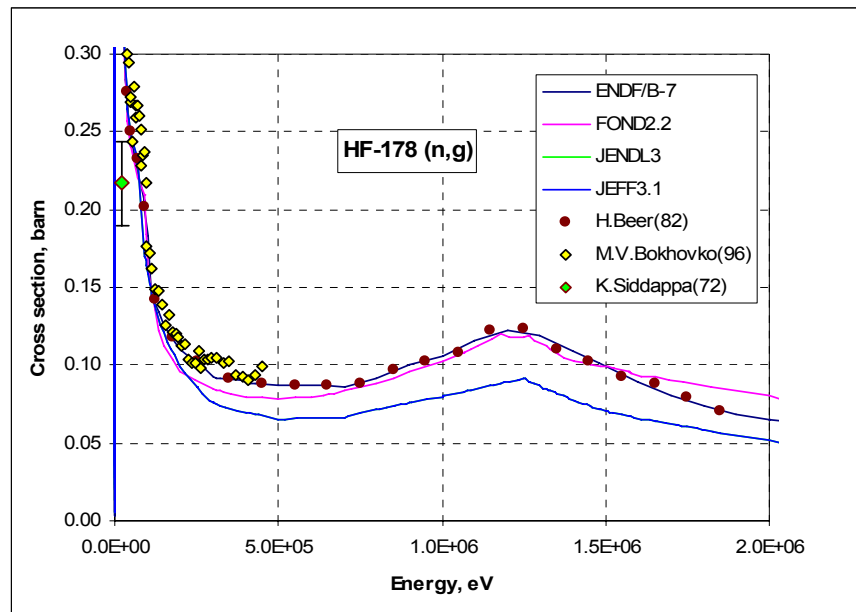


Рис.1б. Сечение захвата

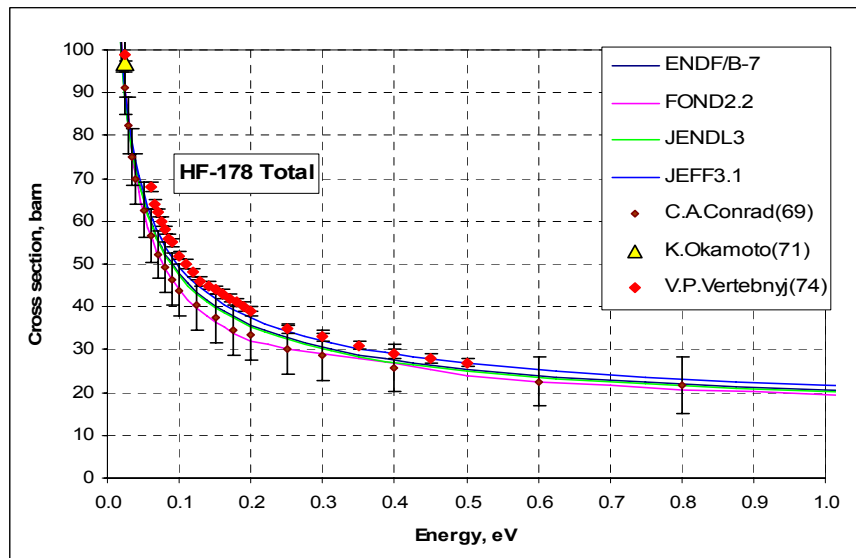


Рис.2. Полное сечение

В JEFF-3.1и JENDL-3.3 область разрешенных резонансов ограничена 1500 эВ, хотя энергия последнего резонанса равна 2090 эВ. В ENDF/B-VII эта граница установлена при 2100 эВ. Из рис. 3 и 4 не следует наличие существенного пропуска уровней в области разрешенных резонансов и граница этой области, принятая в ENDF/B-VII, представляется оправданной.

Область неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII распространена до 90 кэВ, т.е. почти до порога неупругого рассеяния. Приведенные нейтронные и радиационные ширины и среднее расстояние между уровнями для всех значений четности и орбитального момента (учтены вклады s-, p- и d-волн) от энергии не зависят. В японской оценке, принятой и в JEFF-3.1, граница области неразрешенных резонансов 50 кэВ; плотность уровней возрастает с энергией, а нейтронные ширины сокращаются, так что нейтронная силовая функция остается постоянной. Значения силовых функций в рассматриваемых оценках различаются не сильно и для s-волны неплохо согласуются с оценкой по области разрешенных резонансов.

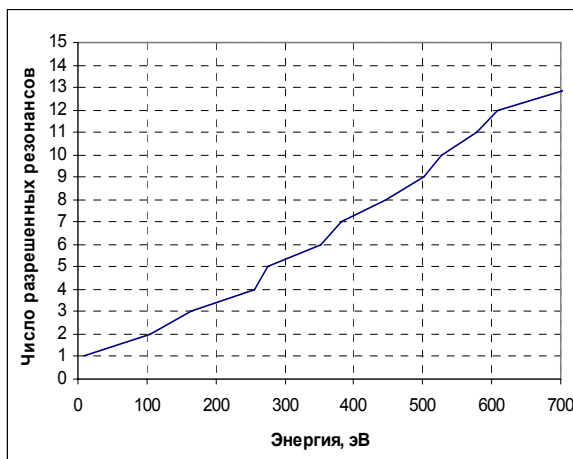


Рис.3. Нарастающая сумма числа резонансов

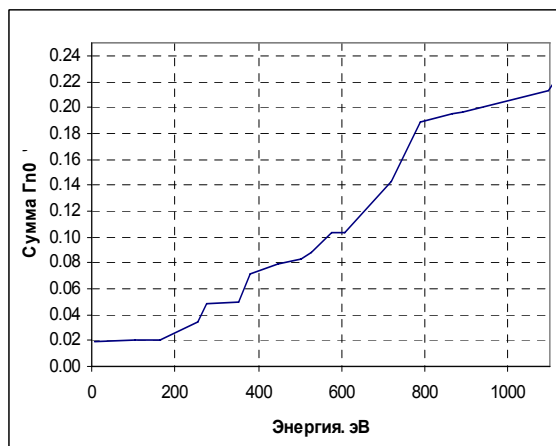


Рис.4. Нарастающая сумма приведенных ширин

Изложенное выше приводит к выводу, что параметры разрешенных резонансов следует принять из JEFF-3.1, поскольку в ней учтена новая экспериментальная информация (не противоречащая предыдущей), а границу области разрешенных резонансов принять в соответствии с ENDF/B-VIIb2.

2. Данные вне резонансной области

На рис.3. оцененные данные по сечению неупругого рассеяния (толстые линии), реакциям (n,2n) (тонкие линии) и (n,3n) (пунктир) сравниваются друг с другом. Данные JEFF-3.1 в точности совпадают с таковыми из JENDL-3.3 и потому не изображены. Данные о реакции (n,3n) в ФОНД-2.2 и в ENDF/B-VII отсутствуют.

Экспериментальные результаты Икеда, изображенные на рис.3, лежат много ниже оцененных кривых, что и естественно, поскольку измерить все акты неупругого рассеяния, четко отделив их от упругого рассеяния, невероятно сложно: при упругом рассеянии нейтронов с энергией 14 МэВ на гафнии-178 нейтрон теряет, в среднем, примерно 150 кэВ, а максимально – вдвое больше. Эти потери сравнимы с потерей энергии при рассеянии с возбуждением низколежащих уровней гафния. Поэтому отмеченное расхождение между экспериментальными и оцененными сечениями неупругого рассеяния, не должно сеять сомнение в корректности последних.

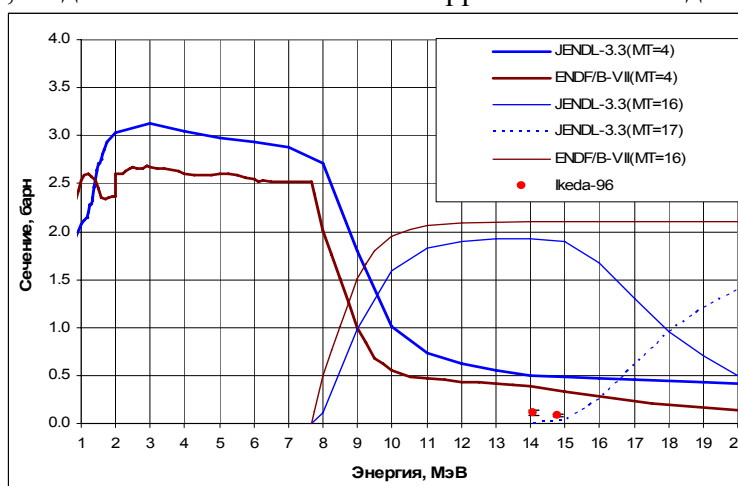


Рис. 3. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n).

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 описывается возбуждение 21 дискретного уровня при неупругом рассеянии; в ENDF/B-VIIb2 только 3. Это ясно проявилось в поведении полного сечения неупругого рассеяния.

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является также описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Существенным недостатком оценки является отмеченное выше занижение сечении захвата в области 1 мэВ (см. рис. 1б). Однако, устранение этого недостатка означало бы, по существу, переоценку всего файла, а учитывая сравнительно небольшое содержание гафния-177 в естественной смеси, было решено, что выполнение этой переоценки выходит за рамки настоящей работы.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1. При первой возможности следует пересмотреть оценку с главной целью устранения расхождения между оцененным сечением захвата и данными Бира. Целесообразно также дополнение оценки данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях. Включить в оценку файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера - $^{179}\text{Hf}^m$, используя данные из EAF-2003.

Авторы заключения

Забродская С.В., Николаев М.Н.

72.7. Гафний-178n

Радиоактивен ($T_{1/2}=31$ г.). Рападается путем изомерного перехода. В реакторах образуется за счет реакции $^{177}\text{Hf}(n,\gamma)$

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{179}\text{Hf}^m$ и $^{177}\text{Lu}^m$ – перенести в файл MF=9. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Файлу присвоить MAT=7275.

Автор заключения

Николаев М.Н.

72.8. Гафний-179

Содержание в естественной смеси 13.62%.

2. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба⁶. На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Оцененные сечения хорошо согласуются с единственным

⁶ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

результатом, обладающим приемлемой точностью – результатом Моксона. В области более высоких энергий последние оценки приемлемо согласуются с данными и Боховко и Бира. Лучше это согласие в оценке JENDL-3.3 (=JEFF-3.1).

На рис.2. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. Все оценки идут по экспериментальным данным Конрада. Результаты Вертебного и Окамото признаны завышенными. В самом деле, сечение упругоготтрассеяния по измерению Вертебного равно 6.7 ± 0.1 барн. Если принять полное сечение, измеренное тем же Вертебным, которое равно 65 барн, то сечение захвата окажется равным 58.3 барна, что хотя и согласуется с результатами Боллинджера (1953) и Померанца (1953), обладающими большими погрешностями, резко противоречит результату Моксона.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

	$\sigma(0.0253\text{эВ})$	RI
JEFF-3.1	40.8	509.2
ENDF/B-VIIb2	43.6	548
JENDL-3.3	42.8	522.3
FOND-2.2	45	517
Мухабхаб-03 ⁶	41 ± 3	630 ± 30

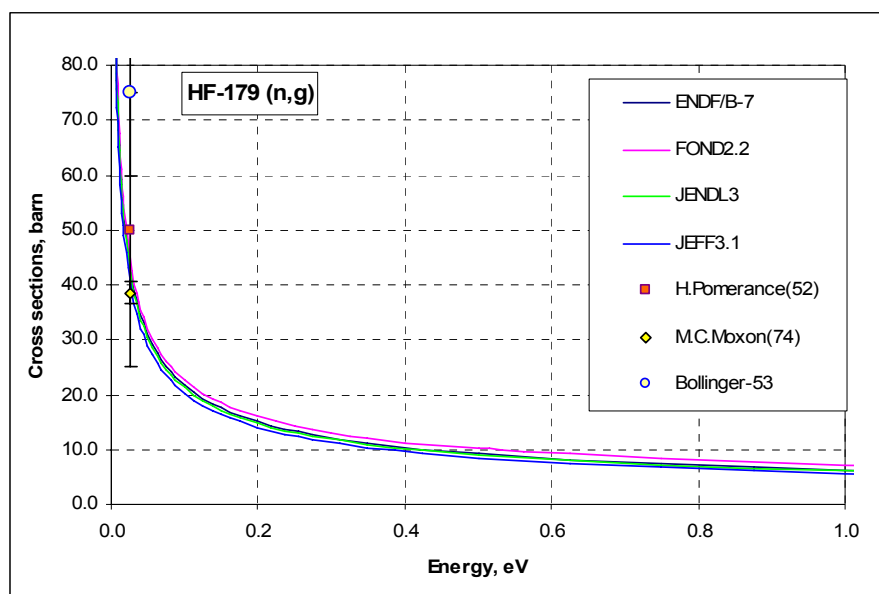


Рис. 1а. Сечение захвата

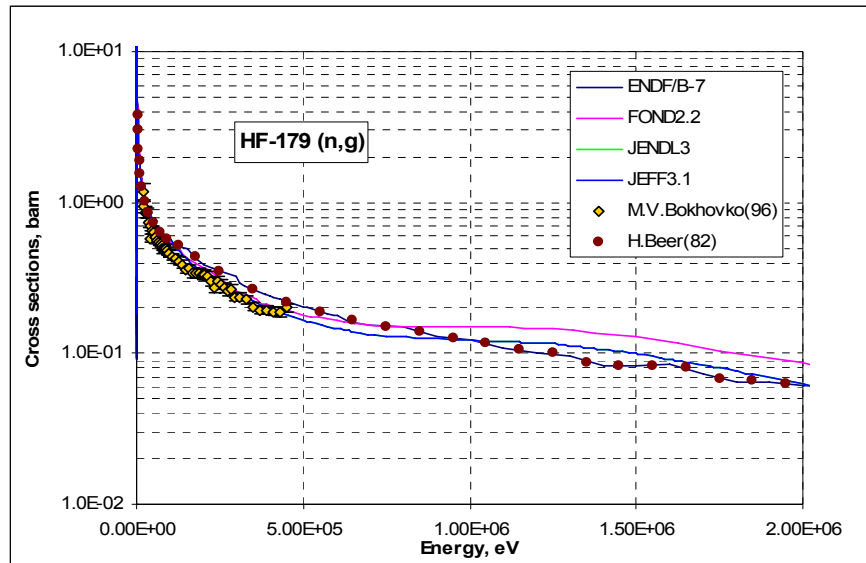


Рис.16. Сечение захвата

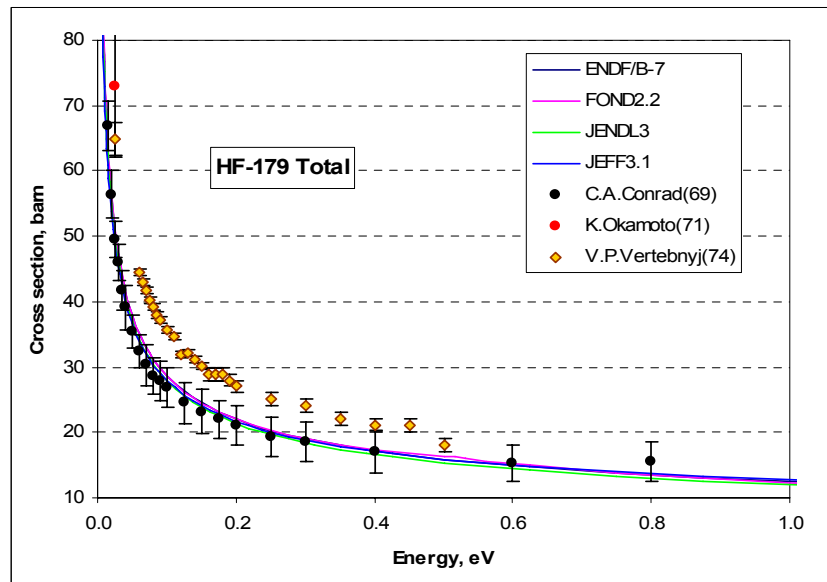


Рис.2. Полное сечение

Область разрешенных резонансов в разных оценках содержит разное число резонансов:

- JENDL-3.3: 107 резонансов до 1010 эВ + связанное состояние; граница RRR- 250 эВ;
- ENDF/B-VII: 70 резонансов до 689 эВ + связанное состояние; граница RRR – 450 эВ;
- JEFF-3.1: 81 резонанс до 1010эВ +2 связанных состояния; граница RRR – 250 эВ.

На рис. 3 приведены нарастающие суммы числа резонансов в обсуждаемых оценках, а на рис. 4 – нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин. Налицо большие различия. Заметим, что в JENDL-3.3 приведены все резонансы из справочника Мухабхаба 1984 г., в том числе и те, для которых в справочнике указаны только резонансные энергии, а ширины не приведены. В JENDL-3.3 этим резонансам из каких-то соображений приписаны нейтронные ширины (радиационные ширины постоянны). Соображения, видим, были резонными, поскольку, как видно, из рис. 3 нарастающая сумма резонансов ведет себя линейно, а сумма приведенных ширин хоть и испытывает аномалии, однако они отнюдь не связаны с определением неизвестных нейтронных ширин. Как видно из рис. 5 нейтронные ширины добавленных резонансов ниже среднего

уровня. Учет пропущенных резонансов служит основанием для продления области разрешенных резонансов до 450 эВ. Весьма странно, что авторы оценки этим основанием не воспользовались и границу RRR установили на 250 эВ. Не менее странно, что в ENDF/B-VII эта граница установлена на 450эВ, хотя без учета вклада пропущенных резонансов оснований для этого нет.

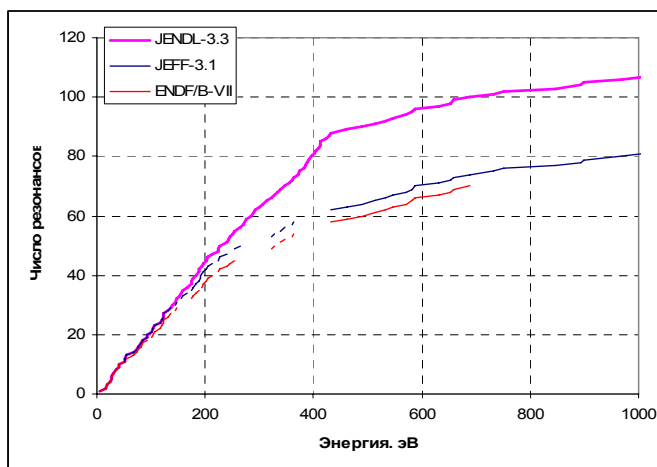


Рис.3. Нарастающие суммы числа резонансов. Разрывы на кривых JEFF-3.1 и ENDF/B-VII показывают места пропуска резонансов.

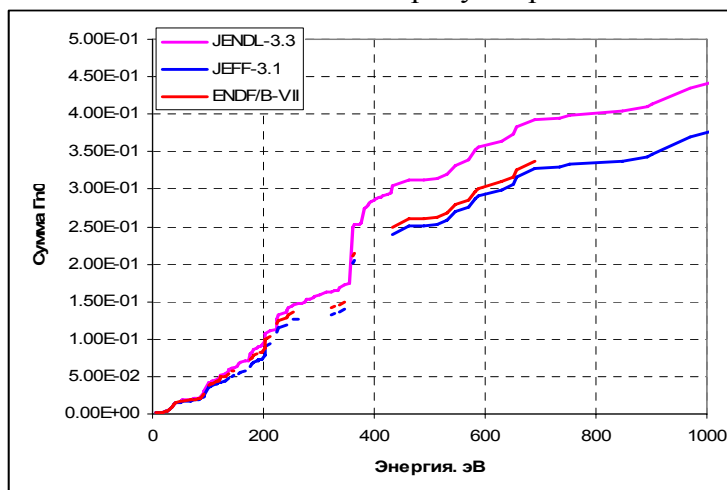


Рис.4. Нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин

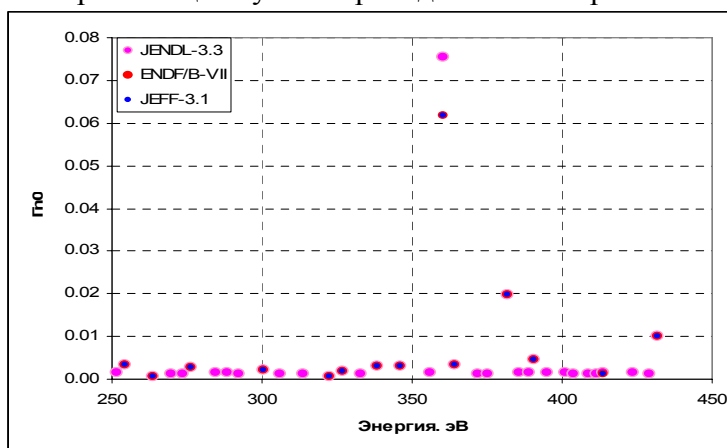


Рис.5. Приведенные нейтронные ширины резонансов по разным оценкам

Область неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII распространена до 90 кэВ, т.е. почти до порога неупругого рассеяния. Тогда как в японской оценке, а, следовательно, и в JEFF-3.1, эта область простирается только до 50 кэВ.

. Изложенное выше приводит к выводу, что до 200 эВ следует принять резонансные параметры из JENDL-3.3, заменив нейтронные ширины резонансов лежащих ниже 200 кэВ на оценку из JEFF-3.1 (учитывающую новые экспериментальные данные). Границу области разрешенных резонансов принять равной 400 эВ. Средние резонансные параметры принять из той оценки, которая будет выбрана из рассмотрения сечений вне резонансной области.

2. Данные вне резонансной области

На рис.6. оцененные данные по сечению неупругого рассеяния (толстые линии), реакциям (n,2n) (тонкие линии) и (n,3n) (пунктир) сравниваются друг с другом. Данные JEFF-3.1 в точности совпадают с таковыми из JENDL-3.3 и потому не изображены. Данные о реакции (n,3n) в ENDF/B-VII отсутствуют.

Экспериментальные данные о сечениях реакций, показанных на рисунке, отсутствуют (хотя имеются активационные измерения сечений образования изомерных состояний).

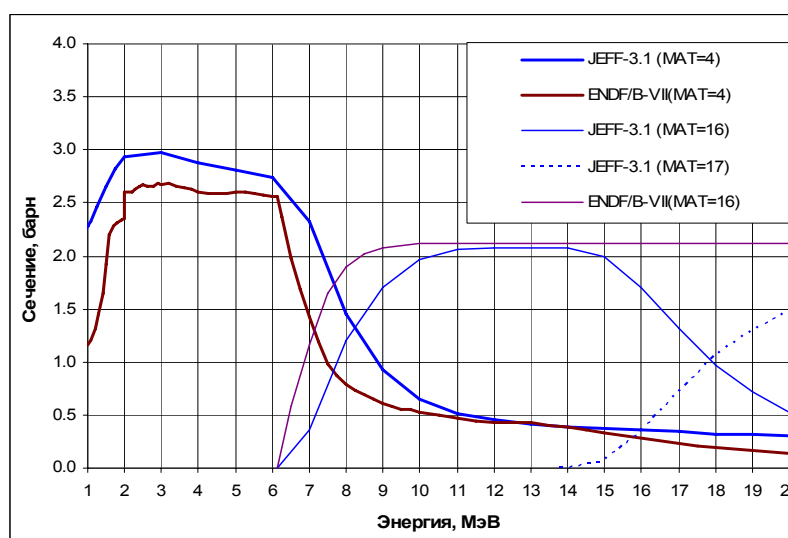


Рис. 6. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n).

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 описывается возбуждение 12 дискретных уровней при неупругом рассеянии; в ENDF/B-VIIb2 только 3. Это ясно проявилось в поведении полного сечения неупругого рассеяния.

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является также описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1. В будущем целесообразно дополнение оценки данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях. Включить в оценку файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера - $^{178}\text{Hf}^n$, используя данные из EAF-2003.

Авторы заключения

Забродская С.В., Николаев М.Н.

72.9. Гафний-179n

Радиоактивен ($T_{1/2}=25$ дн.). Рападается путем изомерного перехода. В реакторах образуется за счет реакции $^{178}\text{Hf}(n,\gamma)$

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003.

Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{178}\text{Hf}^m$ и $^{177}\text{Lu}^m$ – перенести в файл MF=9. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Файлу присвоить MAT=7275.

Автор заключения

Николаев М.Н.

72.10. Гафний-180

Содержание в естественной смеси 35.08%.

3. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба⁷. На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Оцененные сечения хорошо согласуются с совпадающими результатами трех измерений. В области более высоких энергий оценка ENDF/B-VII значительно лучше соответствует экспериментальным данным.

На рис.2а. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. И в этом случае оценка ENDF/B-VII выглядит предпочтительнее.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

	$\sigma(0.0253\text{эВ})$	RI
JEFF-3.1	13.1	29.7
ENDF/B-VIIb2	13.0	34.5
JENDL-3.3	13.0	34.0
FOND-2.2	12.6	34.6
Мухабхаб-03 ⁷	14.04 ± 0.07	35 ± 1

⁷ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

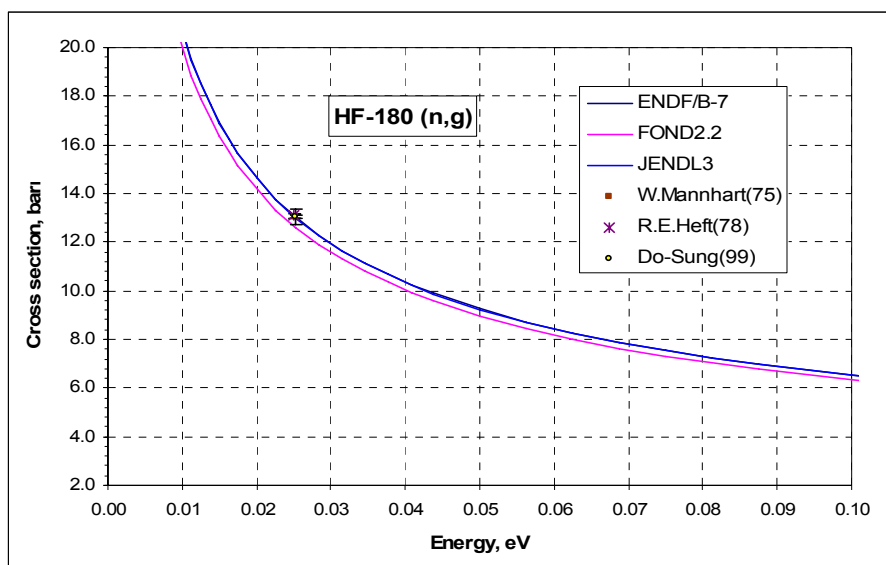


Рис. 1а. Сечение захвата

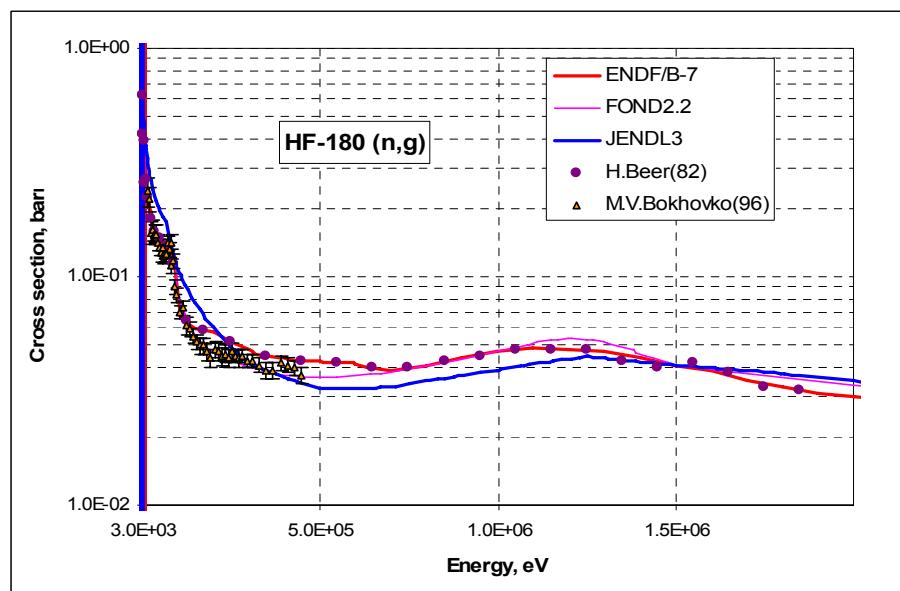


Рис.1б. Сечение захвата

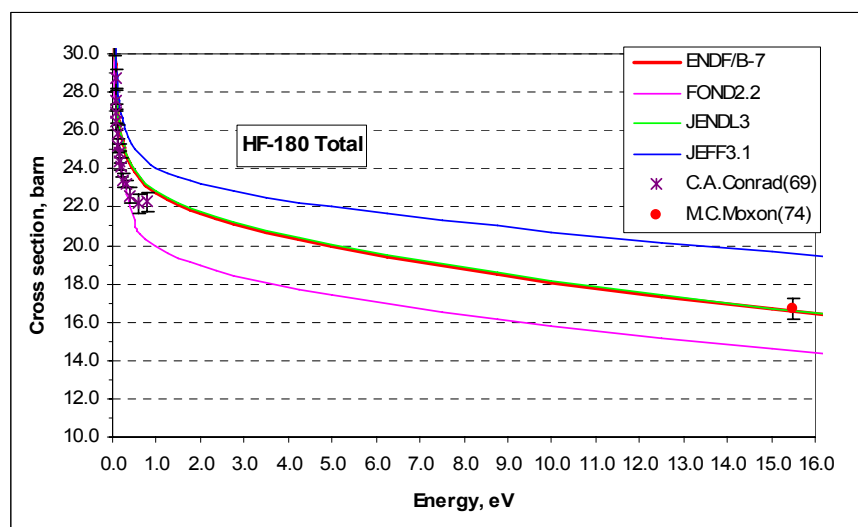


Рис.2а. Полное сечение

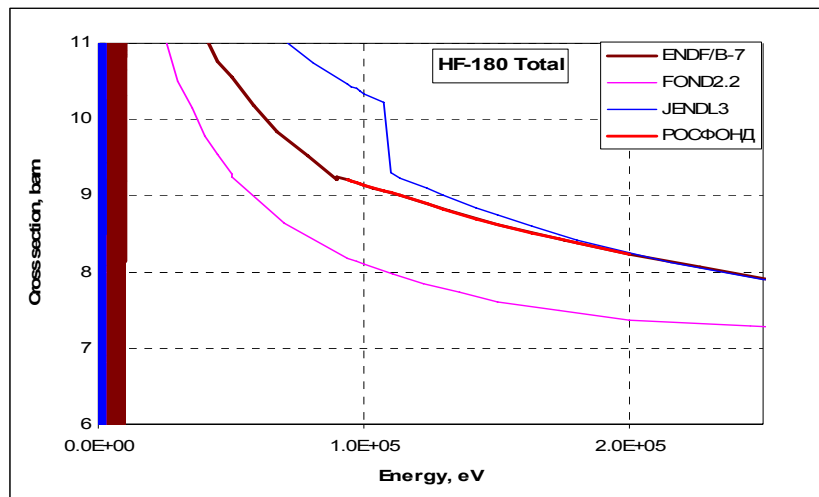


Рис.2б. Полное сечение

Область разрешенных резонансов в разных оценках описывается по-разному: в JENDL-3.3: 150 s-резонансов до 9865 эВ + связанное состояние; граница RRR- 2500 эВ; в ENDF/B-VII и JEFF-3.1: 88 s-резонансов до 11350 эВ +одно или два (JEFF-3.1) связанных состояния и 66 p-резонансов до 9850 эВ; граница RRR – 2500 эВ (JEFF-3.1) или 10 кэВ (ENDF/B-VII). В JEFF-3.1 используется формула Райха-Мура, в ENDF/B-VII – Многоуровневая формула Брейта-Вигнера. Кроме этого эти две последние оценки различаются только параметрами связанных состояний и первых двух резонансов. Как отмечалось, эти отличия практически не сказались ни на тепловых сечениях, ни на резонансном интеграле.

На рис. 3 приведены нарастающие суммы числа резонансов в обсуждаемых оценках, а на рис. 4 – нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов. Бросается в глаза изменение при 2700 эВ условий проведения экспериментов, на основе которых проведено определение резонансных параметров. В самом деле, выше этой энергии экспериментально были определены энергии резонансов и резонансные интегралы захвата, а нейтронные ширины удалось определить лишь для нескольких сильных резонансов. Из рис. 4 видно, что в ENDF/B-VII (и в JEFF-3.1) к p-резонансам отнесены резонансы с малыми резонансными интегралами и потому с малыми нейтронными ширинами: нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин оставшихся в оценке ENDF/B-VII s-резонансов ведет себя почти так же, как и в оценке JENDL-3.3, в которой все резонансы считаются s-резонансами.

Из сказанного выше следует, прежде всего, что до 2700 эВ пропущено три десятка резонансов. По оценке ENDF/B-VII это – очень слабые резонансы и их пропуск не должен давать существенного вклада в сечения, что, очевидно, и послужило поводом для распространения области разрешенных резонансов до 10 кэВ. Оснований ограничивать область разрешенных резонансов 2500 эВ не усматривается: в рассматриваемом случае именно в этой области и имеет место пропуск значительной части уровней.

Оценка области разрешенных резонансов в ENDF/B-VII представляется наиболее убедительной.

В области неразрешенных резонансов эта оценка, как видно из рис. 1б, также имеет преимущество. Область неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII распространена до 90 кэВ, т.е. почти до порога неупругого рассеяния. На рис.2б видно, что при 10 кэВ полное сечение, рассчитанное по средним резонансным параметрам, хорошо стыкуется с сечением, заданным поточечно в файле MF=3. В JENDL-3.3 (и JEFF-3.1) плавная стыковка при 50 кэВ обеспечена не хуже, но в сечении, заданном поточечно, при 110 кэВ наблюдается необъяснимый разрыв.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку средних резонансных парметров из ENDF/B-VII, продлив ее до порога неупругого рассеяния

(93.823 keV). В интервале от этого порога до 200 кэВ, где оценки полного сечения в ENDF/B-VII и JENDL-3.3 сравниваются, принять сглаженную кривую, изображенную на рис. 1б красной линией, а выше 200 кэВ – принять оценку JENDL-3.3. Как видно из рис.3, сечение неупругого рассеяния в оценке ENDF/B-VII, как и в случае других изотопов гафния, имеет неоправданно нерегулярную энергетическую зависимость; реакция (n,3n) не учтена. Есть и другие недочеты в этой оценке. Поэтому целесообразность принять в рассматриваемой энергетической области оценку JENDL-3.3 представляется несомненной. Так это сделано и в JEFF-3.1.

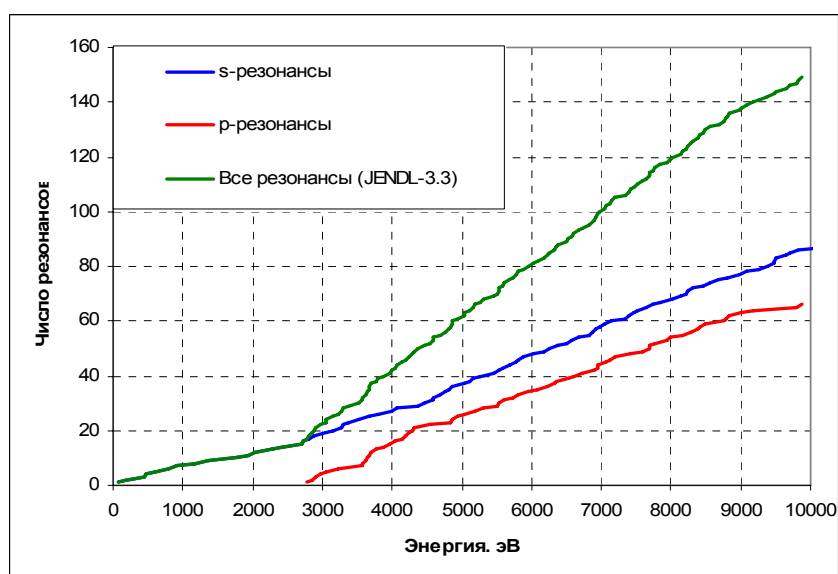


Рис.3. Нарастающие суммы числа резонансов. Разрывы на кривых JEFF-3.1 и ENDF/B-VII показывают места пропуска резонансов.

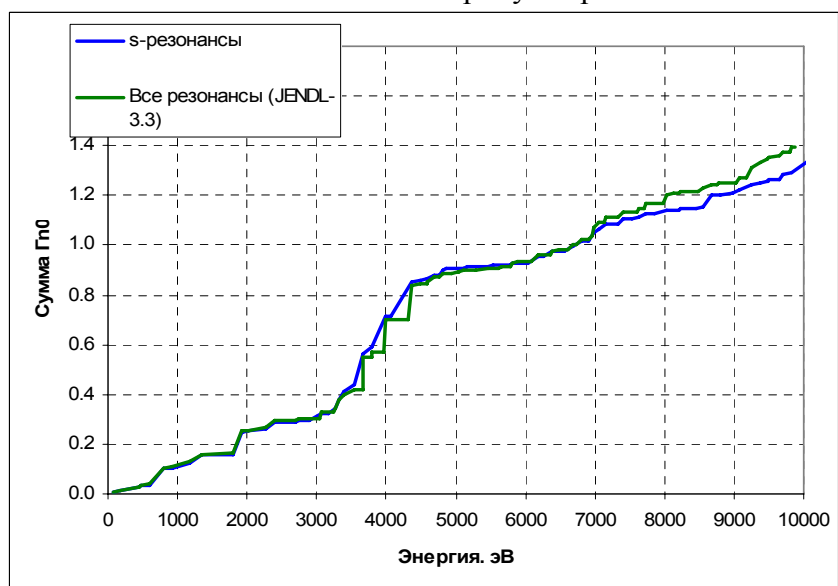


Рис.4. Нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов

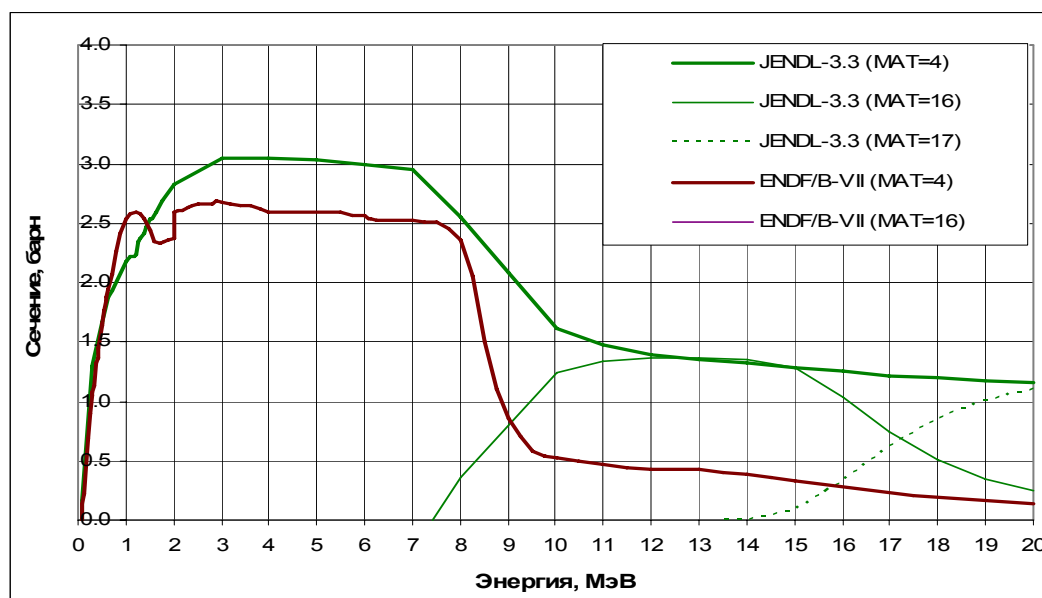


Рис. 5. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n).

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является также описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять параметры разрешенных резонансов из JEFF-3.1, область неразрешенных резонансов продлить до 10 кэВ; параметры неразрешенных резонансов принять из ENDF/B-VII, продлив область неразрешенных резонансов до порога неупругого рассеяния. В интервале от этого порога до 200 кэВ, обеспечить плавную сшивку сечения, рассчитываемого по средним резонансным параметрам с сечением заданного поточечно в файле JENDL-3.3. При более высоких энергиях принять данные из JENDL-3.3. В будущем целесообразно дополнение оценки данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях. Включить в оценку файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров - $^{178}\text{Hf}^m$ и $^{179}\text{Hf}^m$, используя данные из EAF-2003.

Авторы заключения

Забродская С.В., Николаев М.Н.

72.11. Гафний-181

Радиоактивен ($T_{1/2}=42.39$ дн.). Испытывает бета-распад в стабильный тантал-181. В реакторах образуется за счет реакции $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)$

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущего изомера - $^{179}\text{Hf}^m$ - перенести в файл MF=9. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7281.

Автор заключения

Николаев М.Н.

72.12. Гафний-182

Слабо радиоактивен ($T_{1/2}=8.9 \cdot 10^6$ лет.). Испытывает бета-распад в тантал-182, который, в свою очередь, распадается ($T_{1/2}=114.43$ дн.) в стабильный вольфрам-182. В реакторах образуется за счет цепочки реакций $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}(n,\gamma)^{182}\text{Hf}$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003.

Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7282.

Автор заключения

Николаев М.Н.