

49.ИНДИЙ

49.1. Индий-111

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.8047$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в стабильный кадмий-111. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{112}\text{Sn}_{(0.97\%)}(n,d; n,np)$ ^{111}In и $^{113}\text{In}_{(4.3\%)}(n,3n)$ ^{111}In .

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. Сформировать файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера ^{108}Ag . Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=4911.

Автор заключения

Николаев М.Н.

49.2. Индий-113

Содержание в естественной смеси 4.29%.

В известных библиотеках используются две оценки нейтронных данных:

- оценка, выполненная международной рабочей группой по продуктам деления в 1990 г. используется в библиотеках ФОНД-2.2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1 (ниже – оценка JENDL-3.3);
- оценка, выполненная другой международной рабочей группой в 2004 – 2005 г., которая включена Мухабхабом в ENDF/B-VIIb2 (ниже – оценка ENDF/B-VII).

Ниже будут рассмотрены различия между ними в сравнении с экспериментальными данными.

1. Тепловая и резонансная области.

В табл.1 сравниваются тепловые сечения и значения резонансного интеграла захвата

Табл.1. Тепловые сечения и резонансный интеграл

Оценка	$\sigma_t(0.0253 \text{ eV})$	$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$	RI
JENDL-3.3	15.75	12.07	325
ENDF/B-VII	15.794	12.128	333

По оценке Мухабхаба, погрешность сечения захвата составляет ± 1.1 барн, а резонансного интеграла ± 30 барн. Различие оценок много меньше этих погрешностей.

В JENDL-3.3 резонансная область содержит 49 резонансов (все – s-резонансы) с максимальной энергией 1996 эВ. Область разрешенных резонансов простирается до 830 эВ. В ENDF/B-VII число резонансов много больше: 60 s-резонансов и 16 p-резонансов. На рис. 1 сравниваются нарастающие суммы числа резонансов в сравниваемых оценках.

Пропуск резонансов проявляется в обеих оценках. Отсутствие данных о р-резонансах выше 200 кэВ, очевидно, не связано с неправильной идентификацией спинов и четностей – просто нет необходимых данных. К сожалению, источник данных о р-резонансах в описании оценки не указывается.

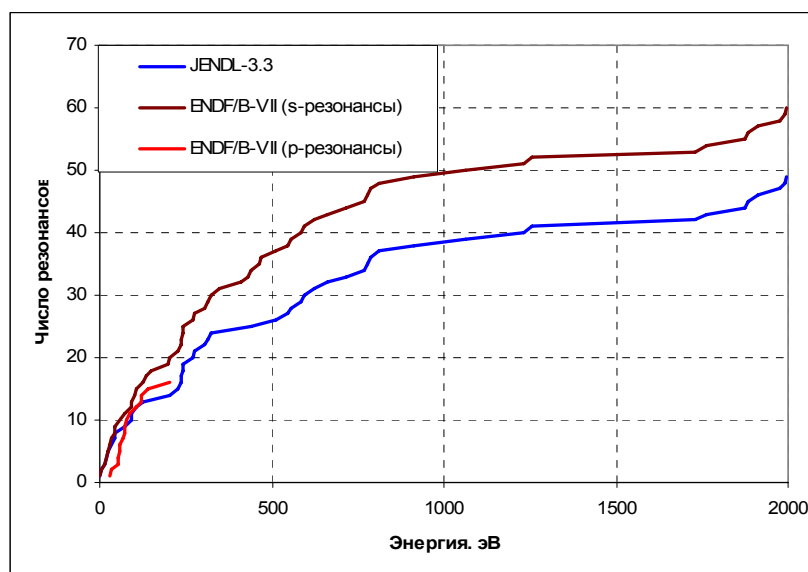


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Из рис. 1 ясно, что не только к 830эВ в JENDL-3.3, но и к 600эВ в ENDF/B-VII пропущена значительная часть резонансов. Разумеется, это, в основном, слабые резонансы с малой нейтронной шириной, пропуск которых, вероятно, не слишком сильно влияет на оцениваемые сечения. На рис. 2 приведена нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов. Выше границы разрешенных резонансов кривые нанесены пунктиром. Несмотря на значительно больший пропуск резонансов, в оценке JENDL-3.3 нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин не намного ниже, чем в ENDF/B-VII и выше 500 эВ разница между ними сохраняется (как, впрочем. И разница в числе резонансов – см. рис.1). Причиной, побудившей оценщиков данных для ENDF/B-VII, снизить границу области разрешенных резонансов до 600 эВ, вероятно, послужило снижение наклона нарастающей суммы приведенных ширин после 600 эВ. Этот аргумент не слишком убедителен, поскольку, как видно из рис.2, в интервале 600-900 эВ этот наклон практически равен среднему наклону на интервале до 600 эВ. Полагая, что моделирование BCEX резонансов в интервале 600-900 эВ средними резонансными параметрами едва ли обеспечит более надежную оценку сечений, чем описание этих сечений разрешенными резонансами, считаем, что установление границы области разрешенных резонансов на 900эВ вполне допустимо. В РОСФОНД целесообразно принять параметры из ENDF/B-VII с границей RRR, равной 900эВ.

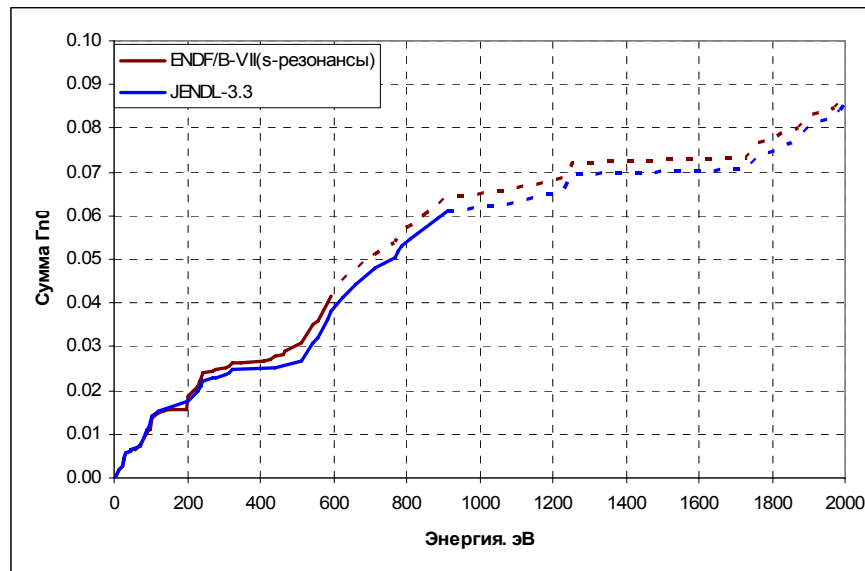


Рис.2. Нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин.

Область неразрешенных резонансов в сравниваемых оценках описывается одинаково. Одна и та же оценка используется и вне резонансной области, так что проблема выбора отпадает.

Индий, в частности, индий-113, часто используется в качестве активационного индикатора. В результате захвата образуется ^{114}In в основном ($T_{1/2}=71.9$ сек.) или изомерном ($T_{1/2}=49.51$ дн.). Для активации представляет интерес изомер. В тепловой области вероятность образования изомера при захвате равна 0.675 (Keish-63), причем полное сечение захвата, измеренное им (12 барн) прекрасно согласуется с оценкой. В интервале 0.36 – 1 МэВ вероятность образования изомера практически не зависит от энергии и равна 0.78 (Grench-68). Полное сечение захвата, полученное в этой работе, заметно отличается от оцененной кривой (рис.1).

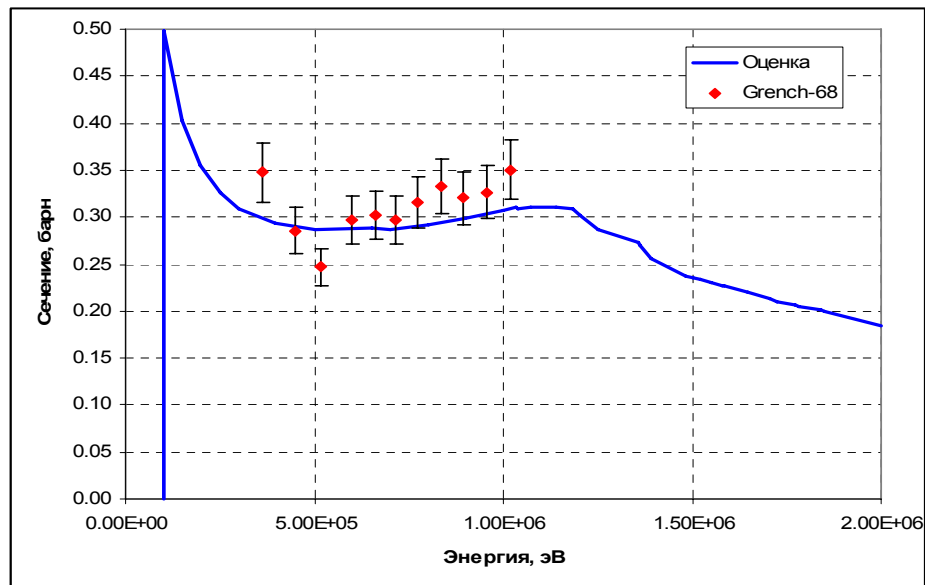


Рис.1. Сечение захвата

Что касается вероятности образования изомера, то в EAF-2003 что она снижается от 0.58 при низких энергиях до 0.57 при 2 МэВ и далее до 0.52 при 20 МэВ. Исходя из приведенных выше данных мы полагаем, что более реалистичной оценкой является

линейный с энергией рост от 0.675 в тепловой точке до 0.78 при 0.5 МэВ и далее – без изменений.

На рис. 2 оцененное сечение неупругого рассеяния сравнивается с единственным экспериментом Симакова (1981). Из этого измерения следует, что оцененное сечение неупругого рассеяния занижено почти на 20%.

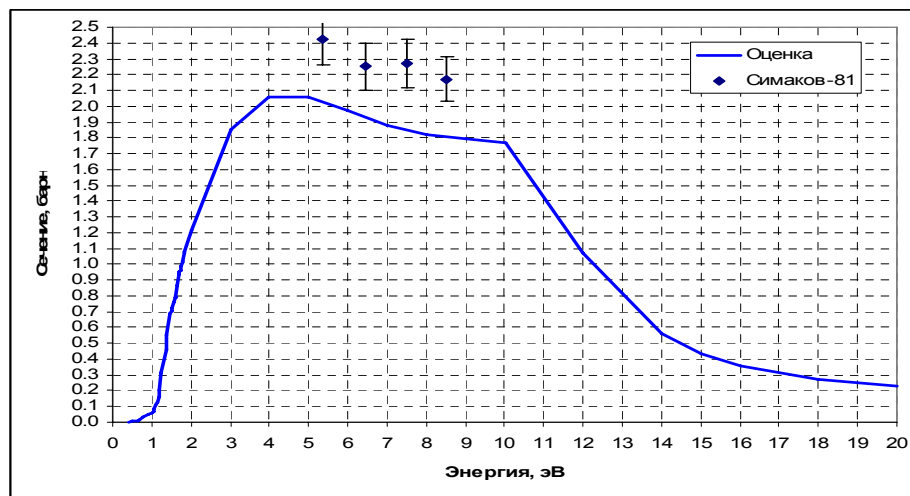


Рис.2. Сечение неупругого рассеяния.

Удобной для измерений реакцией является образование изомера $^{113}\text{In}^m$ при неупругом рассеянии ($T_{1/2}=99.476$ мин.). Сечение этой реакции многократно измерялось. На рис. 3 эти данные сравниваются с оценкой этого сечения из EAF-2003. Как видно, и здесь согласие между оцененными и экспериментальными данными оставляет желать лучшего.

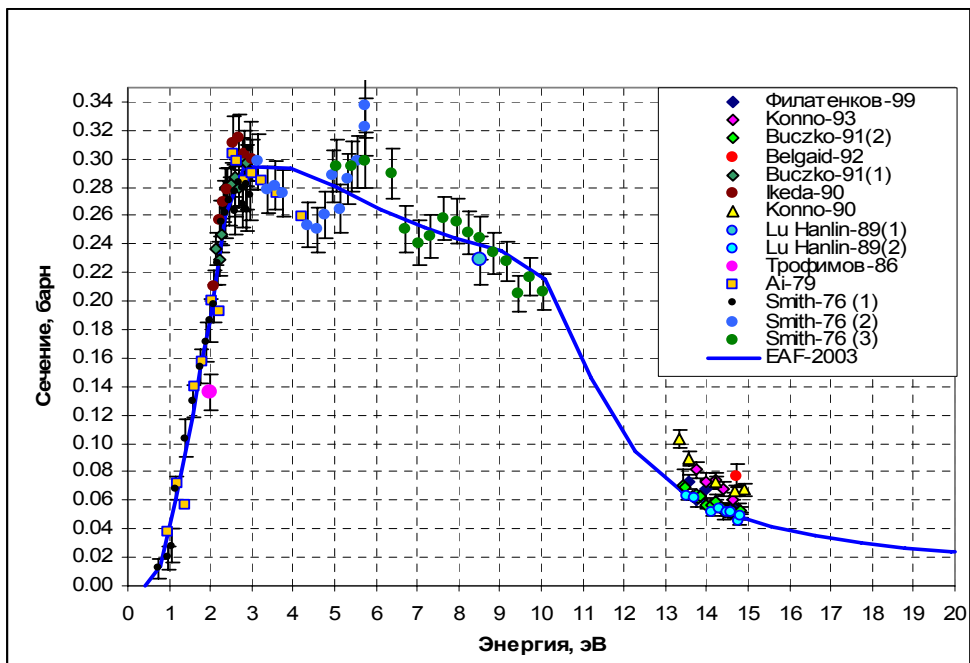


Рис.3. Сечение реакции $^{113}\text{In}(n,n')^{113}\text{In}^m$

На рис. 4 с экспериментальными данными сравнивается оценка сечения реакции $(n,2n)$. В этом случае также образуется как основное ($T_{1/2}=14.97$ мин.), так и изомерное ($T_{1/2}=20.56$ мин.) состояния ядра-продукта. На рис. 5 показаны результаты измерения вероятности образования изомера. Среднее всех этих измерений равно 0.865 ± 0.011 . На рис. 3 желтыми точками показаны результаты двух серий измерений сечения реакции

$^{113}\text{In}(n,2n)^{112}\text{In}^m$, деленные на 0.865. Как видно эти результаты в пределах погрешностей согласуются с результатами прямых измерений сечения реакции (n,2n). Выпадение результатов двух независимых измерений вблизи 14 МэВ, очевидно, является артефактом.

Оцененное сечение хорошо согласуется с экспериментальными данными до 15 МэВ, а при более высоких энергиях представляется завышенным. Это завышение коррелирует с занижением сечения неупругого рассеяния при этих энергиях. (см. рис.3) .

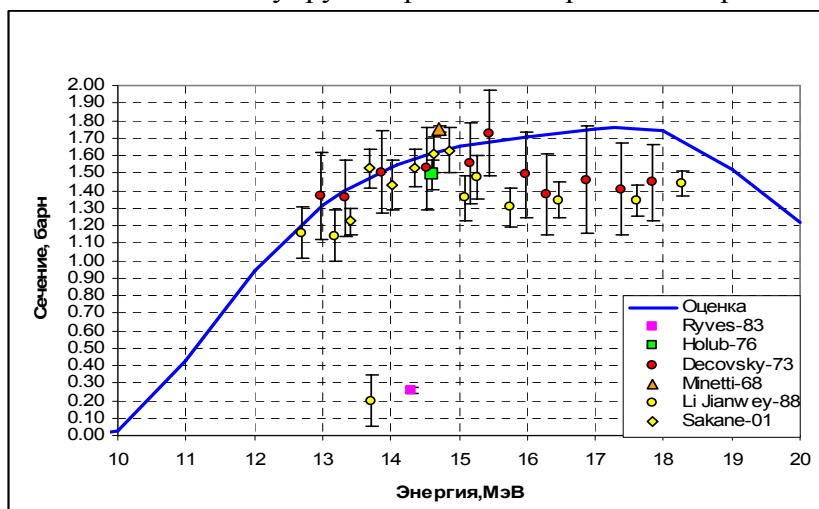


Рис.4. Сечение реакции (n,2n)

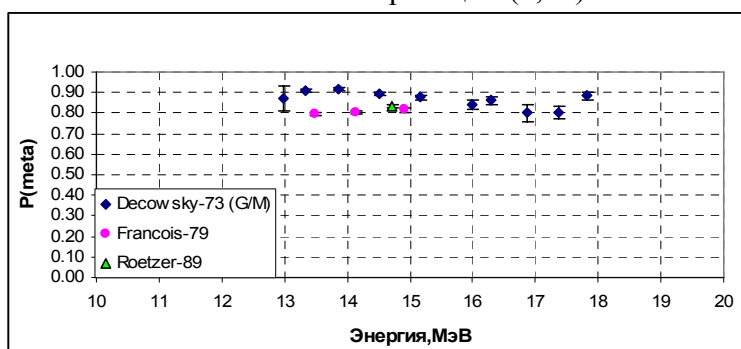


Рис.5. Вероятность образования изомера в реакции (n,2n)

Оцененное сечение реакции (n,3n) существенно превышает результаты единственного эксперимента (рис.6).

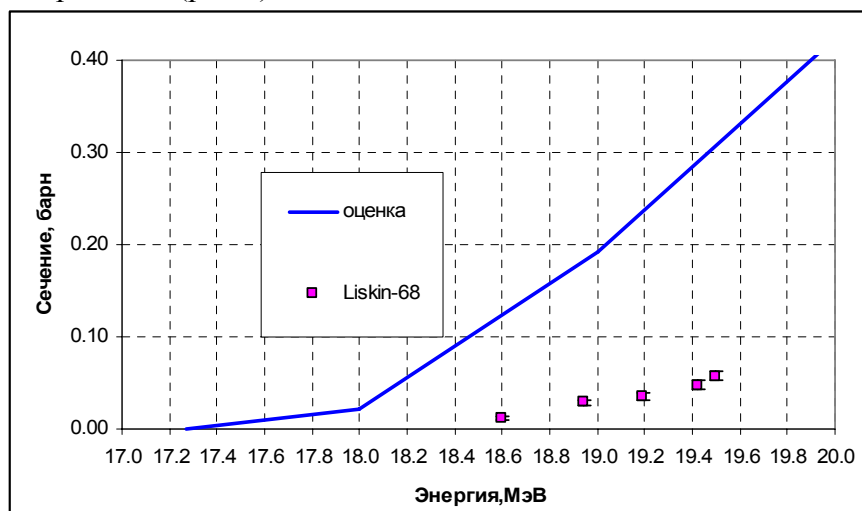


Рис.6. Сечение реакции (n,3n)

Заключение

В РОСФОНД следует включить оценку из ENDF/B-VIIb2, которую следует дополнить файлом MF=9 с данными о вероятностях образования долгоживущих изомеров – $^{114}\text{In}^m$, $^{113}\text{Cd}^m$ и $^{110}\text{Ag}^m$, а также файлом MF=10 с сечением образования изомера при неупругом рассеянии. Данные об образовании $^{114}\text{In}^m$ принять в соответствии с приведенными выше соображениями. Данные об образовании остальных изомеров принять в соответствии с EAF-2003.

Принятую оценку нельзя считать достаточно удовлетворительной. Пересмотр оцененных данных как в резонансной области (статистический учет пропущенных резонансов), так и вне резонансной области весьма желателен.

Автор заключения

Николаев М.Н.

49.3. Индий-114-m

Долгоживущий изомер ($T_{1/2}=49.51$ дн.) С вероятностью 3.25% испытывает захват орбитального электрона и превращается в стабильное олово-114. В остальных случаях переходит в основное состояние, испытывающее, в основном (99.5%) бета-распад в кадмий-114 ($T_{1/2}=71.9$ сек.), а в остальных случаях распадается в олово-114. В реакторах может образовываться за счет реакции $^{113}\text{In}_{(4.29\%)}(n,\gamma)$ и $^{115}\text{In}_{(95.713\%)}(n,2n)$.

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. Сформировать файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущих изомеров ^{113}Cd и ^{110}Ag . Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=4934.

Автор заключения

Николаев М.Н.

49.4. Индий-115

Содержание в естественной смеси 95.71%.

Слабо радиоактивен ($T_{1/2}=4.41 \cdot 10^{14}$ лет). Испытывает бета-распад в олово -115.

В известных библиотеках используются две оценки нейтронных данных:

- оценка, выполненная международной рабочей группой по продуктам деления в 1990 г. используется в библиотеках ФОНД-2.2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1 (ниже – оценка JENDL-3.3);
- оценка, выполненная другой международной рабочей группой в 2004 – 2005 г., которая включена Мухабхабом в ENDF/B-VIIb2 (ниже – оценка ENDF/B-VII).

Ниже будут рассмотрены различия между ними в сравнении с экспериментальными данными.

2. Тепловая и резонансная области.

Тепловые сечения и значения резонансного интеграла захвата в обеих сравниваемых оценках одинаковы:

Табл.1. Тепловые сечения и резонансный интеграл

Оценка	$\sigma_{el}(0.0253 \text{ eV})$	$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$	RI
JENDL-3.3 ENDF/B-VII	2.526	201.0	3210

По оценке Мухабхаба, погрешность сечения захвата составляет ± 2 барн, а резонансного интеграла ± 100 барн.

В JENDL-3.3 резонансная область содержит 206 s-резонансов с максимальной энергией 2004 эВ и 27 p-резонансов с максимальной энергией 493.7 эВ. Общее число резонансов 233. Область разрешенных резонансов простирается до 2000 эВ. В ENDF/B-VII число s-резонансов меньше - 126 (максимальная энергия та же - 493.7 эВ), но зато p-резонансов больше - их 126 (максимальная энергия - 1992.7 эВ). Общее число резонансов 253. Граница RRR те же 2000 эВ.

На рис. 1 сравниваются нарастающие суммы числа резонансов в сравниваемых оценках.

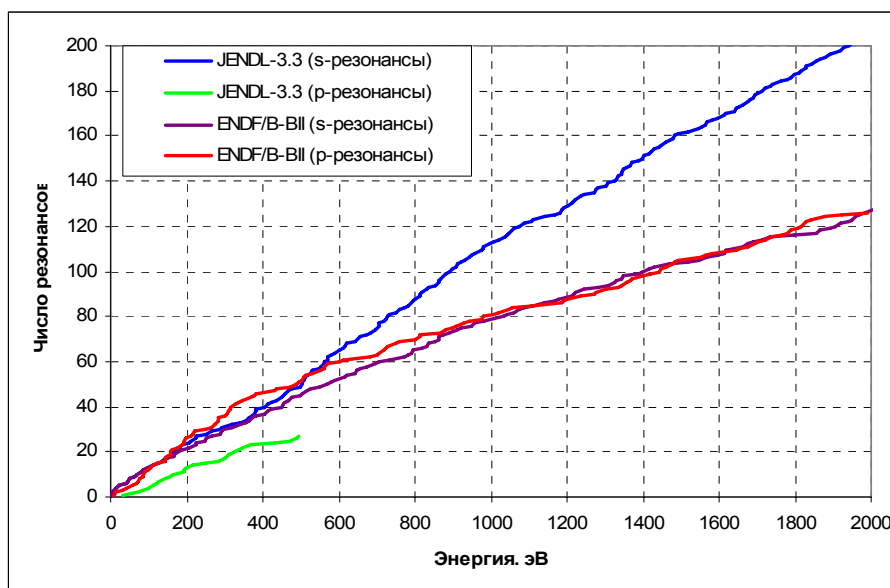


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Ясно, что основное различие оценок заключается в распределении резонансов по четности. С точки зрения оценки поведения сечений в области разрешенных резонансов это не имеет большого значения. Согласно JENDL-3.3 до 2000 эВ нет сколько-нибудь заметного пропуска резонансов, а p-резонансы выше 500 эВ пропущены все, как один. Согласно ENDF/B-VII пропуск резонансов существен (кривые на рис.1 отклоняются от линейной аппроксимации к их начальным участкам), но существен одинаково и для относительно широких s-резонансов и для гораздо более узких p-резонансов.

На рис. 2 приведены нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов. В обеих оценках эти суммы нарастают практически линейно, создавая впечатление об отсутствии пропуска сильных резонансов. Для выявления преимущества одной из оценок требуется провести тщательный статистический анализ распределений приведенных нейтронных ширин, который весьма осложнен тем, что популяция s-резонансов содержит две системы уровней – с довольно близкими спинами – 4 и 5, а популяция p-резонансов целых 4 системы уровней с разными спинами. Проведение такого анализа в настоящей работе было бы неуместным.

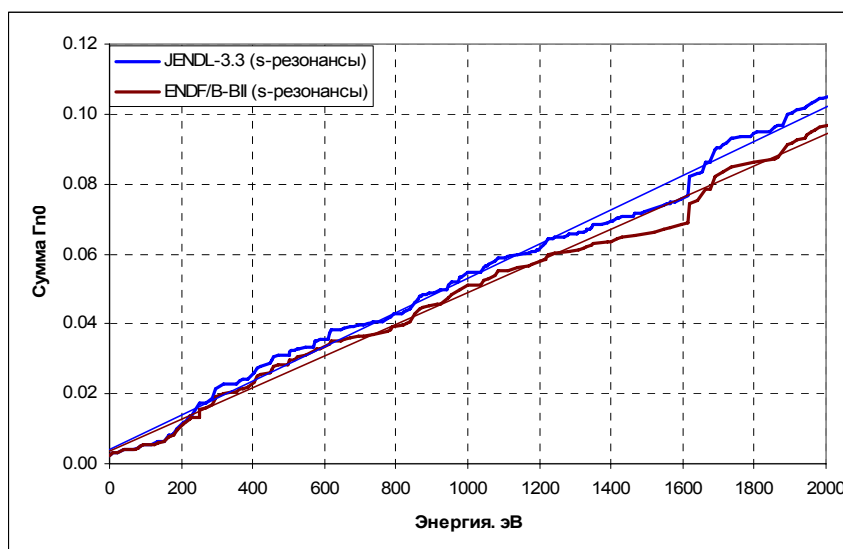


Рис.2. Нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин.

Область неразрешенных резонансов в сравниваемых оценках описывается одинаково. Одна и та же оценка используется и вне резонансной области, так что проблема выбора отпадает.

В РОСФОНД целесообразно все же принять оценку ENDF/B-VII, как более позднюю, а также потому, что в ней активное участие принимал столь авторитетный специалист, как Саид Мухабхаб.

Заключение

В РОСФОНД следует включить оценку из ENDF/B-VIIb2, дополнив ее файлом MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{114}\text{In}^m$, $^{115}\text{Cd}^m$, $^{113}\text{Cd}^m$ а также изомера $^{116}\text{In}^m$, используемого для регистрации нейтронов методом активации, воспользовавшись данными EAF-2003. Ввести файл MF=10 с сечением образования $^{115}\text{In}^m$, также используемого в активационных измерениях.

Заметим, что экспериментальная информация о сечении захвата с образованием $^{116}\text{In}^m$ ($T_{1/2}=54.29\text{мин.}$) довольно противоречива и тщательная переоценка сечения образования этого изомера была бы весьма целесообразна. Следует пересмотреть и данные о сечении образования $^{115}\text{In}^m$, обеспечив их соответствие с данными по сечениям неупругого рассеяния с возбуждением дискретных уровней и континуума и схемы распада уровней.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.