

65.ТЕРБИЙ

Природный тербий содержит лишь один изотоп – ^{159}Tb . Имеется также 5 долгоживущих нейтронно-дефицитных радиоактивных изотопов тербия (один из которых - ^{156}Tb – обладает достаточно долгоживущим изомером) и три нейтронно-избыточных радиоактивных изотопов.

65.1. Тербий-153

В реакторе может образовываться в ничтожных количествах в результате реакции $^{156}\text{Dy}_{(0.06\%)}(n, nt)$.

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.34$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в ^{153}Gd , который затем распадается ($T_{1/2}=239.47$ дн.) в стабильный европий-153.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки не имеется.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 113 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1965 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

65.2. Тербий-155

В реакторе может образовываться в ничтожных количествах в результате реакции $^{156}\text{Dy}_{(0.06\%)}(n, d), (n, n'p)$.

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.32$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в стабильный ^{155}Gd .

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки не имеется.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 109 барн.

Резонансный интеграл захвата: 2028 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{156}\text{Tb}^m$. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения
Николаев М.Н.

65.3. Тербий-156

В реакторе может образовываться в ничтожных количествах в результате реакции $^{156}\text{Dy}_{(0.06\%)}(n,p)$, $^{158}\text{Dy}_{(0.10\%)}(n,t)$.

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.4$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в стабильный ^{156}Gd .

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки не имеется.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 155 барн.

Резонансный интеграл захвата: 2360 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3.

Автор заключения
Николаев М.Н.

65.4. Тербий-156-m

В реакторе может образовываться в ничтожных количествах в результате реакции $^{156}\text{Dy}_{(0.06\%)}(n,p)$, $^{158}\text{Dy}_{(0.10\%)}(n,t)$.

Радиоактивен ($T_{1/2}=24.4$ ч.). Испытывает изомерный переход в основное состояние.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 94.5 барн.

Резонансный интеграл захвата: 220 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения
Николаев М.Н.

65.5. Тербий-157

В реакторе может образовываться в ничтожных количествах в результате реакций $^{158}\text{Dy}_{(0.10\%)}(n,d)$, (n,np) ; $^{159}\text{Tb}(n,3n)$; $^{158}\text{Tb}(T_{1/2}=180\text{лет})(n,2n)$.

Радиоактивен ($T_{1/2}=71$ г.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный гадолиний-157.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 84.3 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1843 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{156}\text{Tb}^m$. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

65.6. Тербий-158

В реакторе может образовываться в небольших количествах в результате реакций $^{158}\text{Dy}_{(0.10\%)}(n,p)$ или $^{159}\text{Tb}(n,2n)$; ¹

Радиоактивен ($T_{1/2}=180$ лет). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный гадолиний-157(83.4%); в остальных случаях испытывает бета-распад в стабильный диспрозий-158.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 105 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1773 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{156}\text{Tb}^m$. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

65.7. Тербий-159

Единственный стабильный изотоп.

В современных библиотеках фигурируют три различных оценки нейтронных данных для тербия:

1. Оценка Группелара и Менапаса (Gruppelaar H, Menapace E.), выполненная в 1983 г. – используется в JEFF-3.1.
2. Оценка японской рабочей группы JNDC FPND, выполненная в 1984 г. для JENDL-2 используется в JENDL-3.3 и в ФОНД-2.2;
3. Оценка С.Мухабхаба и японской рабочей группы JNDC FPND, выполненная в 2005 г. и включенная в библиотеку ENDF/B-VIIb2.

Ниже эти оценки будут сравнены между собой и с имеющимися экспериментальными данными

1. Тепловая и резонансная области

В таблице 1. сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы захвата.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

	$\sigma(0.0253\text{эВ})$	RI
JEFF-3.1	23.2	406
JENDL-3.3	26.52	471
ENDF/B-VIIb2	23.35	415
Мухабхаб-03	23.3 ± 0.4	418 ± 20

Преимущество ENDF/B-VIIb2 очевидно.

Область разрешенных резонансов в оценке JEFF-3.1 содержит лишь 30 резонансов и простирается от 17 до 170 эВ.

В JENDL-3.3 эта область содержит 227 резонансов выше энергии связи нейтрона и одно связанное состояние. Максимальная энергия -1192.2 эВ. Граница области -1188 эВ.

В ENDF/B-VIIb2 область разрешенных резонансов содержит 222 резонанса выше энергии связи нейтрона и два связанных состояния. Максимальная энергия - 1192.2 эВ. Граница области -1250 эВ.

На рис.1 сравниваются нарастающие суммы резонансов в двух последних оценках. В ENDF/B-VIIb2 отсутствуют очень слабые резонансы при 23.1, 35.1 и 35.9 эВ и пары резонансов при 130 эВ и 155 эВ объединены. Более существенны различия в оценке нейтронных ширин. На рис. 2 показаны нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин. Видно, что в ENDF/B-VII нейтронные ширины в среднем несколько ниже. Однако нарастающие суммы в обеих оценках весьма близки к линейным, показывая, что пропущены только очень слабые резонансы (наличие пропуска очевидно из рис.1).

Из приведенных данных следует, что верхняя граница области разрешенных резонансов в ENDF/B-VII несколько завышена. Граница между двумя последними резонансами, принятая в JENDL-3.3 представляется более оправданной. В то же время, более поздняя оценка резонансных параметров, выполненная при участии С. Мухабхаба делает параметры из ENDF/B-VIIb2 более привлекательными.

Что касается области неразрешенных резонансов, то в них приняты одни и те же параметры. Верхняя граница этой области – 100 кэВ. Сечения в ней до порога неупругого рассеяния (58.368 кэВ) полностью определяются параметрами резонансов. Выше этого порога, вклад неупругого рассеяния учтен плавной подложкой в полное

сечение. Влияние неупругого рассеяния на резонансную самоэкранировку сечений захвата и упругого рассеяния учитывается введением ширины конкурирующего процесса.

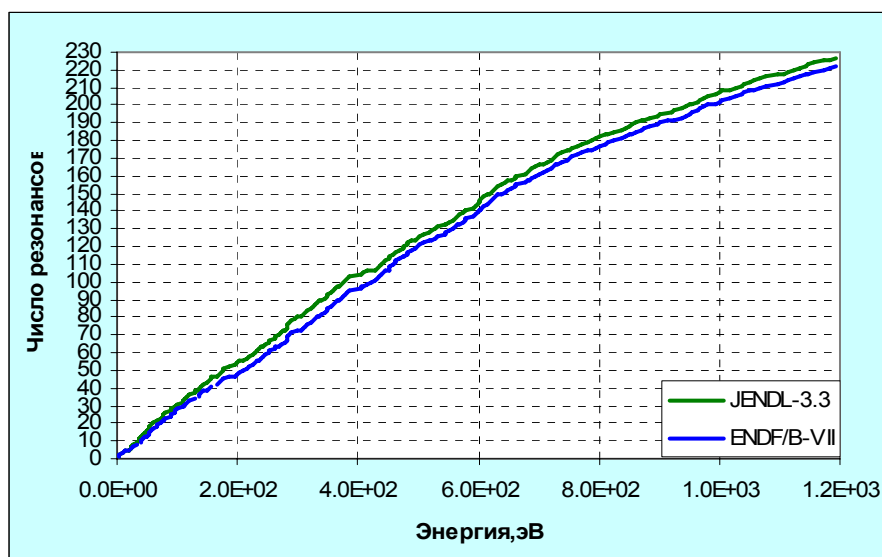


Рис.1. Нарастающая сумма числа резонансов

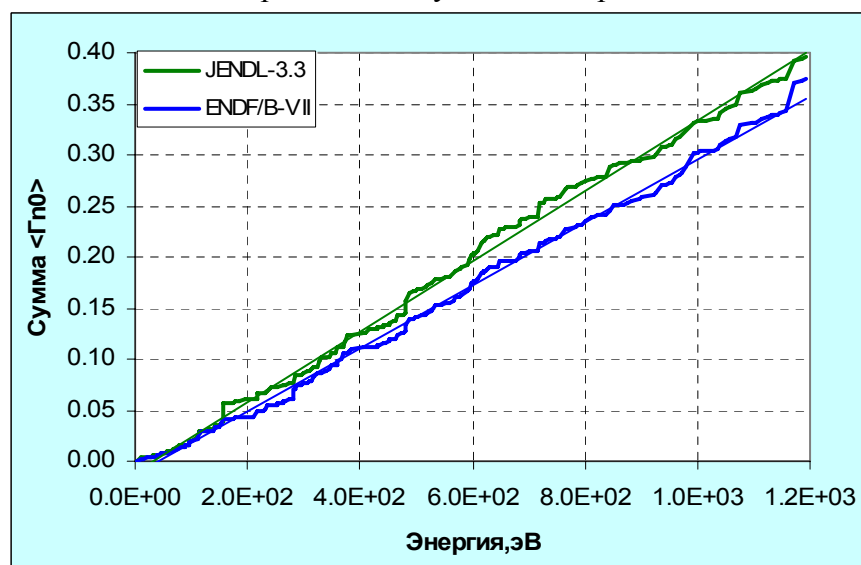


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин

2. Сечения вне резонансной области

На рис.3. Приведены экспериментальные данные по сечению захвата в сравнении с оценкой JEFF-3.1 и JENDL-3.3. Вне резонансной области последняя оценка принята и в ENDF/B-VIIb2. Преимущества последней оценки перед оценкой JEFF-3.1 очевидны. В то же время в важной области сотен кэВ оцененное сечение, видимо, завышено, о чем свидетельствуют данные и Боховко и Гиббонса.

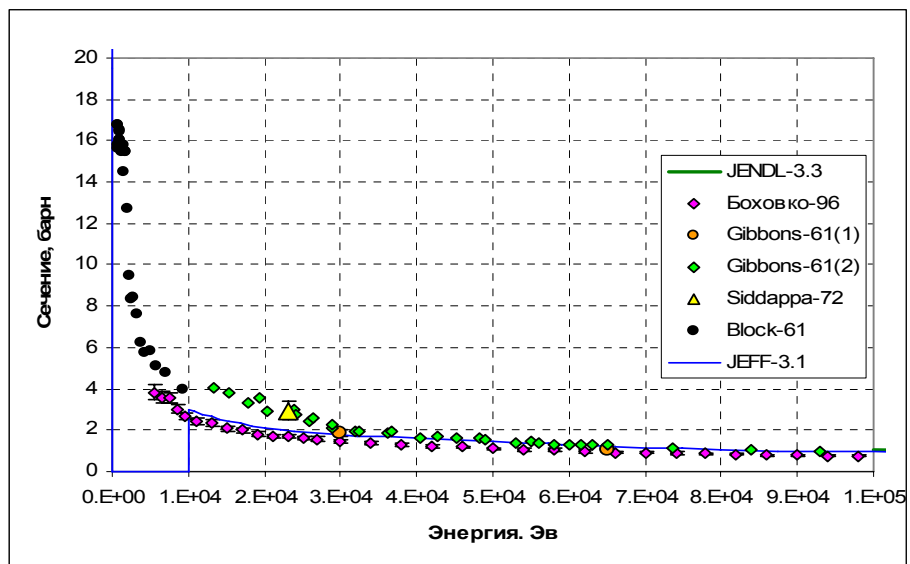


Рис.3а. Сечение захвата

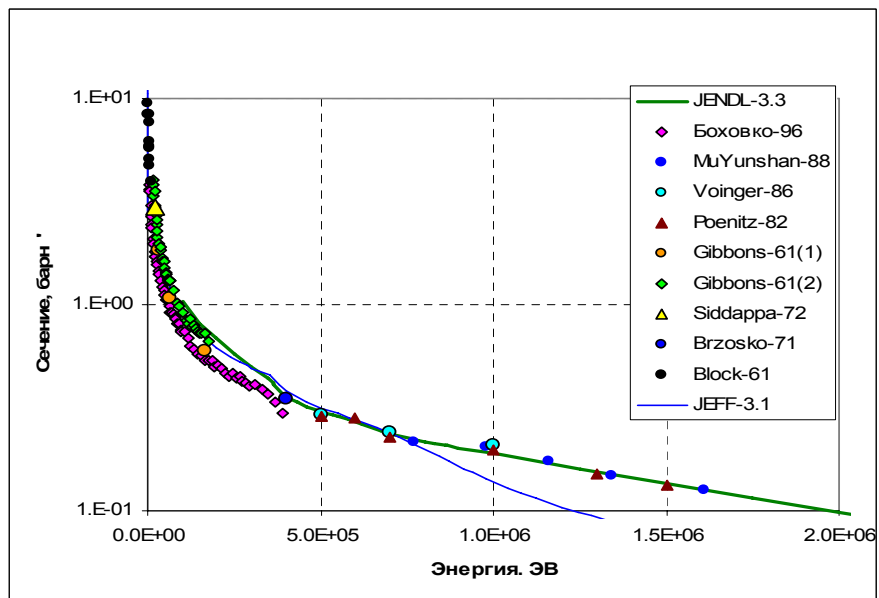


Рис.3б. Сечение захвата

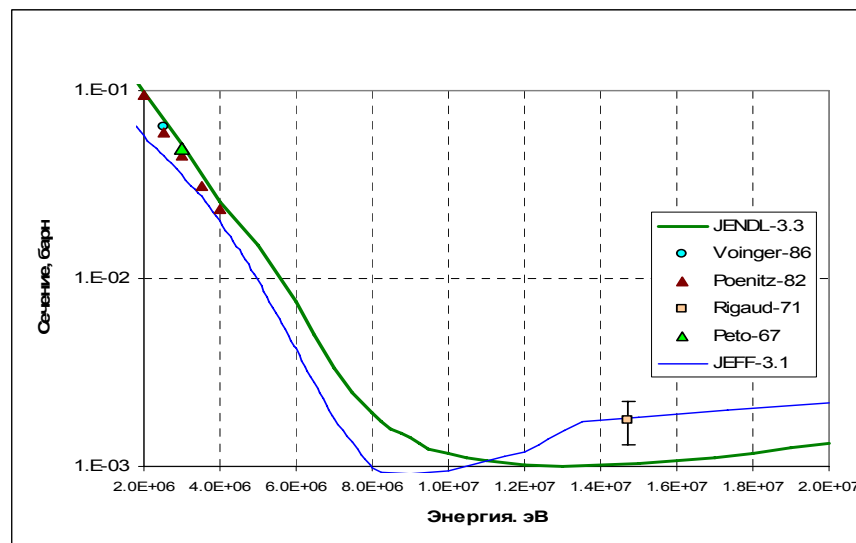


Рис.3в. Сечение захвата

При 14 – 15 МэВ оценка JENDL-3.3 лежит ниже результата Риги на два декларируемых автором стандартных отклонения. Для решения вопроса об истинном значении сечения в этой области весьма желательны дополнительные экспериментальные данные.

На рис.4. сравниваются с экспериментальными данными оцененные полные сечения. Преимущество последней оценки очевидно и здесь.

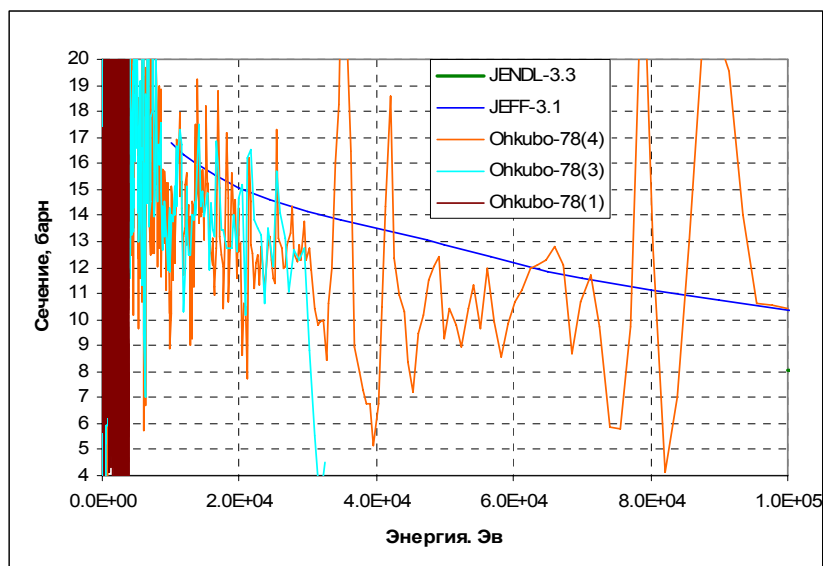


Рис.4а. Полное сечение

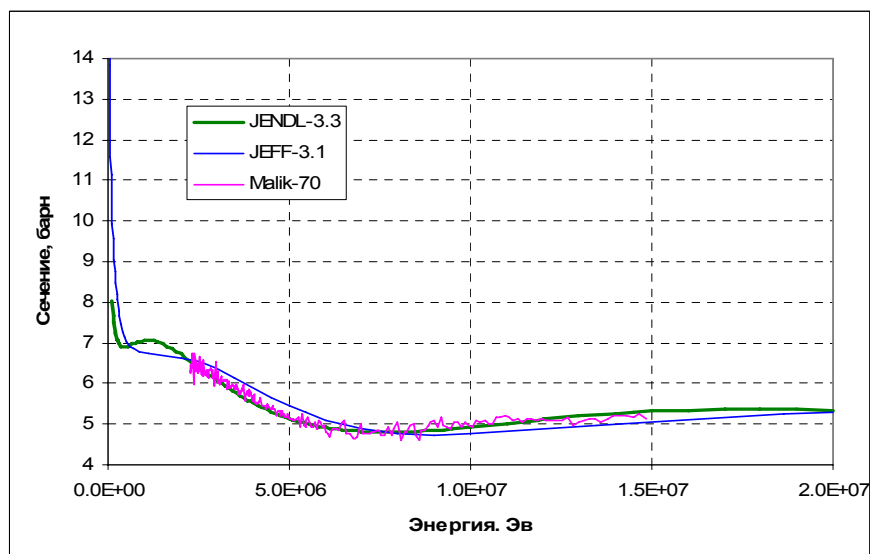


Рис.4б. Полное сечение

На рис. 5 приведены оцененные и измеренные сечения реакции (n,2n), в результате которой образуется долгоживущий ($T_{1/2}=180$ лет) изотоп ^{158}Tb . Согласие оценки JENDL-3.3 с экспериментальными данными приемлемое, чего не скажешь об оценке, принятой в JEFF-3.1, в которой реакция (n,3n) слита с реакцией (n,2n).

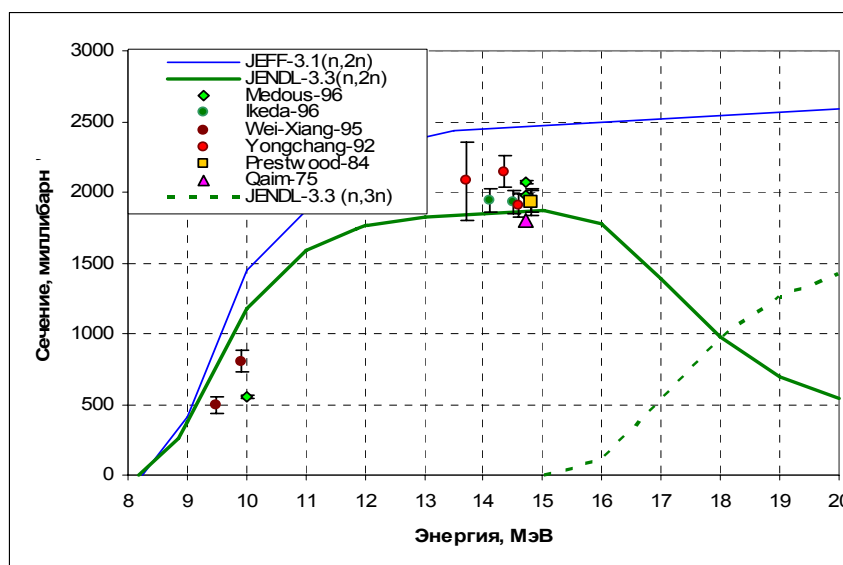


Рис.5. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) – пунктир.

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из ENDF/B=VIIb2, содержащий уточненные резонансные параметры. Установить границу области разрешенных резонансов такой, как в JENDL-3.3.

В дальнейшем следует пересмотреть оценку, по крайней мере в части значений сечения захвата вне резонансной области. Следует также выявить причины превышения оцененного сечения реакции (n,2n) вблизи порога над экспериментальными данными и попытаться устранить их.

Автор заключения

Николаев М.Н.

65.8. Тербий-160

В реакторе может образовываться в небольших количествах в результате реакции $^{159}\text{Tb}(n,\gamma)$, а также как продукт деления.

Радиоактивен ($T_{1/2}=72.3$ дн.). Испытывает бета-распад в стабильный диспрозий-160.

Имеются полные наборы нейтронных данных в библиотеках JEFF-3.1 и ENDF/B-VIIb2.

В JEFF-3.1 содержится оценка Шентера, Шмиттроса и Рейча (R.E.Schenter, F.Schmittroth, C.Reich), выполненная в середине 70-х годов.

В ENDF/B-VIIb2 содержится оценка Мухабхаба (S. Mughabghab)- резонансная область и Хермана, Обложинского и Сарера (M.Herman, P.Oblozinsky, B.Sarer) вне резонансной области.

В EAF-2003 приводятся оценки нейтронных сечений.

Различие в оцененных данных велико:

Библиотека	Полное	Захват	Упругое	Резонансный интеграл захвата
ENDF/B-VIIb2	339.2	333.7	5.44	3645
JEFF-3.1	530.4	525	5.4	1131
EAF-2003		525		1856

Заключение

Оценка, принятая в ENDF/B-VIIb2, безусловно, является наиболее надежной и ее и следует включить в РОСФОНД.

Автор заключения

Николаев М.Н.

65.9. Тербий-161

В реакторе может образовываться в небольших количествах в результате реакций $^{160}\text{Tb}(n,\gamma)$ или $^{160}\text{Dy}(n,p)$, $^{161}\text{Dy}(n,pr)$ и т.п., а также как продукт деления.

Радиоактивен ($T_{1/2}=6.906$ дн.). Испытывает бета-распад в стабильный диспрозий-161.

Полных наборов нейтронных данных не имеется.

В EAF-2003 приводятся теоретические оценки нейтронных сечений.

Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 47.6 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1236 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003.

Автор заключения

Николаев М.Н.