

98.КАЛИФОРНИЙ

Основной интерес к нейтронным сечениям изотопов калифорния был связан с наработкой ^{252}Cf , как компактного источника нейтронов, используемого в самых различных областях. При этом исходным продуктом является ^{249}Cf , образующийся при бета-распаде ^{252}Bk , который, в свою очередь, является продуктом распада ^{249}Cm . В связи с изложенным понятно, что на измерение нейтронных данных для ^{249}Cf и более тяжелых изотопов вплоть до ^{252}Cf обращалось гораздо большее внимание, чем на данные для более тяжелых сравнительно долгоживущих изотопов ^{253}Cf и ^{254}Cf , а экспериментальных данных для легких нейтронно-дефицитных ^{246}Cf и ^{248}Cf вообще нет.

Отметим, что кроме дифференциальных данных, на которые даются ссылки в нижеследующих параграфах, при оценке нейтронных данных использовались и неопубликованная информация о изотопном составе облучаемых образцов калифорния¹.

98.1. Калифорний-246

Альфа-активен ($T_{1/2}=35.7$ ч.).Вероятность спонтанного деления $2.5 \cdot 10^{-4}\%$. Возможный источник: реакция $^{248}\text{Cf}_{(T_{1/2}=333.5 \text{ дн.})}(n,3n)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. Теоретически оцененные нейтронные сечения приведены в EAF-2003 (последняя версия оценки). Экспериментальных данных для их проверки нет. В EXFOR содержатся лишь скудные данные о числе мгновенных нейтронов, испускаемых при спонтанном делении: $\nu_p=3.14 \pm 0.09$ (Даковский-73) и данные о средней кинетической энергии осколков деления (Friedman-63).

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата совпадающие с таковыми для калифорния-248:

$\sigma_c=37.6$ барн; $RI=106.2$ барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД оцененные данные из EAF-2003. Файл MF=8 удалить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

¹ В частности, работа R.W.Benjamin,F.J.McCrosson,V.D.Vandervelde and T.C.Gjrrrell, USERDA Report DP-1394(1975).

98.2. Калифорний-248

Альфа-активен ($T_{1/2}=333.5$ дн.). Возможные источники: бета-распад ^{248}Bk и реакция $^{249}\text{Cf}_{(T_{1/2}=350.6 \text{ лет.})}(n,2n)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. Теоретически оцененные нейтронные сечения приведены в EAF-2003 (последняя версия оценки). Экспериментальных данных для их проверки нет. В EXFOR содержатся лишь данные о средней кинетической энергии осколков деления (Friedman-63).

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата, совпадающие с таковыми для калифорния-246:

$\sigma_c=37.6$ барн; $RI=106.2$ барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД оцененные данных из EAF-2003. Парциальные сечения, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и сумму записать в соответствующую (MT=103) секцию файла MF=3. Включить файл MF=9 с секцией MT=103 с вероятностями образования $^{248}\text{Bk}^m$ и $^{248}\text{Bk}^g$. Файлы MF=8 и 10 удалить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

98.3. Калифорний-249

Альфа-активен ($T_{1/2}=350.6$ лет). Возможные источники: бета-распад ^{249}Bk и реакция $^{250}\text{Cf}_{(T_{1/2}=13.08 \text{ лет.})}(n,2n)$.

В современных библиотеках используются две оценки:

1. Чжоу Делиня и Су Чжонгди (Zhou Dtlin, Su Zhongdi, 1989) – в ENDF/B-VIIb2;
2. Накагава и Лью (T.Nakagawa, T.Liu, 1995) – в JENDL-3.3, в JEFF-3.1² и в ФОНД-

2.2.

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с экспериментальными данными.

Источник	$\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$	RI_c	$\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$	RI_f	ν_p
ENDF/B-VII	496	572	1633	2381	3.884
JENDL-3.3	504	694	1667	2209	4.060
EAF-2003	482	812	1666	2098	
Мухабхаб-84	497±21	765±35	1642±33	2380±85	4.06±0.04
Halperin-71	478±25	765±35			
Гаврилов-75	540±33	720±120			
Metta-64			1735±70		
Halperin-70			1690±160	2940±280	
Фурсов-71			1619±43		
Benjamin-72			1660±50	2114±70	
Фомушкин-73			1630±100		
Гаврилов-75			1610±110	1800±200	
Володин-72					4.06±0.04

² В JEFF-3.1 введено 8-групповое описание запаздывающих нейтронов и даны их спектры.

Из приведенных данных видно, что более поздняя оценка, принятая в JENDL-3.3, лучше соответствует совокупности экспериментальных данных.

Область разрешенных резонансов в обеих оценках простирается до 70 эВ, максимальная резонансная энергия и там и там – 89.8 эВ. Однако в ENDF/B-VII в этой области приводятся параметры 63 резонансов, а в JENDL-3.3 – только 56 (не считая связанных состояний). На рис. 1 сравниваются нарастающие суммы числа резонансов, а на рис. 2 – суммы приведенных нейтронных ширин. Из рис.2 видно, что резонансы, отсутствующие в последней оценке отнюдь не слабые: их вклад в сумму приведенных ширин столь же существенен, сколько и в сумму резонансов. В описаниях обеих оценок говорится, что в их основе лежит эксперимент Бенжамина³, а в ENDF/B-VII – есть ссылка и на эксперимент Ануфриева⁴. Между тем из 8 резонансов, присутствующих только в оценке ENDF/B-VII, в работе Ануфриева был замечен только один – предпоследний из зарегистрированных в этой работе. Возможно, новая оценка Мухабхаба, выполненная в 2006 г., но пока исполнителям данной работы не известная в полной мере, прольет свет на причины этих расхождений. Пока же преимущество следует отдать оценке Накагавы и Лью.

Область неразрешенных резонансов в обеих оценках простирается до 30 кэВ, учитываются вклады s-, p- и d- резонансов, но параметризация различается. На рис. 3а оцененные сечения в области неразрешенных резонансов сравниваются с результатами измерений с высоким разрешением. Как видно, различия между оценками в этой области несущественны.

На рис. 3б и 3в сечение деления сравнивается с экспериментальными данными при более высоких энергиях. Здесь преимущество оценки Накагавы и Лью очевидно.

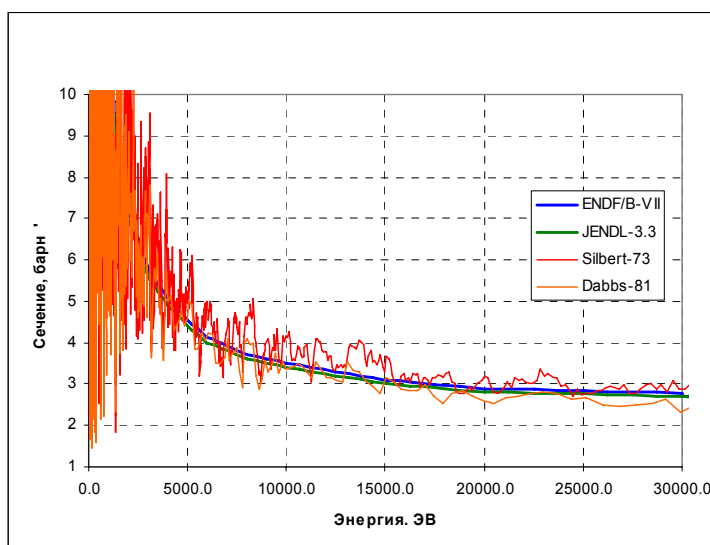


Рис.3а. Сечение деления.

³ Benjamin R.W. et al.: Nucl. Sci. Eng., 85, 261 (1983).

⁴ В. Ануфриев и др., Атомная Энергия, 55,285(1983)

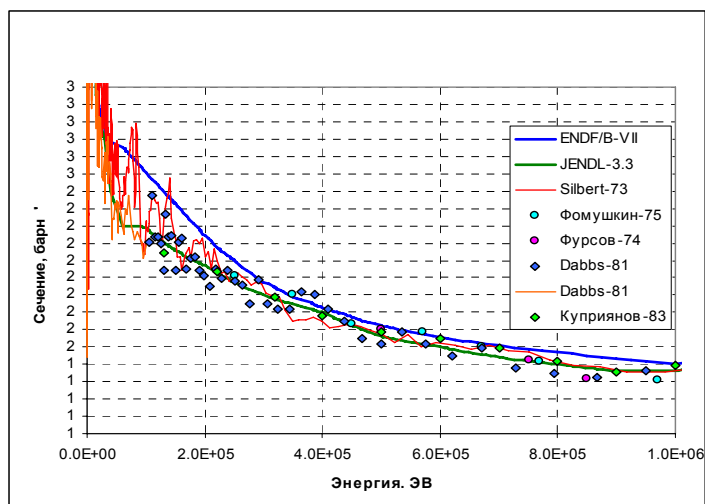


Рис.3б. Сечение деления

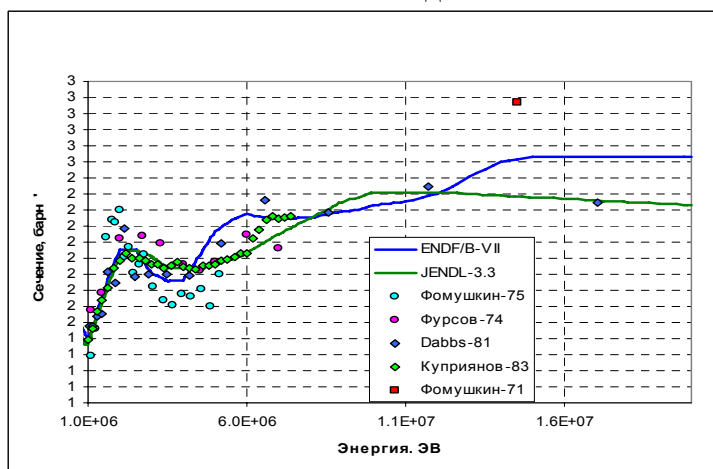


Рис.3в. Сечение деления.

Заключение

В РОСФОНД следует включить оценку Накагава и Лью из JENDL-3.3. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1. Включить данные о выходах продуктов деления из ENDF/B-VI.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98.4. Калифорний-250

Альфа-активен ($T_{1/2}=13.08$ лет). Возможные источники: бета-распад ^{250}Bk и реакции $^{249}\text{Cf}_{(T_{1/2}=350.6 \text{ лет.})}(n,\gamma)$, $^{251}\text{Cf}_{(T_{1/2}=898 \text{ лет.})}(n,2n)$.

В современных библиотеках используются две оценки:

1. Бенжамина, Мак-Кроссена и Хавертон (Benjamin, McCrosson, Howerton, 1975), выполненная для ENDF/B-V и перешедшая в ENDF/B-VII.
2. Накагавы (T.Nakagawa, 1986), используемая в JENDL-3.3, JEFF-3.1 и ФОНД-2.2

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с экспериментальными данными.

Источник	$\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$	RI_c	$\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$	RI_f	ν_p
ENDF/B-VII	1611	11224	0	0.66	0
JENDL-3.3	1779	8418	4.09	19.36	3.63
EAF-2003	1613	11223	112	530	
Мухахаб-84	2034±200	11600			
Magnusson-54	1500				
Halperin-71	2034±200				
Гаврилов-78	1800				
Metta-64			350		
Folger-68			1500		
Smoth-68			1090		
Danon-91			112±99		

В обеих оценках введены области фиктивных разрешенных резонансов, а затем – неразрешенных резонансов. И те и другие данные равно ненадежны. На рис. 1а и 1б оцененные сечения деления сравниваются с имеющимися экспериментами в области разрешенных резонансов. В оценке ENDF/B-VII делительные ширины равны нулю, так что равно нулю и сечение.

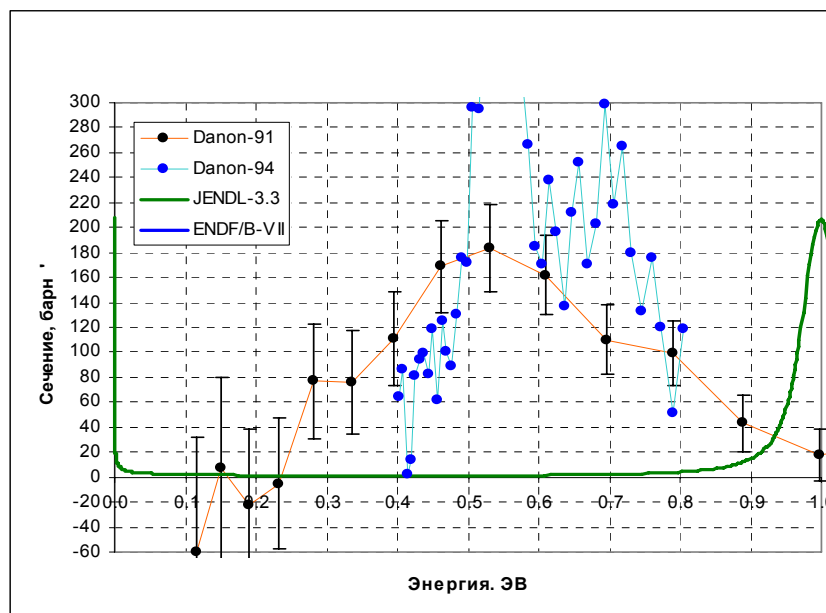


Рис.1а. Сечение деления

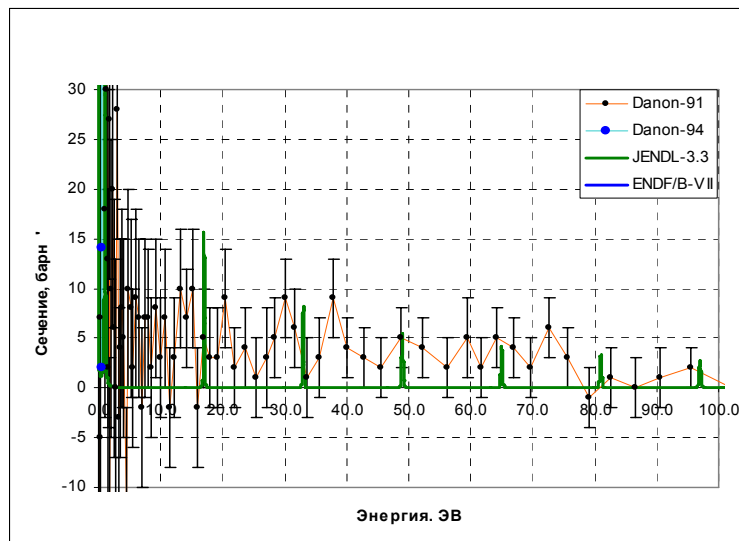


Рис.1б. Сечение деления.

Как видно, ни одна из оценок не описывает экспериментальные данные Данона, указывающие на наличие резонанса при энергии около 0.6 эВ. В области десятков эВ фиктивные резонансы введенные Накагавой, также не описывают среднее сечение, следующее из эксперимента Данона.

На рис.1в приведены данные о сечении деления при высоких энергиях. Экспериментальные данные в этой области отсутствуют.

Экспериментальных данных о сечении захвата в резонансной области и выше в EXFORe нет.

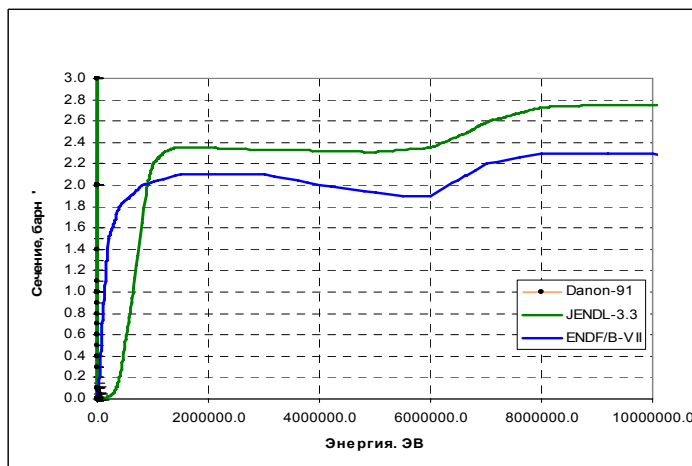


Рис.1в. Сечение деления.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку Накагавы из JENDL-3.3. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1.

В дальнейшем следует провести новую оценку, учитывающую данные Данона вкупе с теоретическими расчетами сечений.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98.5. Калифорний-251

Альфа-активен ($T_{1/2}=898$ лет). Возможные источники: бета-распад ^{251}Bk и реакции $^{250}\text{Cf}_{(T_{1/2}=13.08 \text{ лет.})}(n,\gamma)$, $^{252}\text{Cf}_{(T_{1/2}=2.645 \text{ лет.})}(n,2n)$.

В современных библиотеках используются две оценки:

1. Бенжамина, Мак-Кроссена и Хавертон (Benjamin, McCrosson, Howerton, 1975), выполненная для ENDF/B-V и перешедшая в ENDF/B-VII.

2. Накагавы (T.Nakagawa, 1986), используемая в JENDL-3.3 и ФОНД-2.2

В JEFF-3.1 используется та же оценка, что и в ENDF/B-VII с заменой 6-группового представления запаздывающих нейтронов на 8-групповое.

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с экспериментальными данными.

Источник	$\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$	RI_c	$\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$	RI_f	ν_p
ENDF/B-VII	2862	1631	5233	4947	4.13
JENDL-3.3	2876	1604	4933	2762	4.10
EAF-2003	2864	1613	5328	4887	
Мухабхаб-84	2850±150	1600±30	4895±250	5900±100	
Magnusson-54	3000				
Halperin-71	2850±150			6900-2850 =4050±1400	
Гаврилов-78	1800				
Metta-64			3000±260		
Ragaini-74			4800±250		
Smith-68	4970-3550=1420		3550		
Folger-68	$\sigma_{abs}(0.0253 \text{ эВ})=6600$				

Как видим, разброс экспериментальных данных велик и разброс оценок ему соответствует.

Для быстрых нейтронов никаких данных в EXFORe нет.

В обеих оценках введены области фиктивных разрешенных резонансов, за которой следует область неразрешенных резонансов, обладающая не большей надежностью.

Заключение

Целесообразно принять в РОСФОНД оценку Накагавы (JENDL-3.3) как более позднюю. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1. Включить данные о выходах продуктов деления из ENDF/B-VI.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98.6. Калифорний-252

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.645$ лет). Испытывает альфа распад в ^{248}Cm (96.91%), а в остальных случаях – спонтанное деление. Источник: реакция $^{251}\text{Cf}_{(T_{1/2}=898 \text{ лет.})}(n,\gamma)$.

В современных библиотеках используются две оценки:

1. Бенжамина, Мак-Кроссена и Хавертона (Benjamin, McCrosson, Howerton, 1975), выполненная для ENDF/B-V и перешедшая в ENDF/B-VII и JEFF-3.1.

2. Накагавы (T.Nakagawa, 1987), используемая в JENDL-3.3 и ФОНД-2.2

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с экспериментальными данными.

Источник	$\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$	RI_c	$\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$	RI_f	ν_p
ENDF/B-VII	20.5	47.1	32.2	111	$\nu_{\text{tot}}=4.06$
JENDL-3.3	20.7	47.0	33.0	99.7	3.884
EAF-2003	20.5	47.0	33.1	99.7	
Мухабхаб-84	20.4 ± 1.5	43.5 ± 3.0	32 ± 4	110 ± 30	
Magnusson-54	25				
Harvey-54	30				
Halperin-71	20.4 ± 2.0	43.5 ± 3.0	32 ± 4	110 ± 30	
Folger-68	$\sigma_{\text{abs}}(0.0253 \text{ эВ})=8.6; RI_{\text{abs}}=42$				

Различия между оценками приведенных величин менее экспериментальных погрешностей.

Область разрешенных резонансов в ENDF/B-VII простирается до 366.5 эВ и содержит параметры 20 фиктивных резонансов не считая связанного состояния. В JENDL-3.3 приводятся все 37 резонансов, параметры которых приводятся в компиляции Мухабхаба-84, включая связанное состояние. Нейтронные ширины в этой компиляции, как правило, не приводятся, но известны резонансные интегралы деления.

Исключением из этого правила является резонанс при 66.37 эВ, для которого $g\Gamma_n$ определено, и еще три резонанса, для которых приведены верхние оценки $g\Gamma_n$. В JENDL-3.3 для этих резонансов приняты именно эти верхние оценки.

На рис.1 сравниваются нарастающие суммы резонансов в обсуждаемых оценках. Строгая линейность этой суммы для ENDF/B-VII является свидетельством искусственности принятых резонансов.

На рис. 2 приведена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин для оценки JENDL-3.3. Отчетливо видны ступеньки при энергиях 557.2 эВ, 726.1 эВ и 855.1 эВ, где приняты верхние оценки $g\Gamma_n$.

Область неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 простирается до 30 кэВ и описывается параметрами s- и p-волны; в ENDF/B-VII эта область учитывает только s-волну и простирается до 10 кэВ.

На рис. 1а приведено сечение деления в области разрешенных резонансов, а на рис. 1б – выше этой области в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. В сечении деления наблюдаются значительные расхождения, особенно в резонансной области. Заметим, что Мухабхаб не указывает ссылку на работу, на основе которой он оценил резонансные параметры. Ссылки на измерения Мура у него также не содержится.

Ненадежность оценки сечений калифорния-252 очевидна, однако при скудости экспериментальных данных добиться этой надежности, видимо, невозможно.

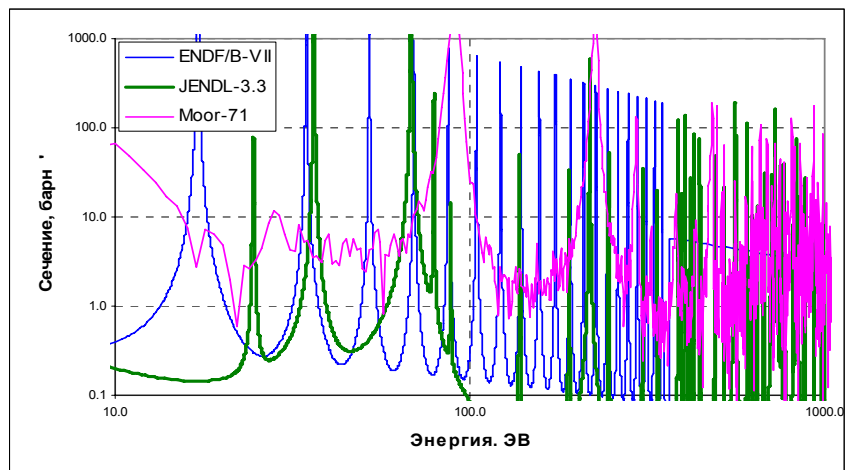


рис.1а. Сечение деления

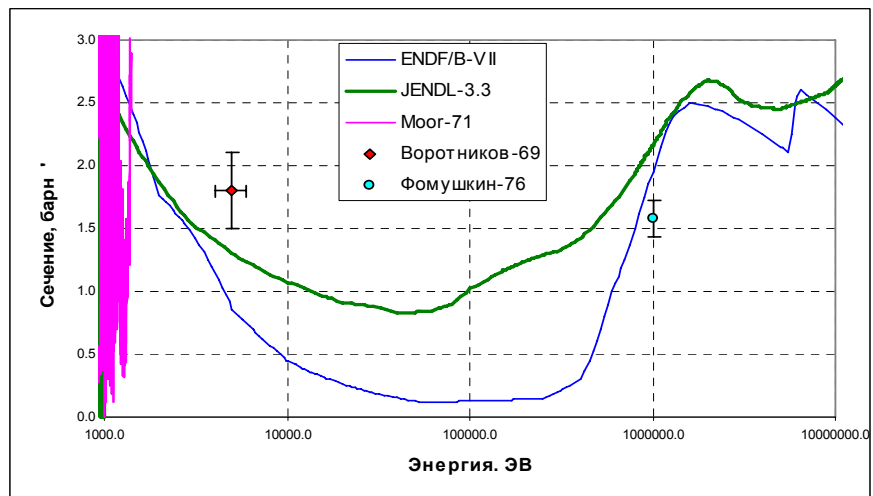


Рис.16. Сечение деления

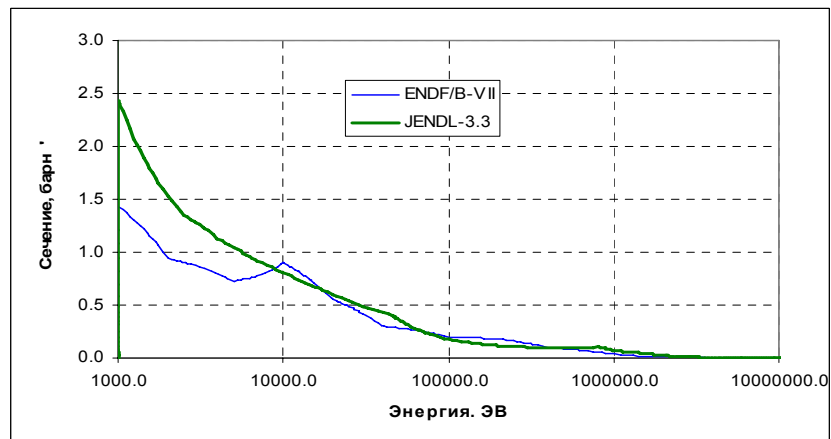


Рис.2. Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку Накагавы из JENDL-3.3 как более позднюю. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98.7. Калифорний-253

Радиоактивен ($T_{1/2}=17.81$ дн.). Испытывает бета-распад в ^{253}Es (99.69%); в остальных случаях – альфа-распад в ^{249}Cm . Источник: реакция $^{252}\text{Cf}_{(T_{1/2}=2.645 \text{ лет.})}(n,\gamma)$.

Более-менее полный набор нейтронных данных содержится лишь в ENDF/B-VIIb2 – оценка Бенжамина и Мак-Кроссона 1975 г.

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с экспериментальными данными.

Источник	$\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$	RI_c	$\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$	RI_f	ν_t
ENDF/B-VII	341	381	1136	1251	4.15
EAF-2003	18.0	20.5	1137	1254	
Мухабхаб-84	17.6 ± 1.8	13.3	1300 ± 240	2000 ± 400	
Bemis-70	17.6 ± 1.8		2550 ± 400		
Wild-73			1300 ± 240		
Smith-68	$\sigma_{abs}(0.0253 \text{ эВ})=165$				

Бенжамин и Мак-Кроссон полагают, что величина α , следующая из эксперимента Бемиса, слишком мала и положили ее равной 0.3.

В оценке Бенжамина и Мак-Кроссона введена область фиктивных разрешенных резонансов (120 резонансов до 1 кэВ) и область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 10 кэВ. Сечения в ней заданы параметрами только s-волны. Следует отметить, что эта оценка лишь формально распространена до 20 МэВ. Сечения деления и захвата в ней определены только до 10 кэВ, а далее полагаются равными нулю. Сечение упругого рассеяния выше 10 кэВ равно полному и не зависит от энергии. Никакие пороговые реакции, естественно, при этом не описываются.

На рис. 1 и 2 оценки сечений деления и захвата из ENDF/B-VII и EAF-2003 сравниваются друг с другом. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Как видно, сечения деления отличаются лишь тем, что в EAF-2003 выше 1 МэВ оно скачком возрастает от нуля до 2 барн и далее остается постоянным. Поведение сечения захвата не согласуется с поведением сечения деления, ведет себя не физично и не может быть принято. Наличие в файле EAF-2003 сечений пороговых реакций, полученных расчетным путем не является причиной для принятия этого файла в РОСФОНД: в файле из ENDF/B-VII, где этих данных нет, тот факт, что сечения важнейших реакций выше 10 кэВ не оценены, не скрыт от пользователя.

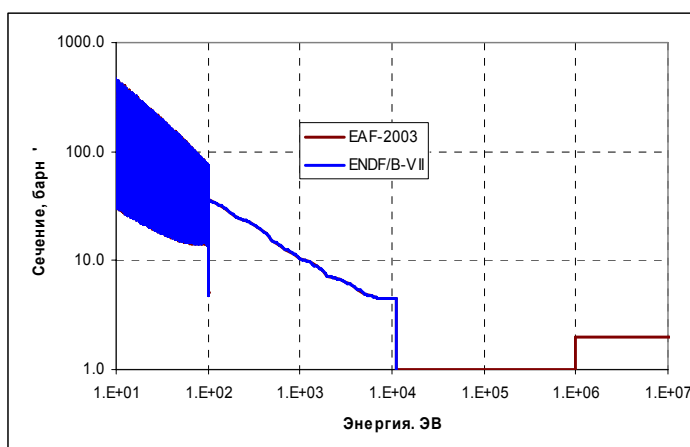


Рис.1. Сечение деления.

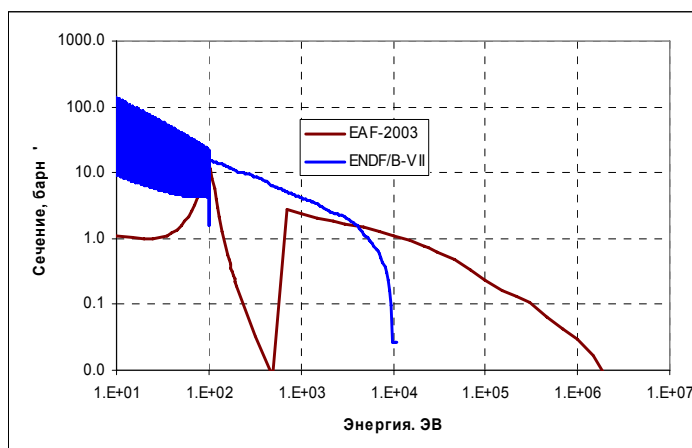


Рис.2. Сечение захвата.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл данных из ENDF/B-VII. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1.

При случае или при необходимости эту оценку целесообразно выполнить заново, опираясь на современные теоретические модели.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98.8. Калифорний-254

Радиоактивен ($T_{1/2}=60.5$ дн.). Испытывает спонтанное деление (99.69%); в остальных случаях – альфа-распад в ^{250}Cm . Источник: реакция $^{253}\text{Cf}(T_{1/2}=2.645 \text{ лет.})(n,\gamma)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. Теоретически оцененные нейтронные сечения приведены в EAF-2003 (последняя версия оценки).

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления в сравнении с экспериментальными данными.

Источник	$\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$	RI_c	$\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$	RI_f	ν_t
EAF-2003	4.5	2.07	2	13.8	
Мухабхаб-84	4.5 ± 1.5				
Harvey-54	2				
Lougheed-81	4.5 ± 1.0				

Заключение

Принять в РОСФОНД оцененные данные из EAF-2003. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1.

Файл MF=8 удалить.

Автор заключения

Николаев М.Н.