

93.1. Нептуний-234

Радиоактивен. ($T_{1/2}=4.4$ д). В результате захвата электрона превращается в ^{234}U .

В современных библиотеках оцененных данных не содержится полной оценки нейтронных данных для нептуния-234. Имеется лишь оценка R. A. Forrest, J. Кореску и J-Ch Sublet нейтронных сечений в активационной библиотеки EAF-2003.

На рисунке 1 показана энергетическая зависимость сечения деления и радиационного захвата нептуния-234.

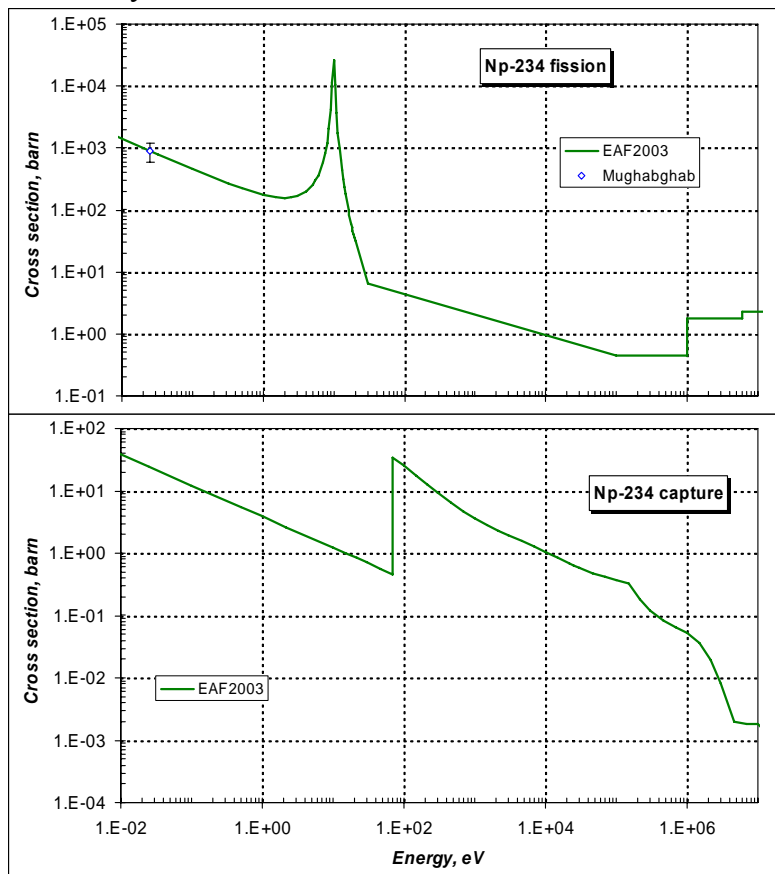


Рисунок 1 – Сечение деления и радиационного захвата на Np-234.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из EAF-2003.

Автор отбора данных
Кощеев В.Н.

93.2. Нептуний-235

Радиоактивен. ($T_{1/2}=369.1$ д). Как правило, в результате захвата электрона превращается в U-235, но с вероятностью $2.6E-3\%$ испытывает альфа-распад в протактиний-231.

В современных библиотеках оцененных данных содержится одна полная оценка нейтронных данных для нептуния-235: в JENDL-3.3 – оценка T.Nakagawa, 1995, принятая также в JEFF-3.1, ENDF/B-VIIb2, и оценка нейтронных сечений R. A. Forrest, J. Kopecky и J-Ch Sublet в EAF-2003.

На рисунке 2 показана энергетическая зависимость сечения деления нептуния-235, а на рисунке 3 – сечение радиационного захвата на Np-235.

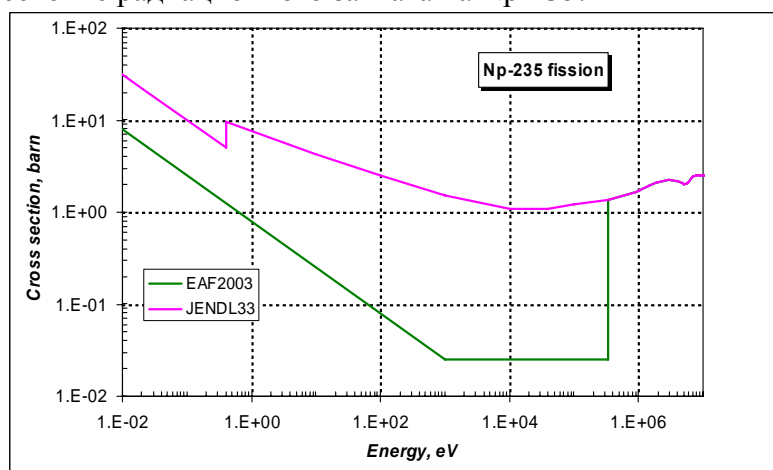


Рисунок 2 – Сечение деления Np-235.

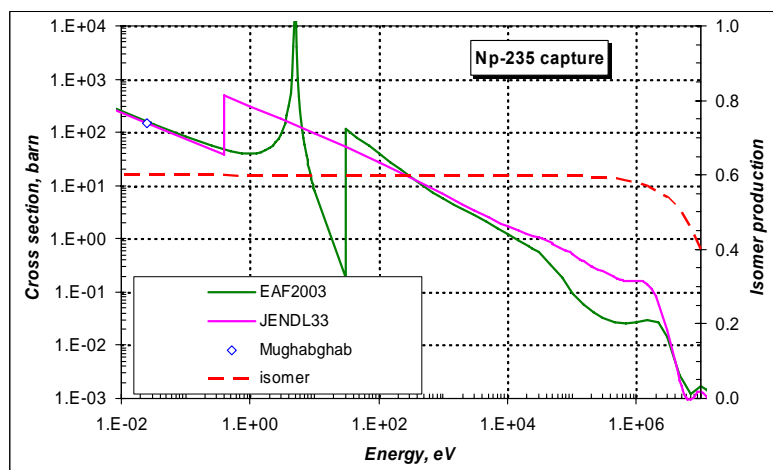


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата Np-235 и вероятность образования Np-236m.

Из приведенного на рисунке 2 сравнения сечения деления видно, что оценка Forrest и др. более реально отражает характер порогового сечения нечетно-нечетного изотопа нептуния-235, чем оценка Nakagawa.

Что касается сечения радиационного захвата, то согласно сравнению, приведенному на рисунке 3 видно, что авторы оценок используют различный подход к описанию сечения. Подход группы R. A. Forrest, J. Kopecky и J-Ch Sublet представляется более убедительным.

В результате захвата нейтронов ядром нептуния-235 может образовываться изотоп Np-236m, который является основным источником накопления U-232 в урановом топливе.

Вероятность его образования показана на рисунке 3 пунктирной кривой. В оценке T.Nakagawa информация об образовании изомера Np-236 отсутствует и это ее существенный недостаток.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из JENDL-3.3.

Нейтронные данные следует модифицировать следующим образом.

Использовать для сечения деления и радиационного захвата оценку R. A. Forrest, J. Kopecky и J-Ch Sublet, а полное сечение пересчитать с учетом выполненных изменений.

В секцию гладких сечений следует добавить составляющие захвата нейтронов – сечения реакции (n,p) и (n,a).

Следует добавить данные о выходах запаздывающих нейтронов (8 групп – на основе оценки JEFF-3.1); их спектры принять такими же, как для урана-235.

Следует, также, добавить информацию об образовании изомера Np-236m в результате радиационного захвата нейтронов, которую можно взять из активационной библиотеки EAF-2003.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

93.3. Нептуний-236

Радиоактивен. ($T_{1/2}=1540$ лет). В ~87% захватывая электрон Np-236 превращается в U-236; с вероятностью в ~ 13%, испытывая β -распад, превращается в Pu-236, и с вероятностью 0.16%, испытывая альфа-распад, превращается в протактиний-232.

В современных библиотеках оцененных данных содержится две полные оценки нейтронных данных для нептуния-236: в JENDL-3.3 – оценка T.Nakagawa (1993), принятая также в JEFF-3.1, оценка R. Q. Wright (1999), выполненная на основе оценки T.Nakagawa, и оценка нейтронных сечений R. A. Forrest, J. Kopecky и J-Ch Sublet в EAF-2003.

На рисунке 4 показана энергетическая зависимость сечения деления нептуния-236.

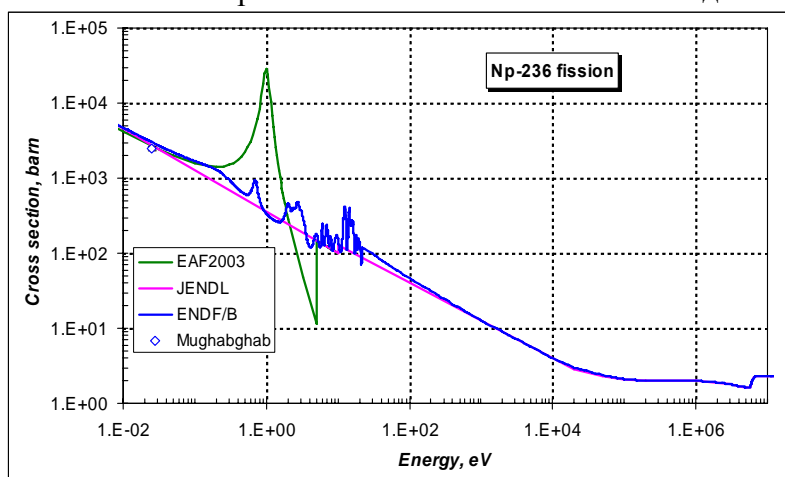


Рисунок 4 – Сечение деления Np-236.

Из приведенного на рисунке 4 сравнения видно, что выше 1 кэВ все оценки согласуются друг с другом. Все различия между оценками находятся в области энергий ниже 1 кэВ. Как уже отмечалось выше (п.93.2) различия между JENDL3.3 и EAF2003 объясняются различным подходом к описанию сечения. Что касается оценки Wright'a,

находящуюся в ENDF/B-VIIb2, то в ней используется набор резонансных параметров полученных группой Данона в 1995 году. На рисунке 5 показано сравнение оцененных сечений деления с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 5 сравнения видно, что оценка Wright'a согласуется с совокупностью экспериментальных данных наилучшим образом.

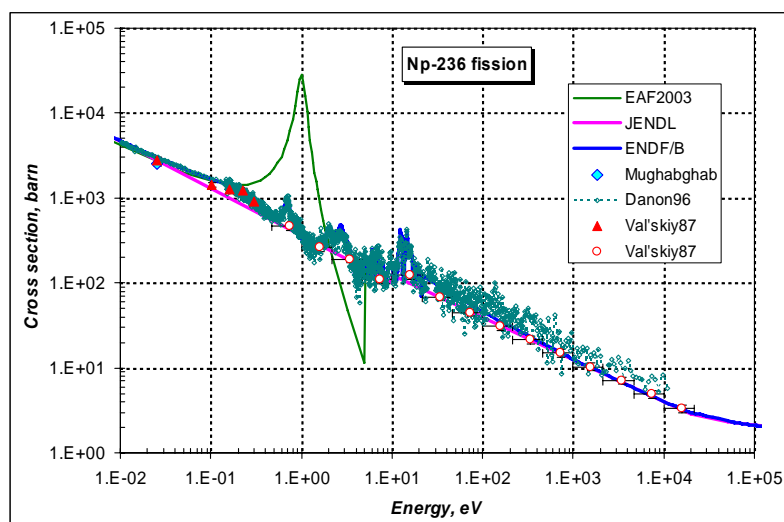


Рисунок 5 – Сравнение оцененных сечений деления Np-236 с экспериментальными данными.

На рисунке 6 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата Np-236. Экспериментальные данные здесь отсутствуют. Из приведенного на рисунке 6 сравнения видны различия в оценке сечения захвата между различными теоретическими подходами. Более обоснованной представляется оценка из ENDF/B.

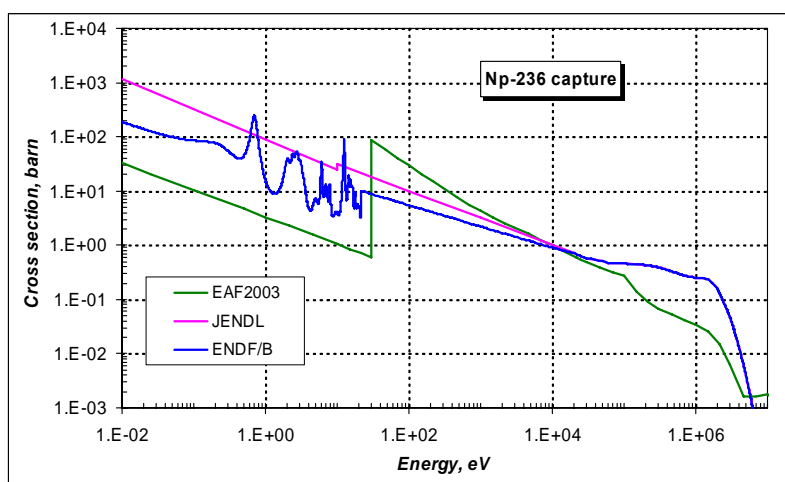


Рисунок 6 – Сечение радиационного захвата Np-236.

На рисунке 7 показано сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов Np-236. Экспериментальные данные здесь также отсутствуют. Согласно оценке R. A. Forrest, J. Кореску и J-Ch Sublet в результате неупругого рассеяния нейтронов образуется изомер Np-236m. Следовательно, это сечение следует также задать в секции образования изомеров (MF=10, MT=4), поскольку ни в JENDL, ни в ENDF/B эти данные не приводятся.

Далее, на рисунке 8 показано сравнение различных оценок образования вторичных нейтронов при делении. Из приведенного на рисунке 8 сравнения видно, что оценка из ENDF/B представляется более обоснованной.

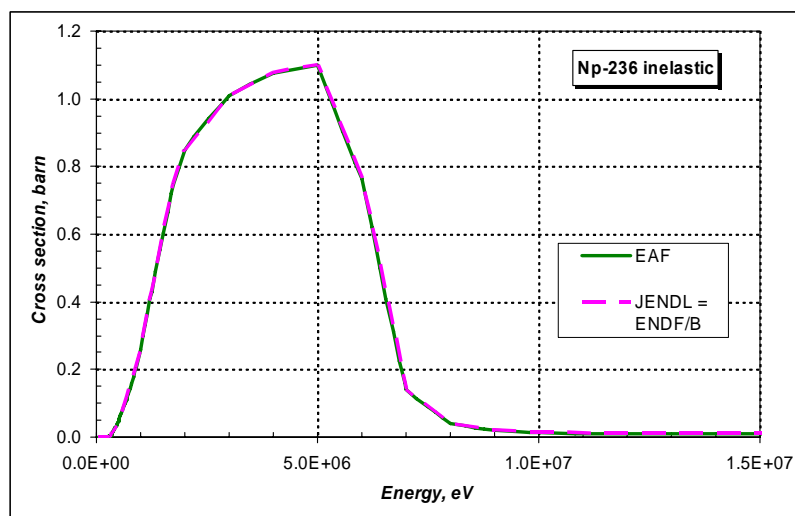


Рисунок 7 – Сечение неупругого рассеяния на Np-236.

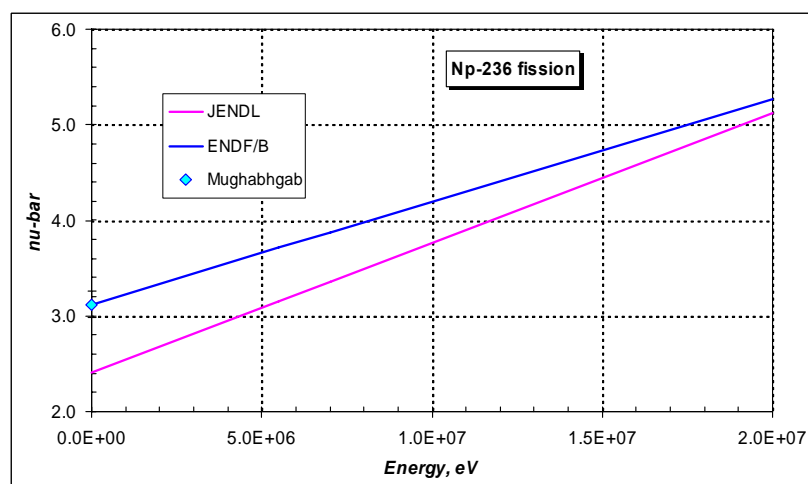


Рисунок 8 – Число вторичных нейтронов при делении Np-236.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из ENDF/B-VIIb2.

Следует добавить информацию об образовании изомера Np-236m (секция MF=10, MT=4). Следует также добавить данные о выходах запаздывающих нейтронов (8 групп – на основе оценки JEFF-3.1); их спектры принять такими же, как для урана-235.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

93.4. Нептуний-237

Радиоактивен. ($T_{1/2}=2.144 \cdot 10^6$ лет). Испытывает альфа-распад в Pa-233, который далее в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов превращается в висмут-209.

Оценки сечений нептуния-237 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3 и JEFF-3.1.

В западноевропейской библиотеке JEFF-3.1 приняты данные библиотеки JENDL-3.3.

Оценка БРОНД-3 выполнена в 1996 году, в 2001 выполнена ревизия файла.

Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2006 году. По сравнению с версией файла ENDF/B-VI содержит существенное повышение сечения деления в области 150 эВ-1 МэВ, что привело к устранению расхождений данных файла ENDF/B-VI с данными JENDL-3.3 и БРОНД-3.

JENDL-3.3 – оценка T.Nakagawa, 1988; существенно модифицирована в 1999 году и еще раз уточнена в 2001 году, по ряду основных сечений содержит данные из БРОНД-3.

93.4.1. Общие характеристики

1.1. $Z = 93$ -зарядовое число;

1.2. $A = 237$ (атомный вес);

1.3. $AW = 235.0120$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 2.144(11)E+6$ лет, доминирует α -распад с вкладом 2E-10% спонтанного деления;

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих порог реакции до 20 МэВ приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Нейтронные реакции на Np-237 (порог ниже 20 МэВ).

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог-}}$, МэВ	Ядро-продукт ^{*)}
4	n,n'	-.0331	.03324	Np-237
16	n,2n	-6.621	6.649	Np-236
17	n,3n	-12.311	12.363	Np-235
18	деление	196.37	0	продукты деления
102	n,g	5.488	0	Np-238

93.4.2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов ограничена энергией 150 эВ в оценке ENDF/B-VII и энергией 500 эВ в оценке JENDL-3.3. Экспериментальные данные о параметрах разрешенных резонансов простираются до 600 эВ [1]. Статистические методы анализа резонансов, развитые в ФЭИ, позволяют определить средние параметры нейтронных резонансов и, при необходимости, оценить согласованным образом средние параметры пропущенных слабых резонансов. Результаты анализа кумулятивного числа наблюдаемых s-резонансов показаны на рис. 9. Сравнение было проведено для версий ENDF/B-VI и JENDL-3.2, однако последующий анализ показал, что новые версии указанных библиотек основаны на тех же данных. Оценки числа пропущенных резонансов для области энергий до 200 эВ и 600 эВ представлены на рис. 10. Можно видеть, что пропуск резонансов становится существенным начиная с энергии 150 эВ. Однако, пропущенными оказываются только слабые резонансы с ширинами примерно в 5-10 раз ниже средних. Резонансы с ширинами, близкими к средним или превышающими их, идентифицированы без заметного пропуска вплоть до энергии 600 эВ. Так как именно эти резонансы вносят доминирующий вклад в нейтронные сечения, то область разрешенных резонансов в

оценке БРОНД-3 была распространена до 600 эВ, и средний вклад пропущенных слабых резонансов учтен путем добавления соответствующих подложек сечений в файле MF=3.

С учетом поправки на пропуск резонансов получены значения среднего расстояния между резонансами $D_0 = 0.57 \pm 0.03$ эВ, нейтронной силовой функции $S_0 = (0.97 \pm 0.07) 10^{-4}$ и средней радиационной ширины $\Gamma_\gamma = 40.0 \pm 1.2$ мэВ. Эти значения средних параметров нейтронных резонансов использовались для оптико-статистических расчетов сечений в области неразрешенных резонансов.

Для резонансной области энергий сравнение оценок полных нейтронных сечений, сечений упругого рассеяния, деления и радиационного захвата нейтронов показано на рис. 11-14. В оценке БРОНД-3 значительное внимание было уделено анализу делительных ширин резонансов и устранению противоречий в описании промежуточной структуры усредненных сечений деления в области энергий нейтронов выше 100 эВ. В анализ были включены новые экспериментальные данные, полученные на нейтронном спектрометре в Лос Аламосе [2, 3] и на импульсном реакторе ОИЯИ в рамках сотрудничества ОИЯИ-ФЭИ [4]. Выбранные параметры нейтронных резонансов достаточно хорошо воспроизводят наблюдаемые изменения сечений деления.

Сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении экспериментальными данными [1] приведены в нижеследующей таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение резонансных свойств Np-237.

	БРОНД-3	ENDF/B-VII	JENDL-3.3	Эксперимент, барн
σ_{tot}	190.2	196.2	175.79	-
σ_f	0.0221	0.0180	0.0204	0.020 ± 0.002
σ_γ	176.0	181.2	161.71	175.9 ± 2.9
I_f	6.952	6.815	6.90	6.9 ± 1.0
I_γ	642.3	652.8	657.0	640 ± 50

Как видно из таблицы 2 данные оценки БРОНД-3 хорошо согласуются с экспериментальными данными.

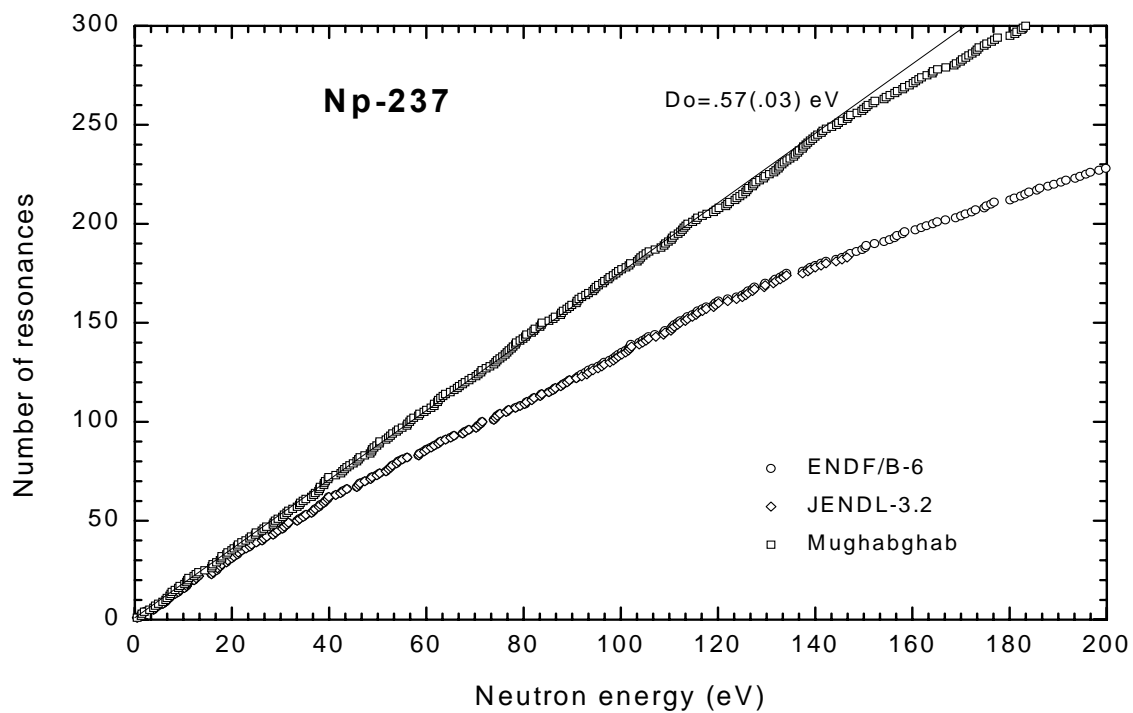


Рисунок 9 - Энергетическая зависимость числа s-резонансов.

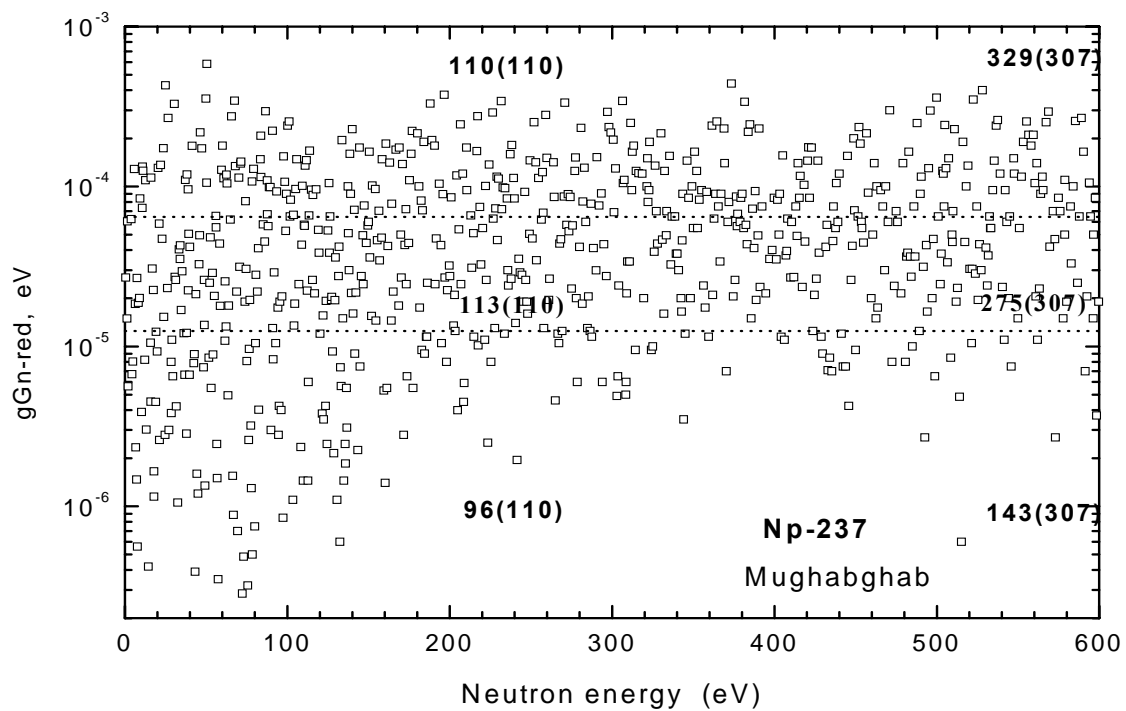


Рисунок 10 - Распределение приведенных нейтронных ширин резонансов.

93-Np-237(N,TOT),SIG

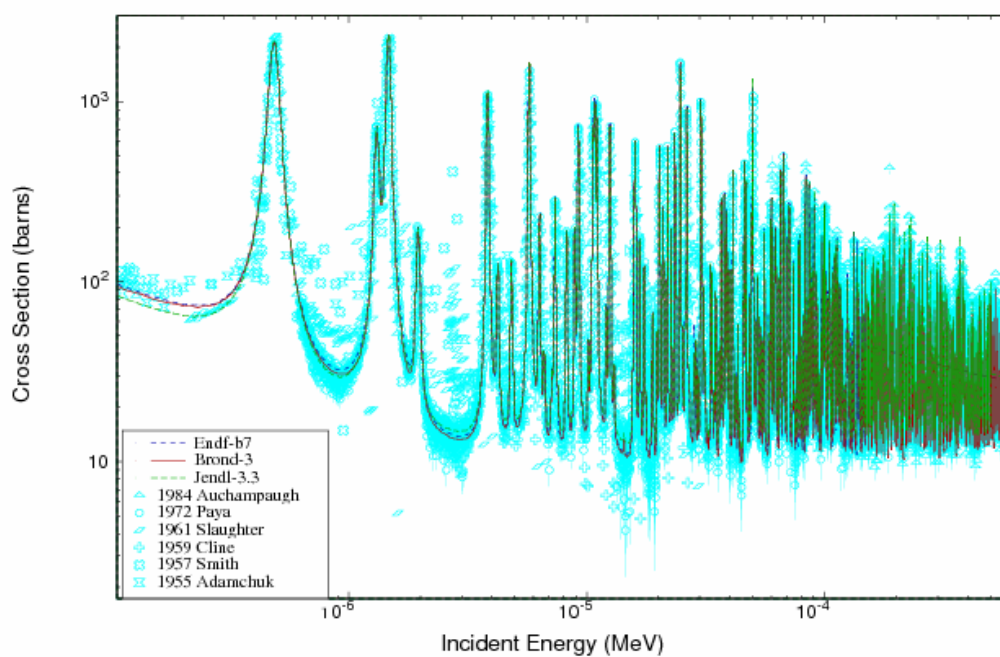


Рисунок 11- Экспериментальные данные о полных нейтронных сечениях ^{237}Np в области энергий разрешенных резонансов в сравнении с различными оценками.

93-Np-237(N,EL),SIG

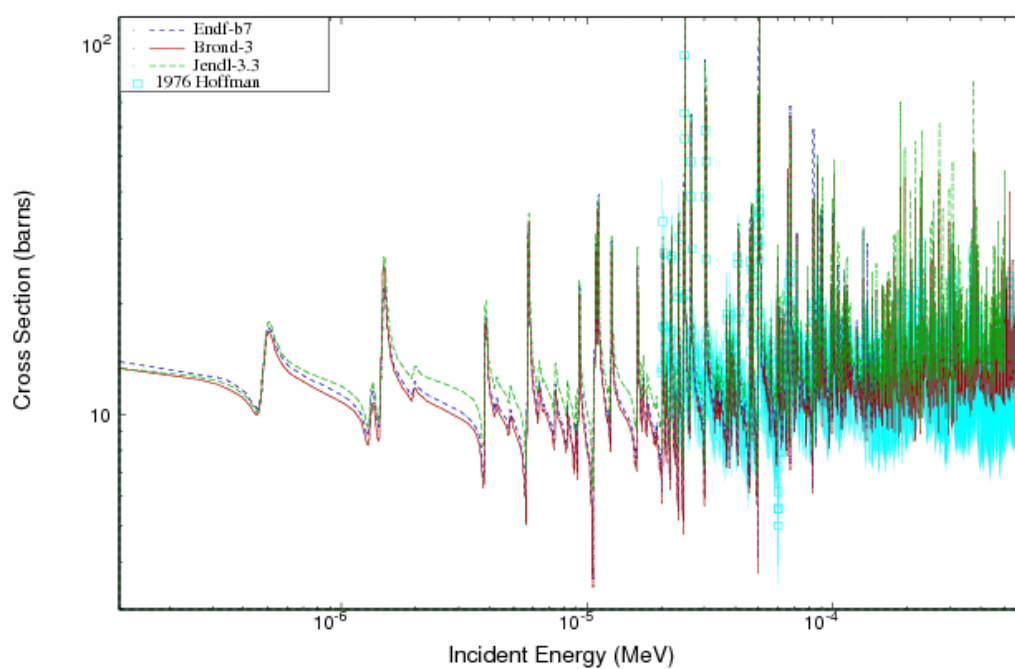


Рисунок 12 - Экспериментальные и оцененные данные о нейтронных сечениях упругого рассеяния ^{237}Np в области энергий разрешенных резонансов.

93-Np-237(N,G),SIG

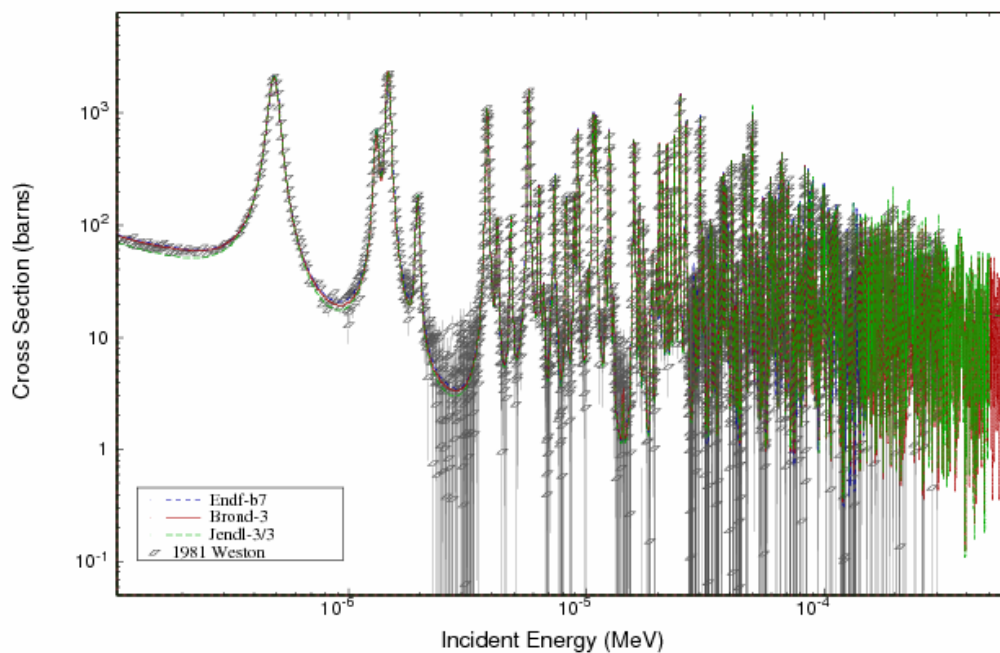


Рисунок 13 - Экспериментальные данные о сечениях радиационного захвата нейтронов ^{237}Np в энергий разрешенных резонансов в сравнении с различными оценками.

93-Np-237(N,F),SIG

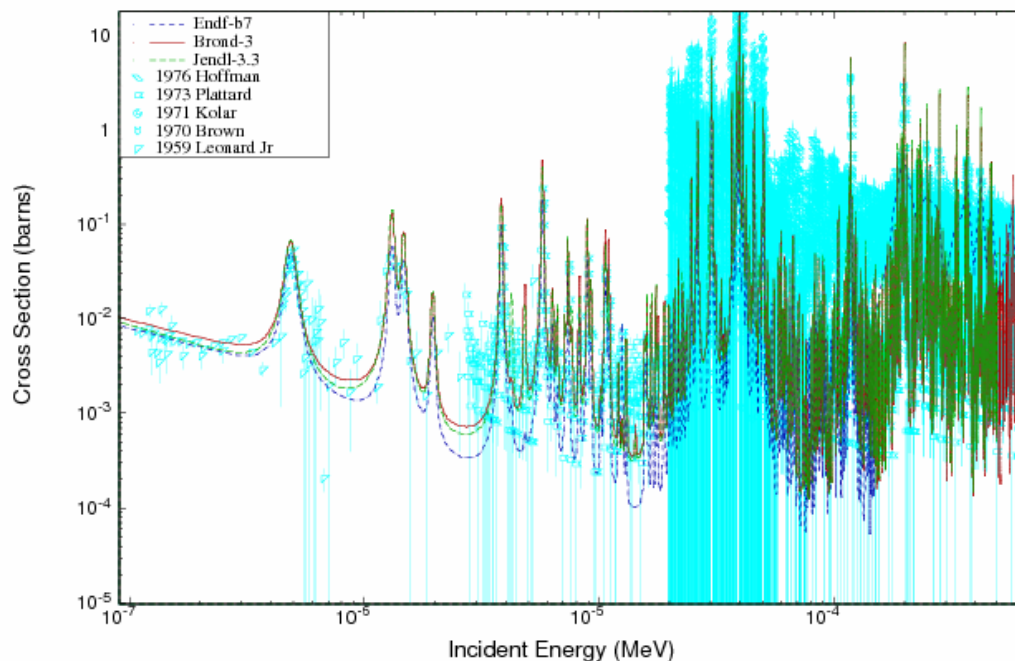


Рисунок 14 - Экспериментальные данные о сечениях деления ^{237}Np в области энергий разрешенных резонансов в сравнении с различными оценками.

Область неразрешенных резонансов

В файлах БРОНД-3 и ENDF/B-VII нет области неразрешенных резонансов.

В JENDL-3.3 содержится область неразрешенных резонансов с верхней границей: 35 кэВ. На рисунке 15 представлены экспериментальные данные о сечениях деления в области 600 эВ – 40 кэВ в сравнении с оценками. Между оценками нет существенных

разногласий, и флуктуации сечений, включенные в оценку ENDF/B-VII, лишь очень упрощенно отражают резонансные изменения сечений в области неразрешенных резонансов.

93-Np-237(N,F),SIG

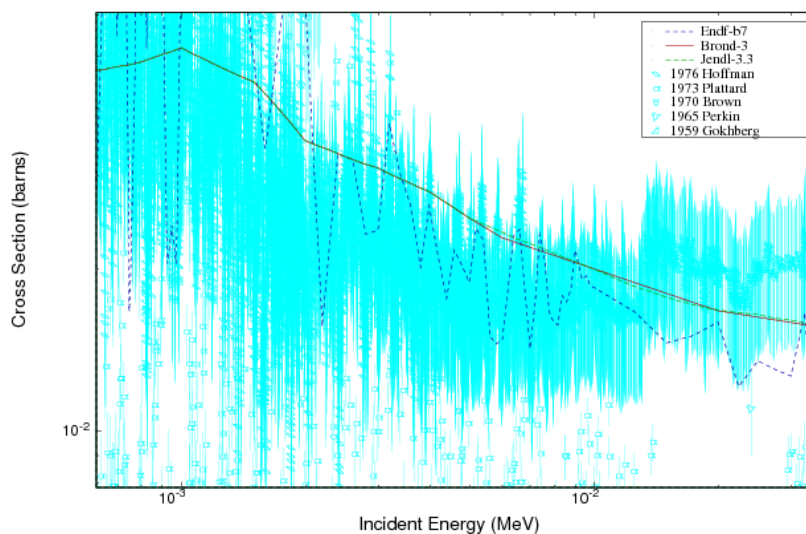


Рисунок 15 - Экспериментальные данные о сечениях деления в области энергий 600 эВ – 40 кэВ в сравнении с различными оценками.

На рис. 16 и 17 представлены экспериментальные и оцененные данные по полному сечению и сечению радиационного захвата. Как видно, все оценки мало различаются.

93-Np-237(N,TOT),SIG

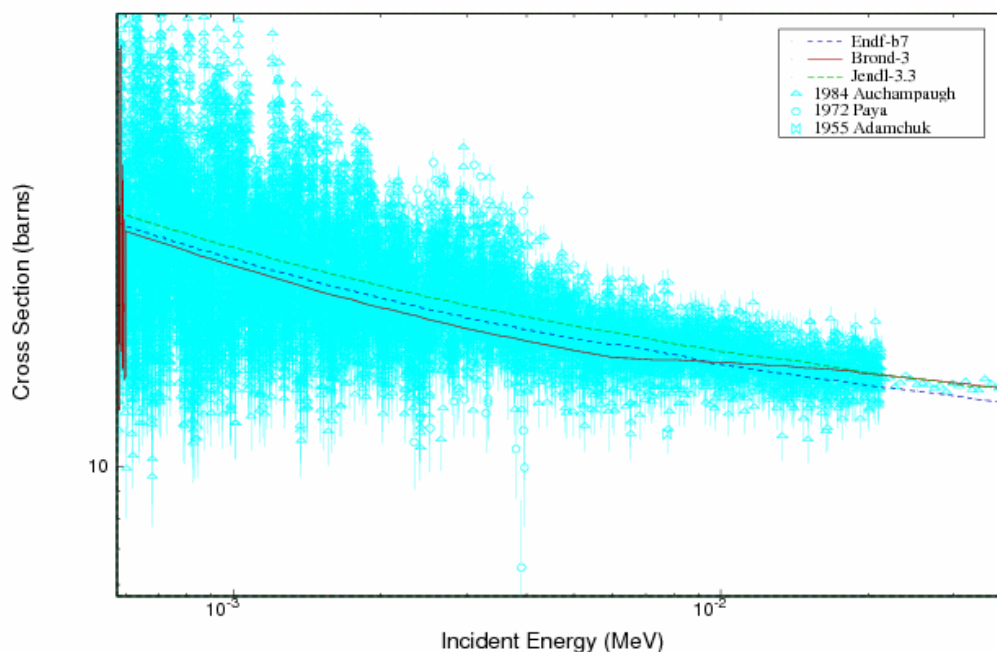


Рисунок 16 - Экспериментальные данные о полных сечениях в области энергий 600 эВ – 40 кэВ в сравнении с различными оценками.

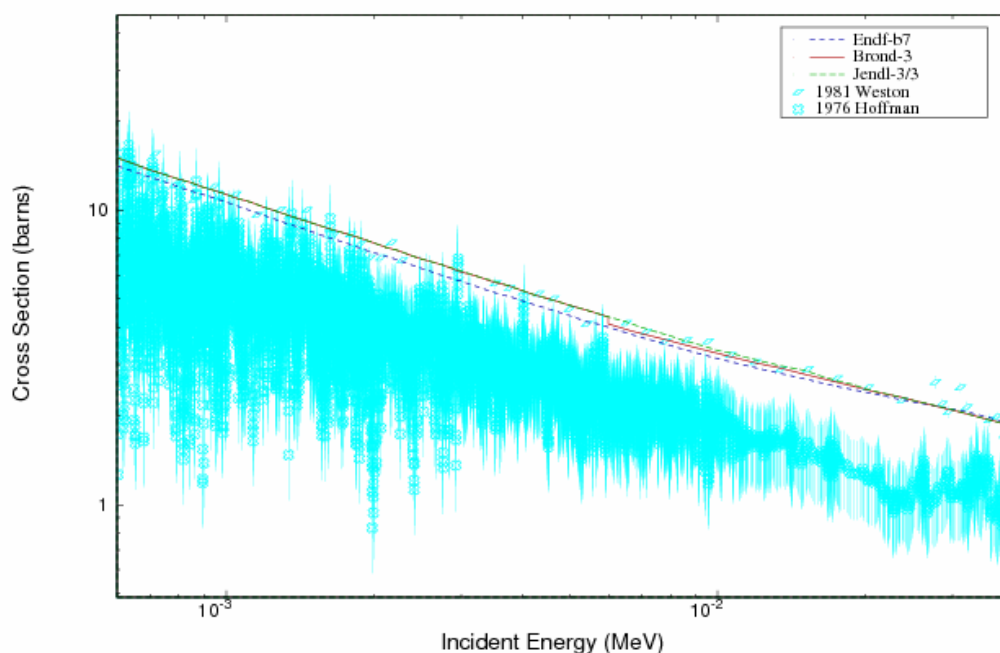


Рисунок 17 - Экспериментальные данные о сечениях радиационного захвата в области энергий 600 эВ – 40 кэВ в сравнении с различными оценками.

93.4.3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

Оценка полного нейтронного сечения вне резонансной области обычно основаны на расчетах по оптической модели ядерных реакций с параметрами потенциала, выбранного на основе экспериментальных данных для соседних ядер (см. рис.18). Анализ этих данных в рамках метода связанных каналов был проведен во многих лабораториях и набор оптических параметров деформированной оптики были определены и широко используются для оценки сечений всех минорных актинидов. Эти параметры дают примерно одни и те же полные сечения, но заметно различающиеся сечения поглощения. Эти различия значительны для энергий нейтронов выше 10 МэВ и приводят к расхождению в сечениях деления и реакции (n,2n).

Следует отметить, что в JENDL-3 для полного нейтронного сечения и сечения упругого рассеяния принята оценка БРОНД-3. В пределах экспериментальных ошибок все оценки согласуются с имеющимися данными.

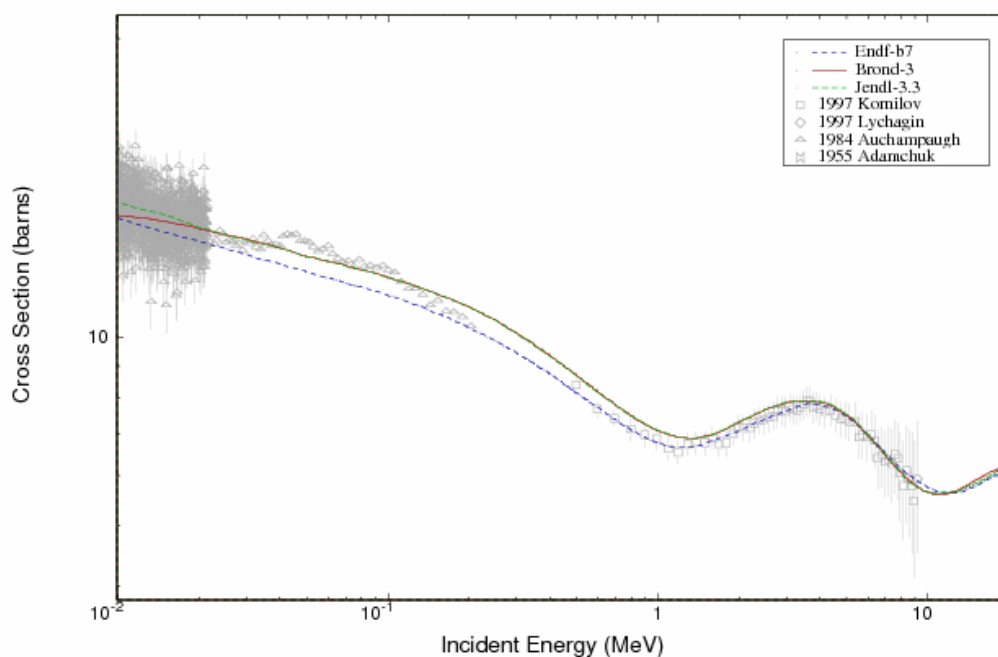


Рисунок 18 - Оценки полных нейтронных сечений ^{237}Np в сравнении с экспериментальными данными.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 19 показано сравнение разных оценок. Кривые БРОНД-3 и JENDL-3.3 совпадают, так как в JENDL-3.3 принята оценка БРОНД-3. Разногласия оценок БРОНД-3 и ENDF/B-VII достаточно малы и обусловлены, в основном, различием сечений неупругого рассеяния, принятых в оценках.

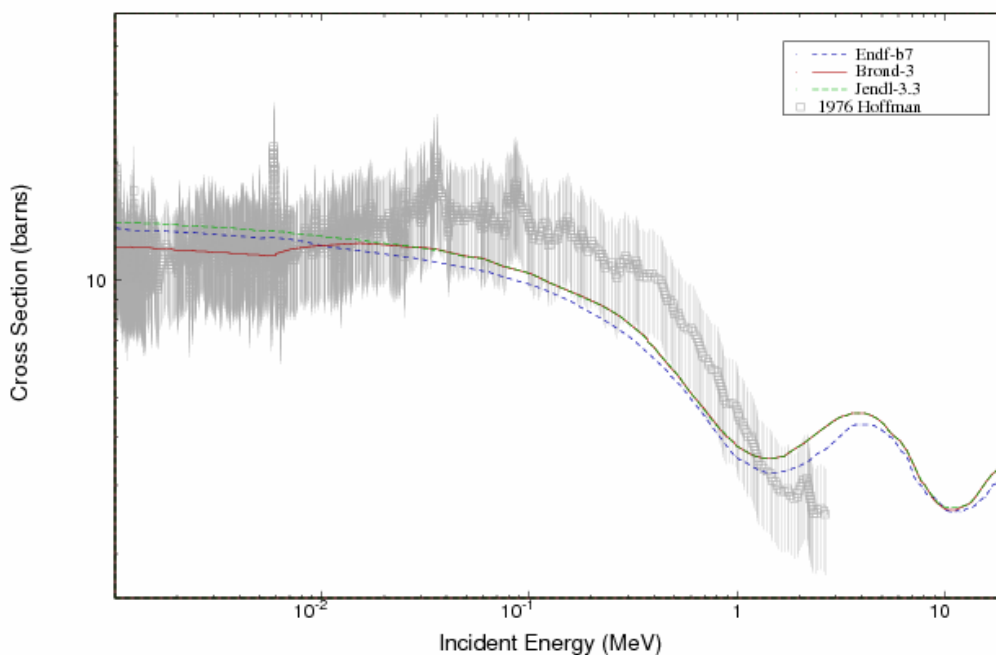


Рисунок 19 - Оценки сечений упругого рассеяния нейтронов в сравнении с экспериментальными данными

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

На рисунке 20 показаны оцененные полные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Оценки БРОНД-3 включена в JENDL-3.3, поэтому они совпадают. Оценка ENDF/B-VII лежит заметно выше во всем диапазоне энергий выше 2 МэВ.

В БРОНД-3 расчеты выполнены по оптической модели с деформированным оптическим потенциалом. Статистические расчеты с коэффициентами проницаемости, соответствующими деформированному оптическому потенциалу, дают более реалистические предсказания функций возбуждения низколежащих уровней, чем аналогичные расчеты со сферической оптической моделью. Обобщенная оптическая модель позволяет также описать вклад прямых процессов при возбуждении низколежащих коллективных уровней.

Так как полученные оценки интегральных сечений упругого и неупругого рассеяния нейтронов оказываются достаточно близкими к оценкам ENDF/B-VI, то для угловых распределений упруго и неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 была принята оценка ENDF/B-VI (=ENDF/B-VII).

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния для Np-237 нет, поэтому трудно сделать обоснованный выбор между оценками БРОНД-3(≡JENDL-3.3) и ENDF/B-VII без дополнительной информации.

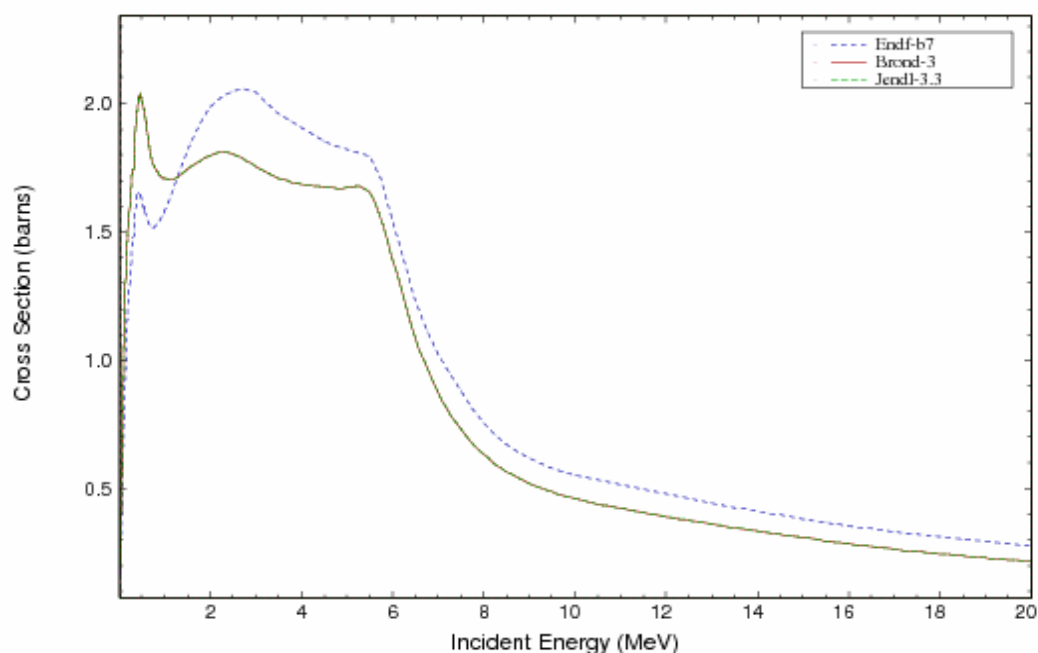


Рисунок 20 - Оценки сечений полного неупругого рассеяния нейтронов.

Сечение деления (MT=18)

На рис. 21-22 показано сравнение оценок БРОНД-3 с оценками ENDF/B-VII и JENDL-3.3. Оценке БРОНД-3 следует отдать предпочтение, поскольку она лучше соответствует систематическим тенденциям в поведении энергетической зависимости сечений деления, указанные в работе /5/. Кроме того, авторами этой оценки был проведен тщательный анализ и перенормировка экспериментальных сечений на новые стандартные и справочные данные, а полученные скорректированные данные были аппроксимированы методом Паде-аппроксимации/6/. На основе нового метода статистического учета систематических погрешностей экспериментальных данных уточнены рекомендуемые погрешности оцененных данных и определены ковариационные матрицы погрешностей.

При вычислении погрешностей оценки учитывались данные всех проанализированных экспериментальных работ. Была получена также корреляционная матрица групповых сечений, которая включена в секцию MT=33 полного файла оцененных нейтронных сечений.

Результаты тестировки оцененных сечений деления Np-237 по результатам интегральных измерений сечений деления для различных нейтронных спектров показали, что для спектров нейтронов теплового деления U-235 и спонтанного деления Cf-252 оценка сечений БРОНД-3 хорошо согласуется с экспериментальными данными. В пределах погрешности оценка согласуется также с данными интегральных измерений сборки Sigma-Sigma. Для сборки CFRMF измеренные сечения деления оказываются ниже значений, вычисленных для любой из оценок сечений деления. Это, по-видимому, указывает на необходимость более тщательного анализа погрешностей экспериментальных данных CFRMF.

93-Np-237(N,F),SIG

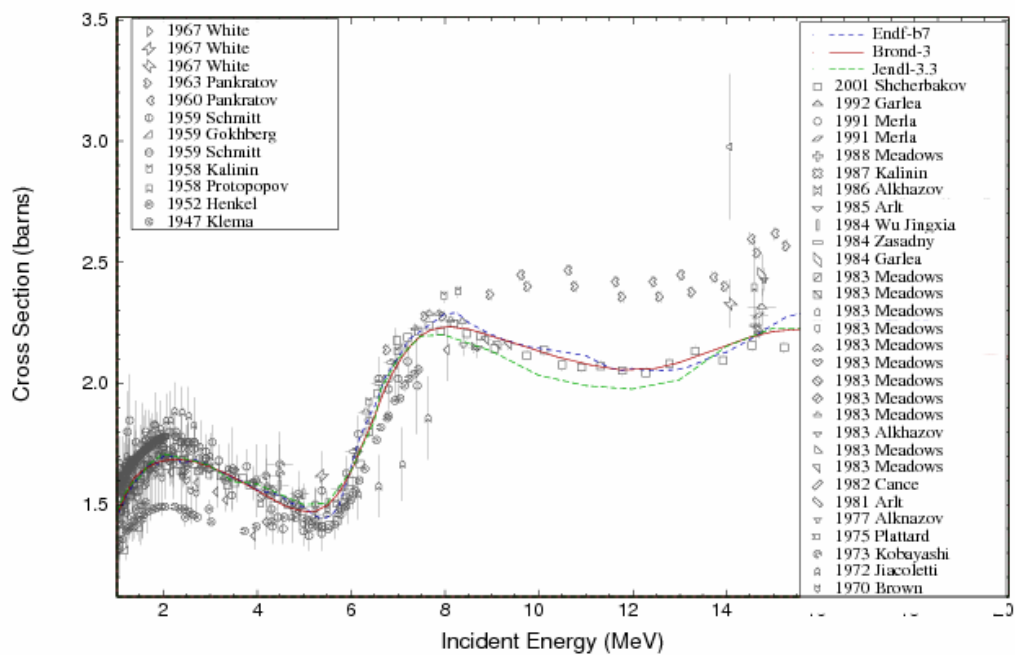


Рисунок 21 - Оценки сечений деления ^{237}Np в сравнении с экспериментальными данными.

93-Np-237(N,F),SIG

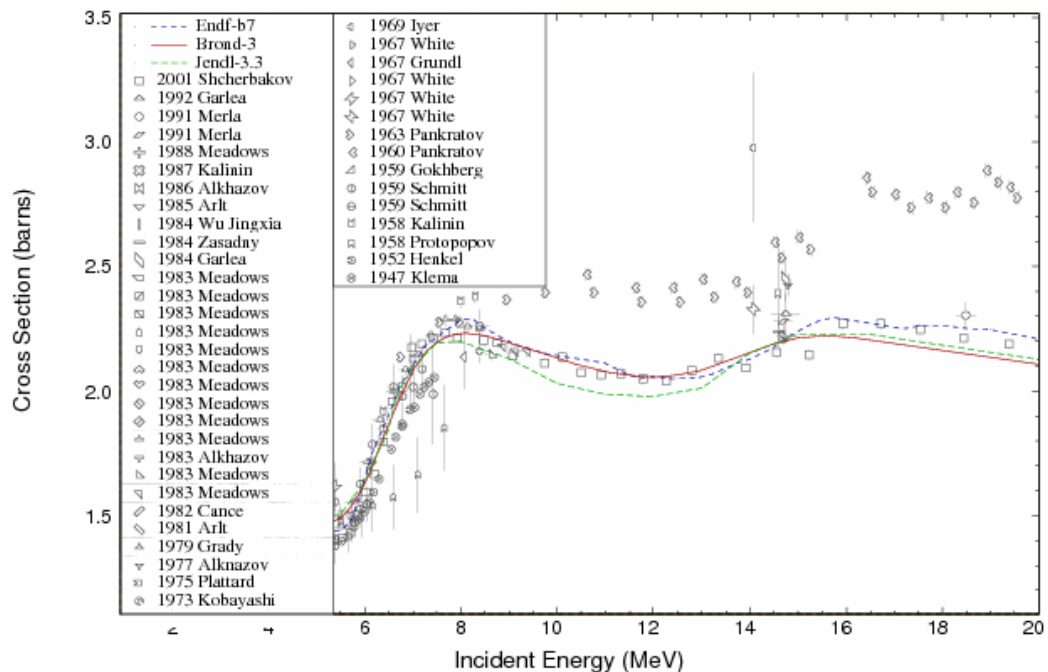


Рисунок 22 - Оценки сечений деления ^{237}Np нейтронами в сравнении с экспериментальными данными

Оценки сечений других реакции, ν_p и ν_d

Для числа мгновенных нейтронов деления ν_p были взяты значения, рекомендованные в работе /7/. Они на 2% ниже значений, принятых в оценке ENDF/B-VI для энергий нейтронов ниже 4 МэВ, но расхождение оценок убывает при увеличении энергий нейтронов (см.рис.23). Выше 14 МэВ обе оценки совпадают.

Для числа запаздывающих нейтронов ν_d взята оценка, основанная на новых экспериментальных данных об энергетической зависимости ν_d /15/ (см. рис.24).

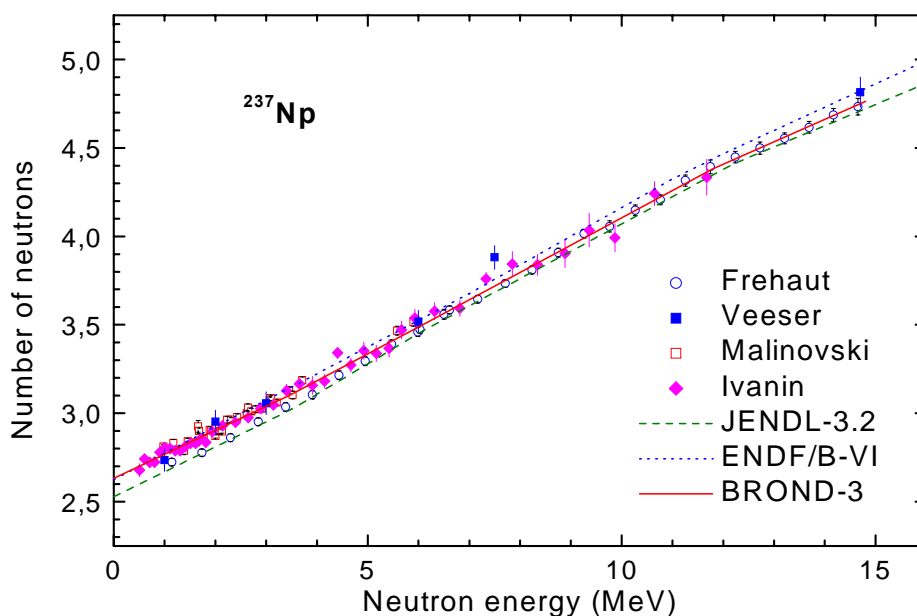


Рисунок 23 - Экспериментальные данные о числе вторичных нейтронов при делении ^{237}Np в сравнении с оценками ENDF/B-VI (пунктир), JENDL-3.2 (штриховая кривая) и БРОНД-3 (сплошная кривая)

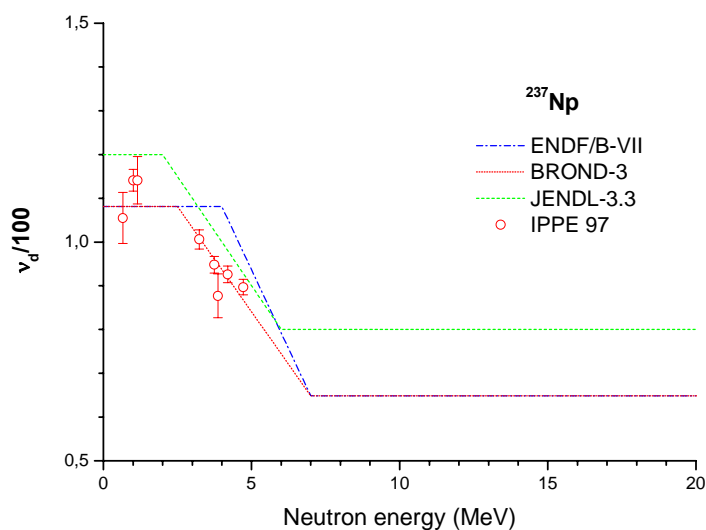


Рисунок 24 - Оценки числа запаздывающих нейтронов в сравнении с экспериментальными данными.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 25 приведены оценки сечений радиационного захвата.

Для БРОНД-3 был проведен анализ всей совокупности экспериментальных данных по сечениям радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 600 эВ. На основе анализа структуры погрешностей экспериментальных данных были оценены статистические и систематические погрешности измерений и определены средние коэффициенты корреляции каждого набора данных. Оцененная кривая была получена методом статистической аппроксимации экспериментальных данных с обоих типов погрешностей.

Для энергий нейтронов выше 2.5 МэВ оценка БРОНД-3 проведена на основе статистических расчетов с учетом эмпирической систематики сечений захвата нейтронов с энергиями выше 14 МэВ. В JENDL-3.3 принята оценка из БРОНД-3. Как видно из сравнения, оценка ENDF/B-VII при энергии 4-20 МэВ лежит заметно выше.

93-Np-237(N,G),SIG

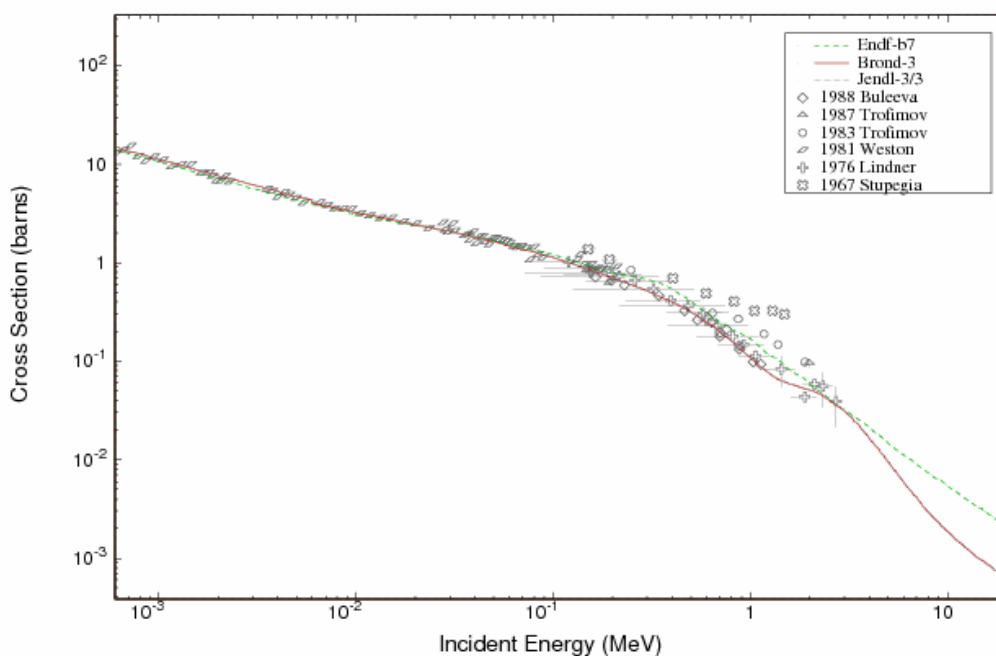


Рисунок 25 - Оценки сечений радиационного захвата нейтронов ^{237}Np в сравнении с экспериментальными данными.

Сечение реакций (n,2n) и (n,3n) (MT=16, 17).

Оценки сечений (n,2n) и (n,3n) реакций были сделаны на основе статистических расчетов, согласованных с рассмотренной выше оценкой сечений деления и сечений поглощения нейтронов. На рисунке 26 даны оценки реакции (n,2n). Экспериментальные данные имеются в основном для реакции (n,2n) с образованием короткоживущего изомера Np-236 [8-12]. Эти данные преобразованы к полному сечению реакции (n,2n) с использованием теоретического значения изомерного отношения, полученного в работах [13,14]. Принимая во внимание погрешности оценок изомерного отношения, согласие экспериментальных данных с рекомендуемой оценкой следует считать вполне удовлетворительным. Пунктирной линией на рисунке 26 показаны оцененные значения вероятности образования изомера Np-236m.

На рисунке 27 даны оценки реакции (n,3n), экспериментальных данных нет. Различие оценок БРОНД-3 и ENDF/B-VII можно объяснить разницей в сечениях деления в

этой области, но расхождение оценки БРОНД-3 с оценкой JENDL-3.3 аргументировано объяснить не представляется возможным.

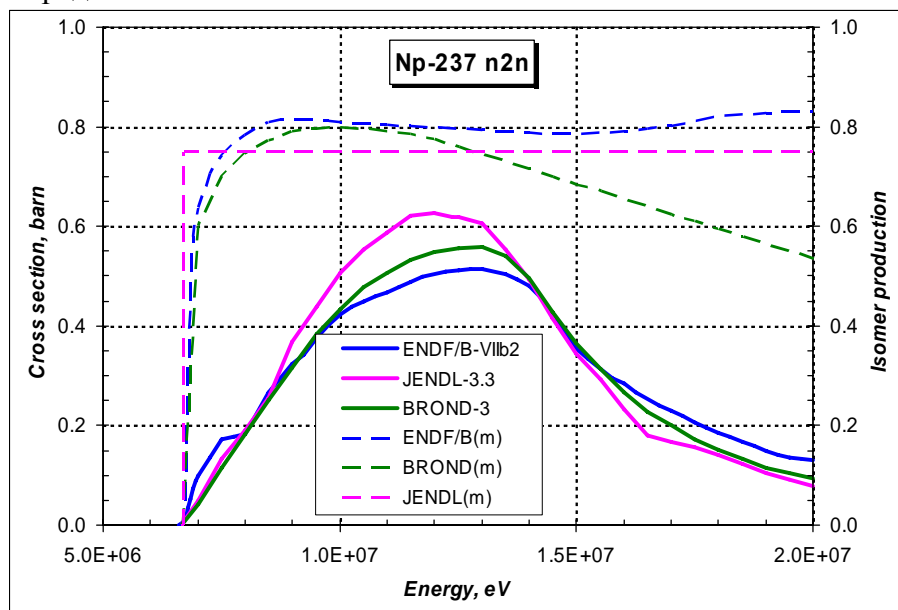


Рисунок 26 - Оценки сечений реакций (n,2n).

93-Np-237(N,3N),SIG

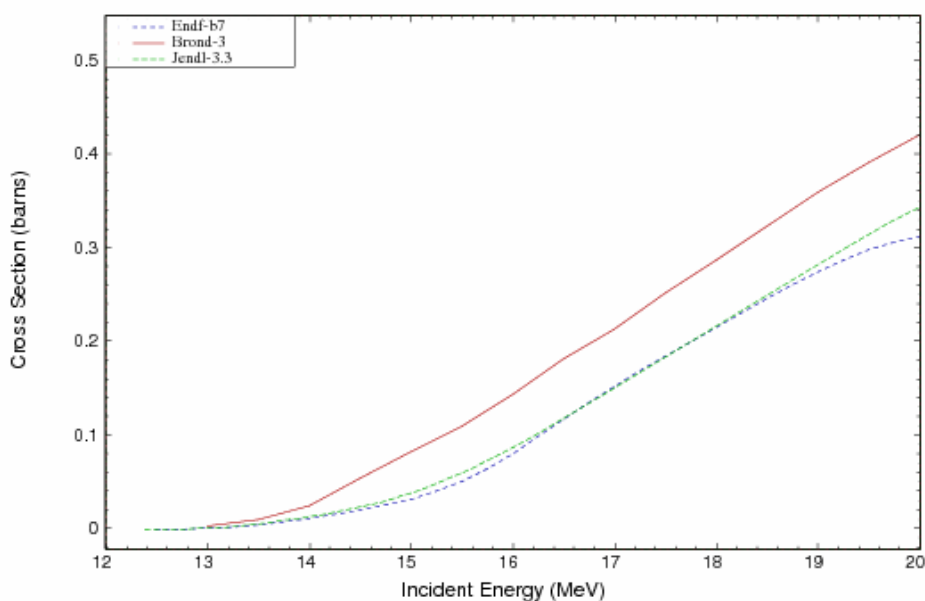


Рисунок 27 - Оценки сечений реакций (n,3n).

ЛИТЕРАТУРА

1. S.F.Mughabghab Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1B.
2. J.Kimura. Nucl. Sci. Tech., 1993, v. 30, p.863.
3. A.D.Carlson et al. In: Proc. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, (Gatlinburg, 1994). Oak Ridge, 1994, v.1, p. 40.
4. A.A. Goverdovski et al. Sov. J. Nucl. Phys., 1995, v.58, p.27.
5. А.И.Блохин, В.Н.Манохин, С.М.Насырова, Препринт ФЭИ-2620, 1997.
6. S.A.Badikov Preprint FEI-1686, Obninsk, 1985.

- S.A.Badikov, K.I.Zolotarev. In: Proc. Spec. Meeting on Evaluation and Processing of Covariance Data (Oak Ridge, 1992). Paris, OECD, 1993, p. 105.
7. V.V.Malinovski, M.Z.Tarasko, B.D.Kuzminov. VANT, Ser. Nuclear Constants, 1985, is. 1, p. 25.
 8. J.Perkin, R.Coleman. Nucl.Energy, 1961, v.14, p. 69.
 9. I. Landrum, R.Nagle, M.Linder. Phys.Rev., 1970, v. C8, p. 1938.
 10. K.Lindeke et al. Phys.Rev., 1975, v. C12, p. 1507.
 11. E.A.Gromova et al. Atomnaya Energiya, 1983, v. 54, p. 108.
 12. N.V.Kornilov et al. Atomnaya Energiya, 1985, v. 58, p. 117.
 13. D.Gardner, M.Gardner, R.Hoft. Report UCAR-100062-83/1, p. 51.
 14. A.V.Ignatyuk et al. Atomnaya Energiya, 1987, v. 63, p.110.
 15. V.M.Piksaikin et al. Int. Conf. Nucl. Data for Science & Technology, Trieste, 1997, p.485.

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных, и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. **Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку БРОНД-3.** В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на необходимость уточнения этой оценки. В файл включаются также данные о выходах продуктов деления – из ENDF/B-VII¹

Авторы отбора данных

Игнатюк А.В. и Манохин В.Н.

93.5. Нептуний-238

Радиоактивен. ($T_{1/2}=2.117$ д.). Испытывает бета-распад в плутоний-238, который затем после альфа-распада превращается в уран-234.

В современных библиотеках оцененных данных содержится две полные оценки нейтронных данных для нептуния-238:

- оценка Т.Nakagawa (1993), принятая в JENDL-3.3 а также в ENDF/B-VIIb2;
- и оценка, выполненная координационной группой для проекта JEFF-3 на основе JEF-2.2.

Имеется также оценка нейтронных сечений R. A. Forrest, J. Kopecky и J-Ch Sublet в активационной библиотеке EAF-2003.

На рисунке 28 показано сравнение энергетической зависимости сечения деления нептуния-238 с имеющимися экспериментальными данными.

¹ T.R.England, B.F.Rider, ENDF-349, 1989.

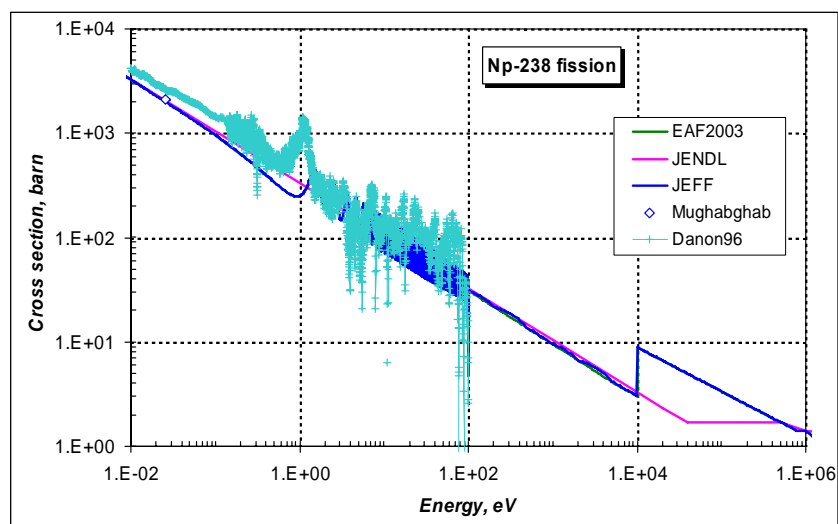


Рисунок 28 – Сравнение оцененных сечений деления Np-238 с экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 28 сравнения видно, что обе оценки не описывают эксперимент Дэнона, выполненный в 1996 году. Вероятно, обработка эксперимента с целью получения набора резонансных параметров затянулась по причине сильного различия значения сечения в тепловой точке (см. таблицу 3).

Таблица 3. Сравнение сечения деления при энергии $E=0.0253$ эВ.

Spencer69	2070 ± 30
Abramovich95	2110 ± 740
Fomushkin97	2110 ± 75
Danon96	2638 ± 58

Наблюдаемая резонансная структура в оценке JEFF в области энергий до 100 эВ выполнена расчетным путем с использованием средних резонансных параметров, получаемых на основе систематики. От 100 эВ до 10 кэВ приводится область неразрешенных резонансов. Выше 10 кэВ данные взяты из библиотеки ENDL-84. Отметим, что выше 10 кэВ и начинаются значительные различия в оценке сечения деления.

Что касается оценки сечения деления из JENDL, то в тепловой области кривая ориентирована на экспериментальное значение Спенсера69. Далее до 20 кэВ поведение пропорционально $1/V$. От 20 кэВ до 6.6 МэВ оценка проведена на основе экспериментальных данных Britt&Wilhelming(1979), эти результаты, в настоящее время нам недоступны. Выше 6.6 МэВ используется упрощенная формула Бычкова.

Учитывая тот факт, что в области энергий выше 20 кэВ кривая JENDL проведена с учетом экспериментальных данных, предпочтение для РОСФОНДА следует отдать именно этой оценке сечения деления.

На рисунке 29 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата Np-238. Экспериментальные данные здесь отсутствуют. Из приведенного на рисунке 6 сравнения видны различия в оценке сечения захвата между различными теоретическими подходами. Как видно, в настоящее время нет возможности указать наиболее надежную оценку сечения радиационного захвата нейтронов на нептунии-238.

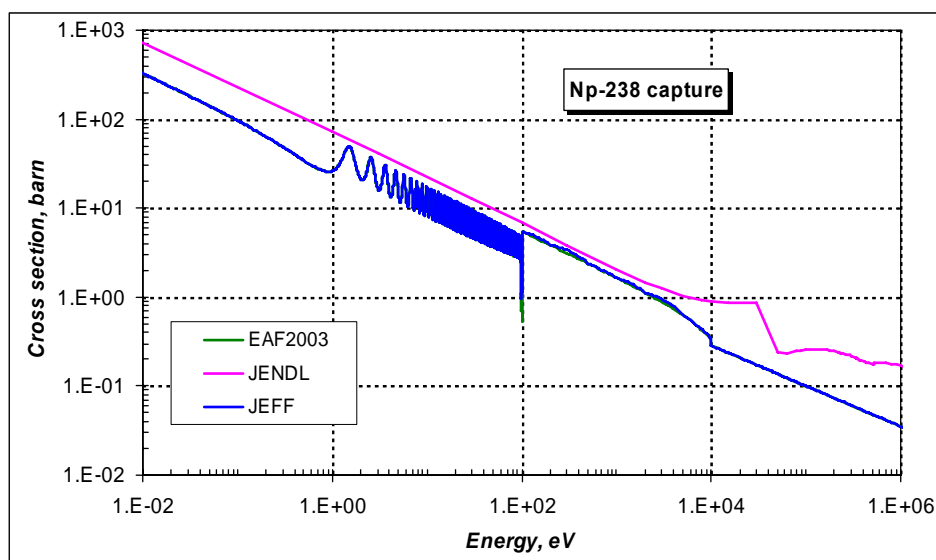


Рисунок 29 – Сечение радиационного захвата Np-238.

На рисунке 30 показано сравнение оцененных значений вторичных нейтронов деления. Отметим, что в JEFF оценка полного числа нейтронов деления выполнена по полуэмпирической формуле Гордеевой и Смиреникина, пересмотренную в 1972 году Коньшиным. Для запаздывающих нейтронов используется оценка Wilson и England для 8-ми групп. В оценке JENDL полное число нейтронов деления получено как сумма мгновенных и запаздывающих нейтронов, которые в свою очередь получены на основе систематик.

Энергетическая зависимость одна и та же, а исходное тепловое значение – разное, которое не согласуется с рекомендацией Мухабхаба. К рекомендованному значению ближе оценка T.Nakagawa. Её и следует предпочесть для РОСФОНДА.

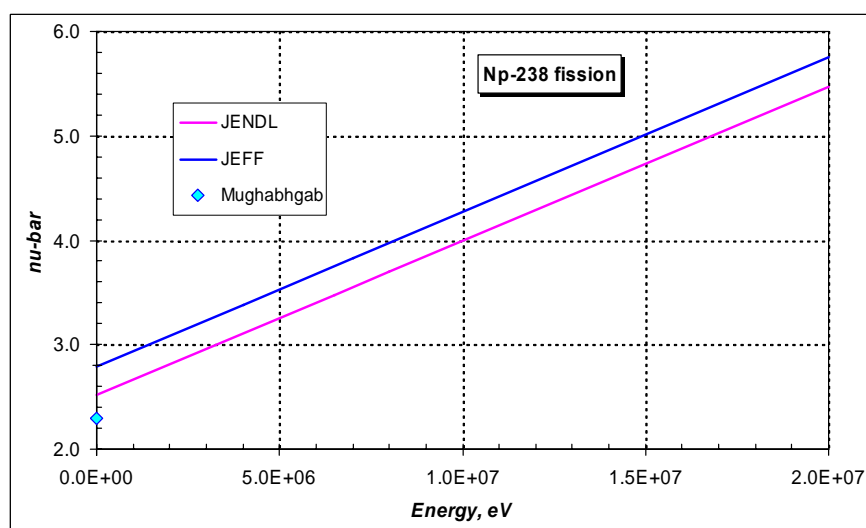


Рисунок 30 – Число вторичных нейтронов при делении Np-238.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных из библиотеки JENDL-3.3.

Добавить информацию об образовании изомера Np-236m, образующего при реакции $(n,3n)\text{Np-237m}$. В файл включаются также данные о выходах продуктов деления – из ENDF/B-VII

Автор отбора данных

93.6. Нептуний-239

Радиоактивен. ($T_{1/2}=2.3565$ д). Испытывает бета-распад в плутоний-239.

В современных библиотеках оцененных данных содержится две полные оценки нейтронных данных для нептуния-239. В JENDL-3.3 находится оценка Y.Kanda (1976), выполненная для библиотеки JENDL-3. В ENDF/B-VIIb2 положена оценка Wright (1988), выполненная для ENDF/B-V на основе данных JENDL-2. Эта оценка принята также в JEFF-3.1. Имеется еще оценка нейтронных сечений в активационной библиотеке EAF-2003.

На рисунке 31 показано сравнение энергетической зависимости сечения деления нептуния-239.

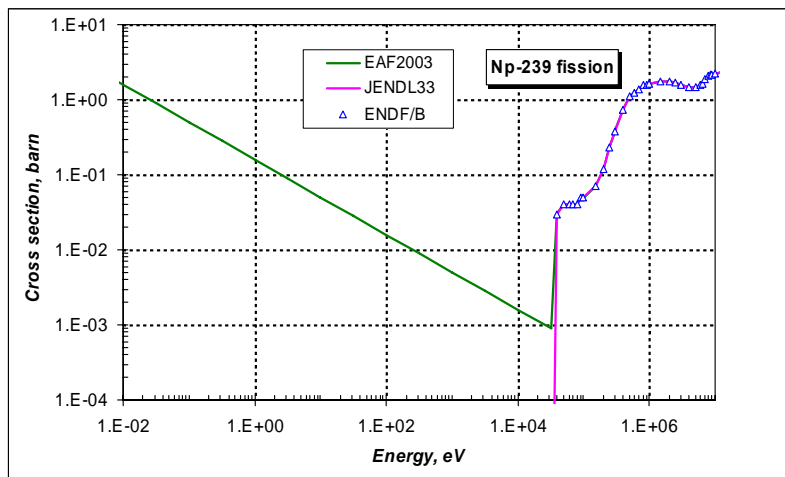


Рисунок 31 – Сравнение оцененных сечений деления Np-239.

Из приведенного на рисунке 31 сравнения видно, что все оцененные кривые согласованно описывают пороговый характер сечения деления. Однако, подпороговое деление наблюдается только в оценке EAF2003, что является более корректным, но не существенным фактором.

На рисунке 32 показано сравнение оцененных значений вторичных нейтронов деления. Экспериментальные данные и рекомендация Мухабхаба отсутствуют.

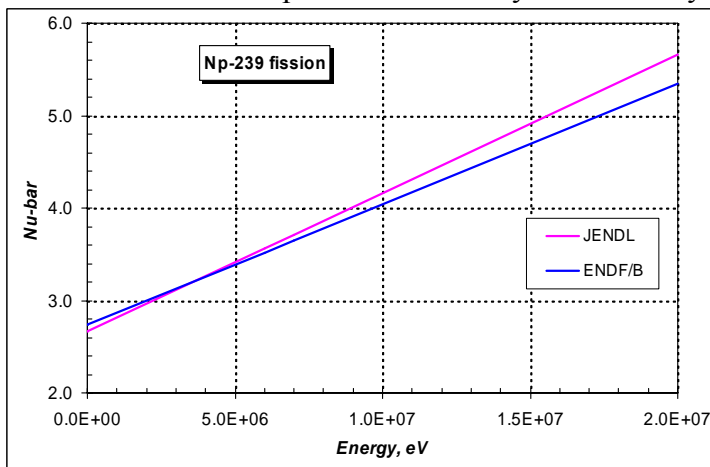


Рисунок 32 – Число вторичных нейтронов при делении Np-239.

В оценке JENDL полное число нейтронов деления получено как сумма мгновенных и запаздывающих нейтронов, которые в свою очередь получены на основе систематик. В оценке ENDF/B полное число вторичных нейтронов деления взято таким же, как и для Np-237 (ENDF/B-IV).

Из приведенной на рисунке 32 информации видно что, оцененные значения полного числа вторичных нейтронов между собой согласуются достаточно хорошо. Однако в оценке JENDL они приводятся по составляющим – мгновенные и запаздывающие, и это обстоятельство делает предпочтительной оценку JENDL в качестве выбора для РОСФОНДА.

На рисунке 33 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата Np-239. Экспериментальные данные здесь отсутствуют. Из приведенного на рисунке 33 сравнения видны различия в оценке сечения захвата между различными теоретическими подходами. Более обоснованной представляется оценка из ENDF/B. Там же приводится кривая образования изомера Np-240m в результате радиационного захвата нейтронов (пунктирная линия).

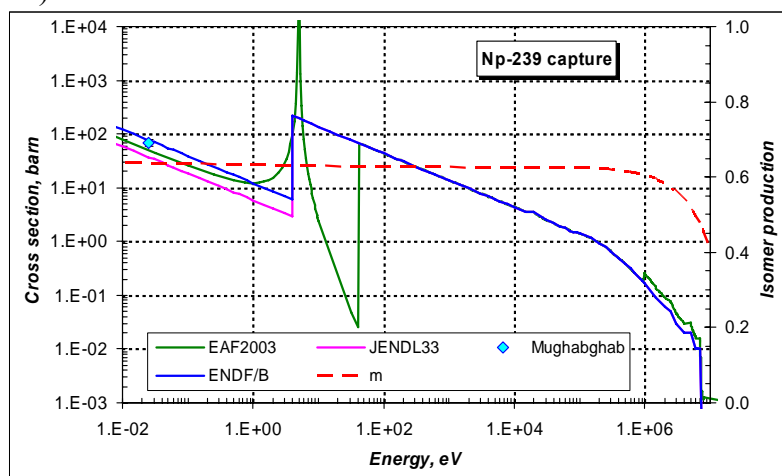


Рисунок 33 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Np-239.

Из приведенного на рисунке 33 сравнения видно, что оценка Wright (ENDF/B) отличается от JENDL в тепловой области (ниже 4 эВ), ориентируясь на рекомендованное значение Мухабхаба в тепловой точке. Далее эти оценки совпадают. В оценке EAF2003 присутствует искусственный резонанс, согласно методике разработанной R. A. Forrest, J. Koresky и J-Ch Sublet. В тепловой точке сечение из EAF не согласуется с рекомендацией Мухабхаба. Таким образом, оценка сечения радиационного захвата нейтронов из ENDF/B является наиболее предпочтительной. Использование данных об образовании изомера Np-240m не представляется важным, поскольку и Np-240 ($T_{1/2}=7.22$ м) и Np-240m ($T_{1/2}=61.9$ м) испытывают β_- распад в Pu-240.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из JENDL-3.3.

Модифицировать оценку сечения деления в области подпорогового деления в области энергий ниже 40 кэВ путем включения оценки сечения деления R.A.Forrest, J.Koresky и J-Ch Sublet из EAF-2003.

Полное сечение пересчитать как сумму парциальных сечений.

Следует также добавить данные о выходах запаздывающих нейтронов (8 групп – на основе оценки JEFF-3.1); их спектры принять такими же, как для урана-235.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.