

26. ЖЕЛЕЗО

В РОСФОНД включаются данные для четырех стабильных изотопов железа и трех радиоизотопов.

26.1. Железо-54

1. Общие характеристики

1.1. $Z=26$ (заряд)

1.2. $A=54$ (атомный номер)

1.3. $A_w=53.476$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Содержание в естественной смеси 5.845 ± 0.035 (атомарные проценты)

1.5. Спин основного состояния 0^+

Годы проведения оценок для ^{54}Fe в разных библиотеках приведены в Таблице 1. Библиотека ENDF/B-VII.1 отличается от библиотеки ENDF/B-VI.8 только данными в секции MF=6, MT=5 (энерго-угловыми распределениями вторичных нейтронов при энергии выше 20 МэВ исправлены).

2. Область разрешённых резонансов и тепловые сечения

Значения в ENDF/B-6.8 получены из R-матричного анализа с помощью программы SAMMY данных Харви (1989) с высоким разрешением. Фоновое сечение добавлено к сечению захвата в области разрешённых резонансов для описания данных Аллена (1977) с низким разрешением, что позволило учесть захватную площадь под пропущенными резонансами. Данные в области разрешённых резонансов в библиотеках JENDL-3.3 и JEFF-3.1 взяты из библиотеки ENDF/B-VI.8. Оценки BROND-2.2 и CENDL-2 основываются на старых измерениях выполненных до 1985 года. Основные характеристики всех оценок приведены в Таблице 1. Анализ статистических распределений приведенных нейтронных ширин, расстояний между уровнями и графиков нарастающих сумм уровней показывает избыток узких s- резонансов выше 400 кэВ и недостаток p- резонансов ниже 400 кэВ, возможно неправильную идентификацию первого d- уровня как уровня d- волны из-за его аномально большой нейтронной ширины и небольшой недостаток p- резонансов ниже 70 кэВ.

Сечения в тепловой точке и резонансный интеграл захвата полученный программой PSYCHE7.1 в разных библиотеках согласуются с последней рекомендацией Мугхабгхаба (Mu03).

Таблица 1. Характеристики оценок в тепловой точке и резонансной области.

Библиотека	Год оценки	σ_{el}^{therm} барн	$\sigma_{n,\gamma}^{therm}$ барн	RI барн	R_0 фм	$E_{min}(RRR)$ эВ	$E_{max}(RRR)$ кэВ
ENDF/B-VI.8	1996	2.181	2.251	1.182	5.48	0.00001	700
BROND-2	1985	2.165	2.140	1.198	5.00	0.00001	500(s) 200(p, d)
JEFF-3.1	2004	2.181	2.251	1.186	5.48	0.00001	700
JENDL-3.3	2000	2.181	2.251	1.189	5.48	0.00001	700
CENDL-2	1990	0.4329	2.156	1.303	5.6	0.00001	250
Mu03	2003		2.25±0.18	1.2±0.2			

Выводы: оценка библиотеки ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1) является в настоящее время наилучшей, несмотря на то, что идентификация спиновых характеристик резонансов и может быть улучшена. Это улучшение идентификации практически не влияет на средние сечения.

3. Сечения для быстрых нейтронов ($E_n > 700$ кэВ)

Сравнение различных сечений для быстрых нейтронов приводится на рисунках 1 – 11. Верхняя граница энергии нейтронов в библиотеке ENDF/B-VI.8 равна 150 МэВ, в библиотеке JEFF-3.1 – 200 МэВ и во всех других библиотеках – 20 МэВ. Из анализа рисунков можно отметить следующее. Полное и упругое сечения в библиотеке CENDL-2 в интервале энергий 5 – 12 МэВ являются заниженными. Это связано с тем, что оценка CENDL-2 упругого рассеяния базируется на экспериментальных данных Эль Кади, которые для других ядер лежат систематически ниже результатов других работ. Полное сечение неупругого рассеяния (рис. 5) во всех библиотеках, кроме BROND-2, испытывает заметное падение при энергии выше 11 МэВ, которое может быть объяснено только заметной конкуренцией со стороны канала реакции, который открывается при этой энергии. Таким каналом является реакция (n,pn).

Учитывая имеющиеся экспериментальные данные, можно заключить, что **сечения неупругого рассеяния и реакции (n,pn) во всех библиотеках кроме BROND-2 оценены не корректно.**

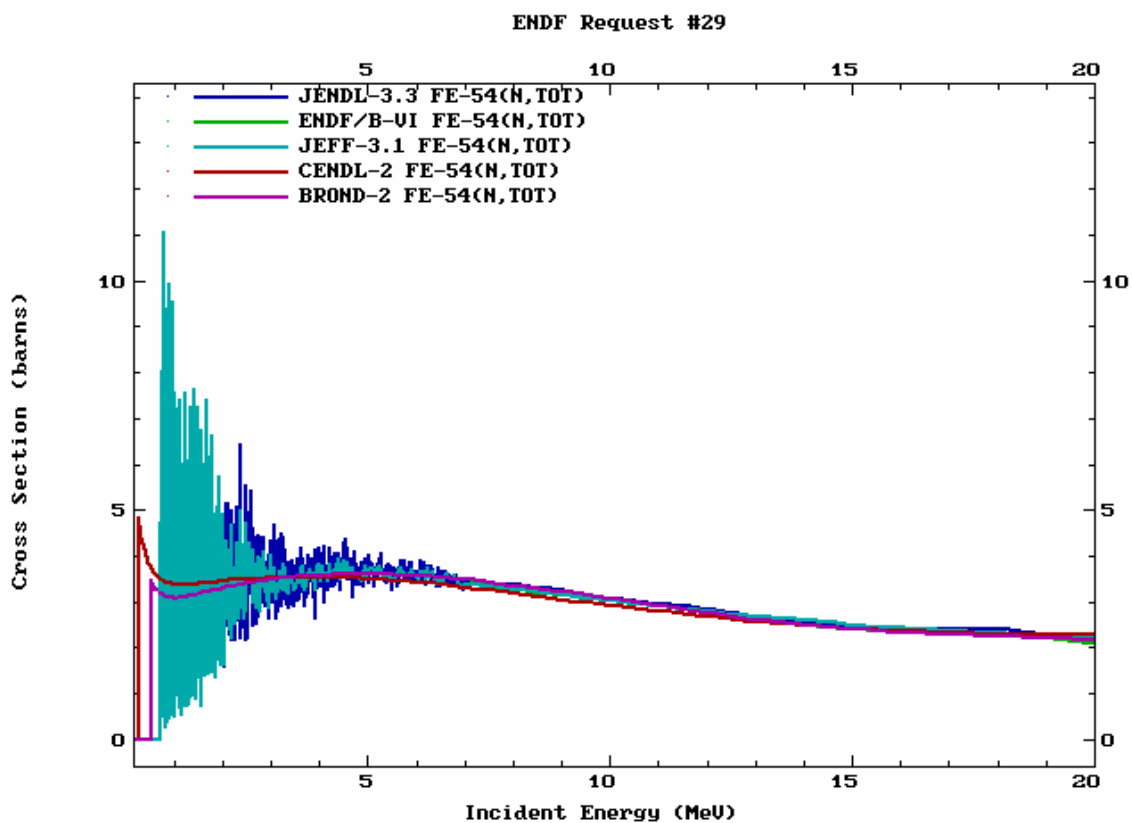


Рис. 1. Полное сечение в различных библиотеках для энергий выше области разрешённых резонансов.

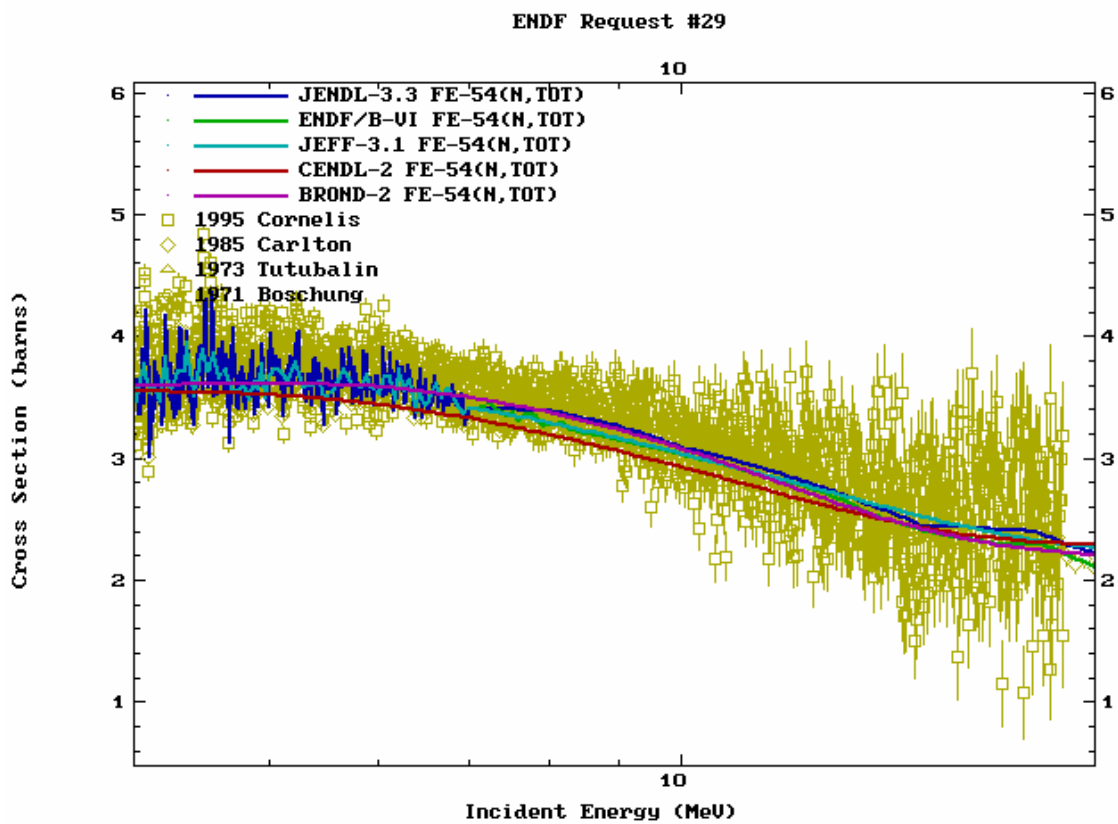


Рис. 2. Полное сечение в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данными для энергий выше 4 МэВ.

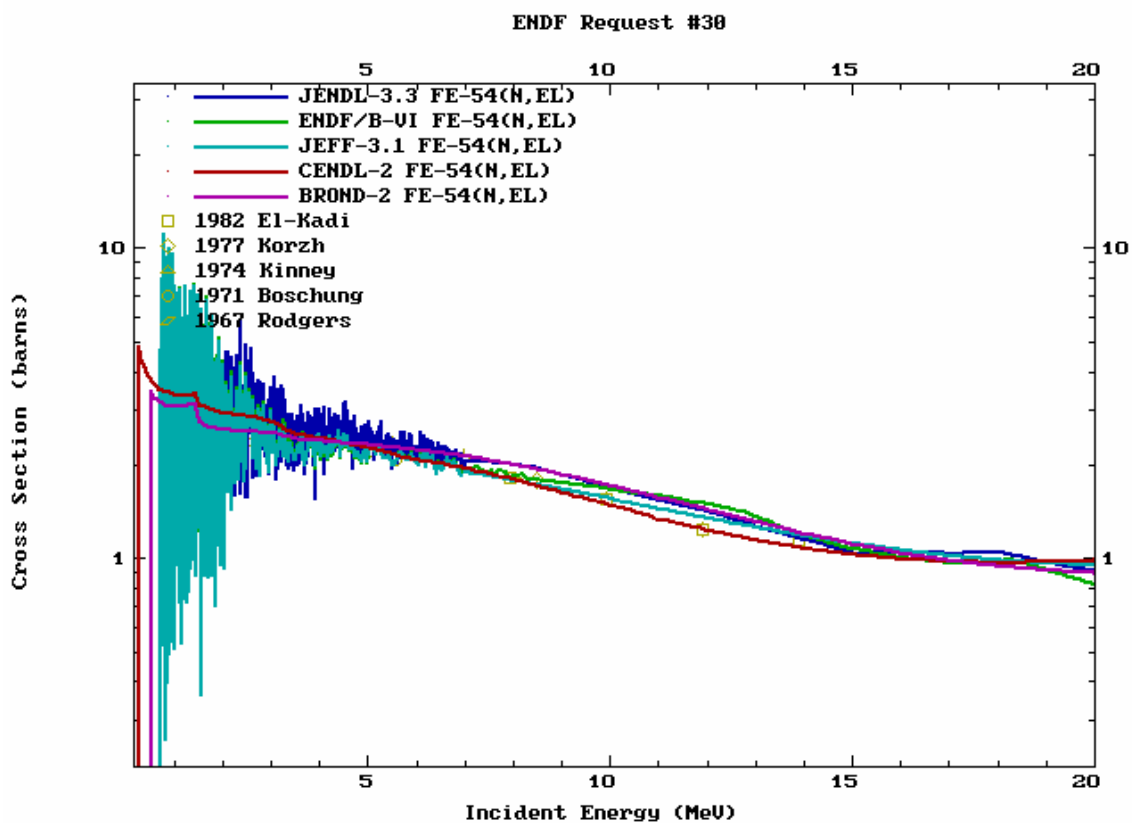


Рис. 3. Сечение упругого рассеяния в различных библиотеках для энергий выше области разрешённых резонансов.

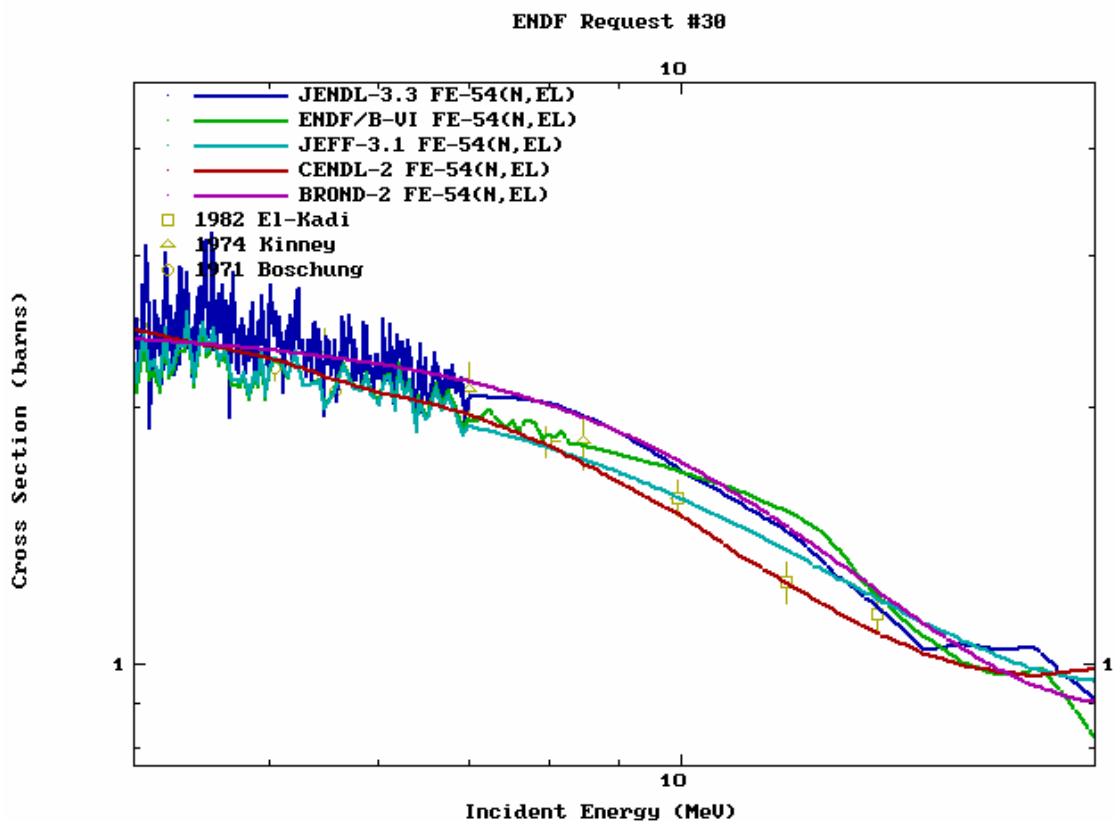


Рис. 4. Сечение упругого рассеяния в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данными для энергий выше 4 МэВ.

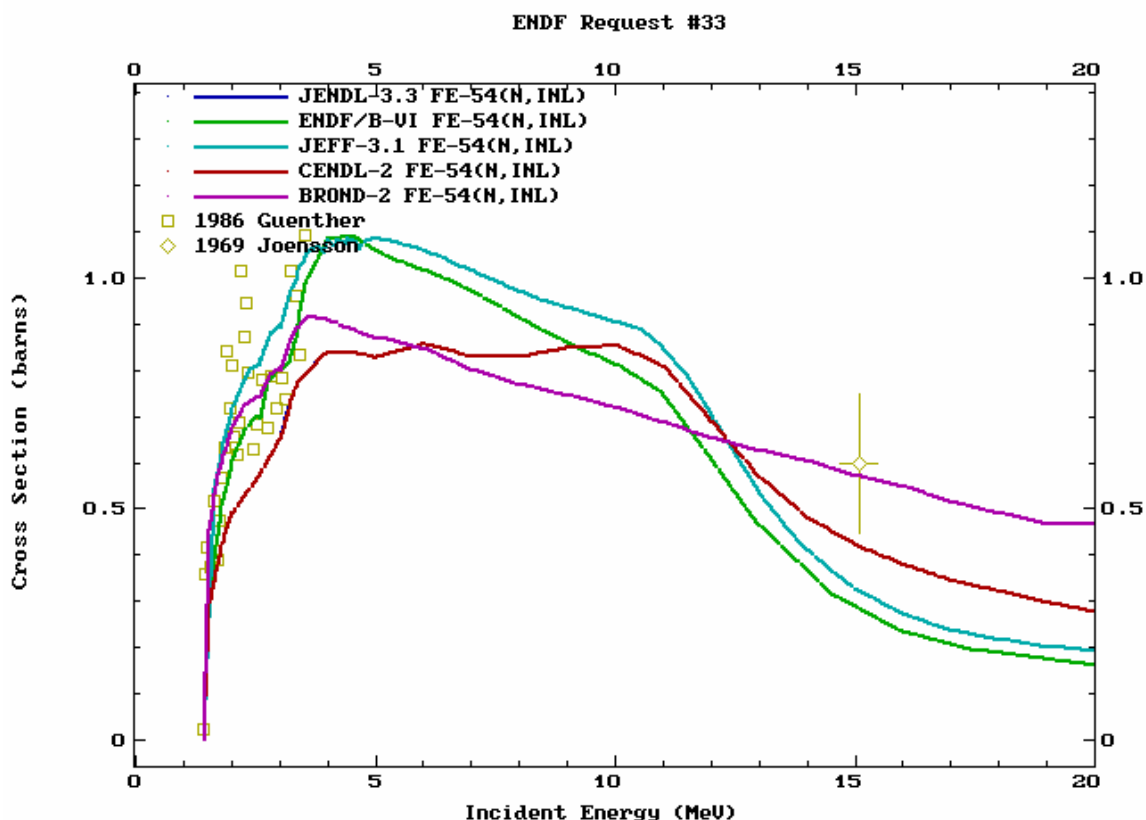


Рис. 5. Сечение неупругого рассеяния в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данным.

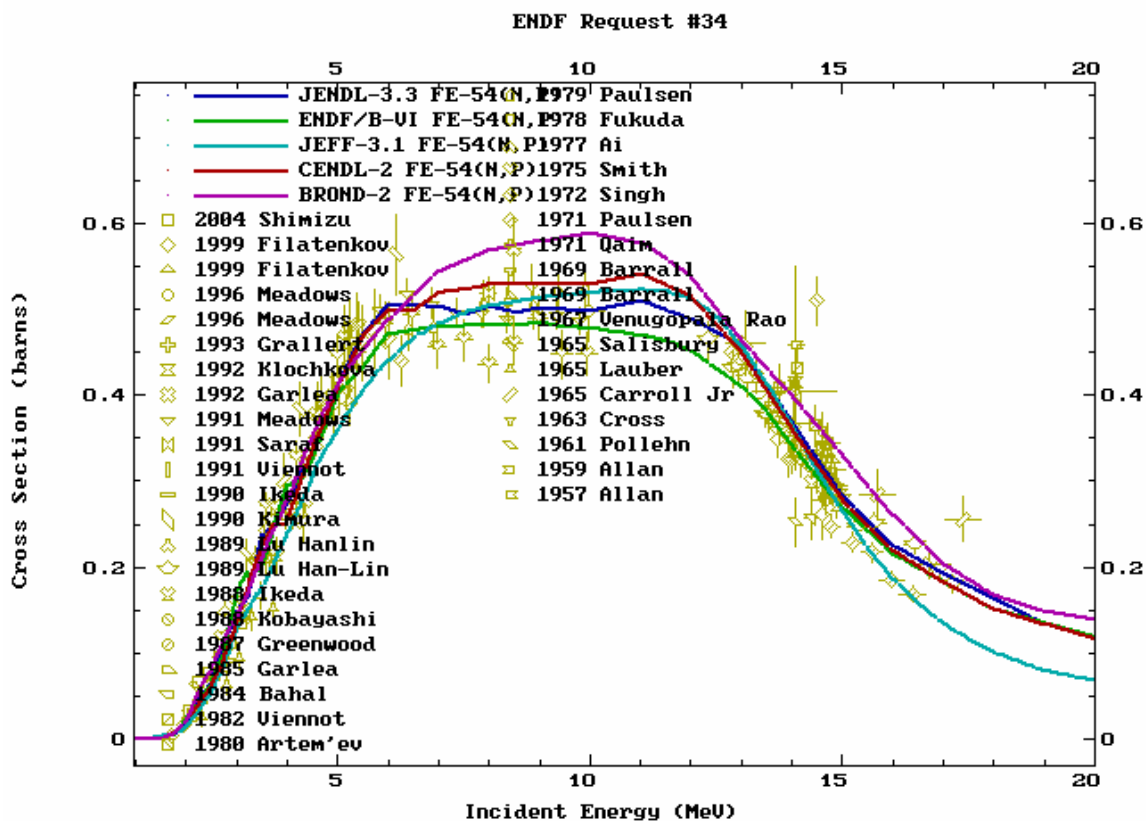


Рис. 6. Сечение (n,p) в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данным.

Для реакции (n,2n), показанной на рисунке 7, экспериментальные данные представлены двумя наборами данных: более высокие данные представляют полное

сечение (n,2n), а более низкие данные – парциальную реакцию (n,2n) заселяющее основное состояние $^{55}\text{Fe}^g$. BROND-2 наилучшим образом описывает сечение (n,2n).

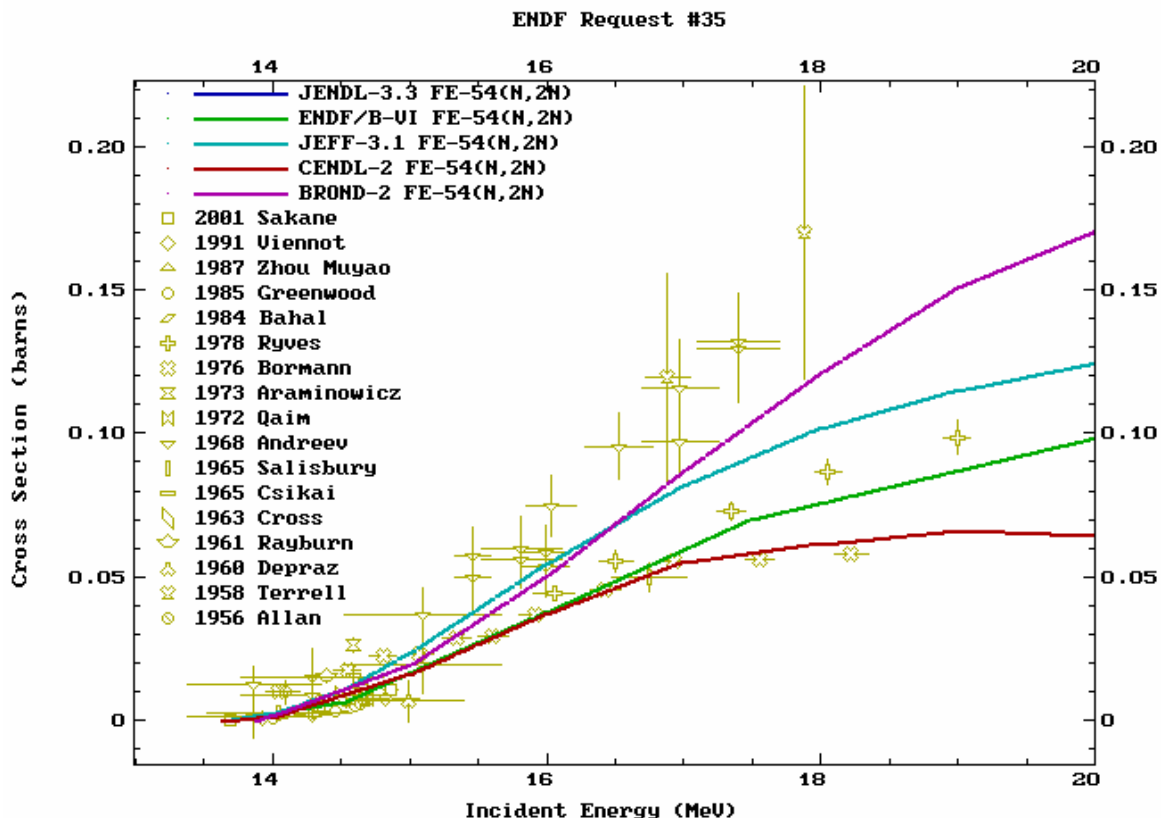


Рис. 7. Сечение (n,2n) в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данным.

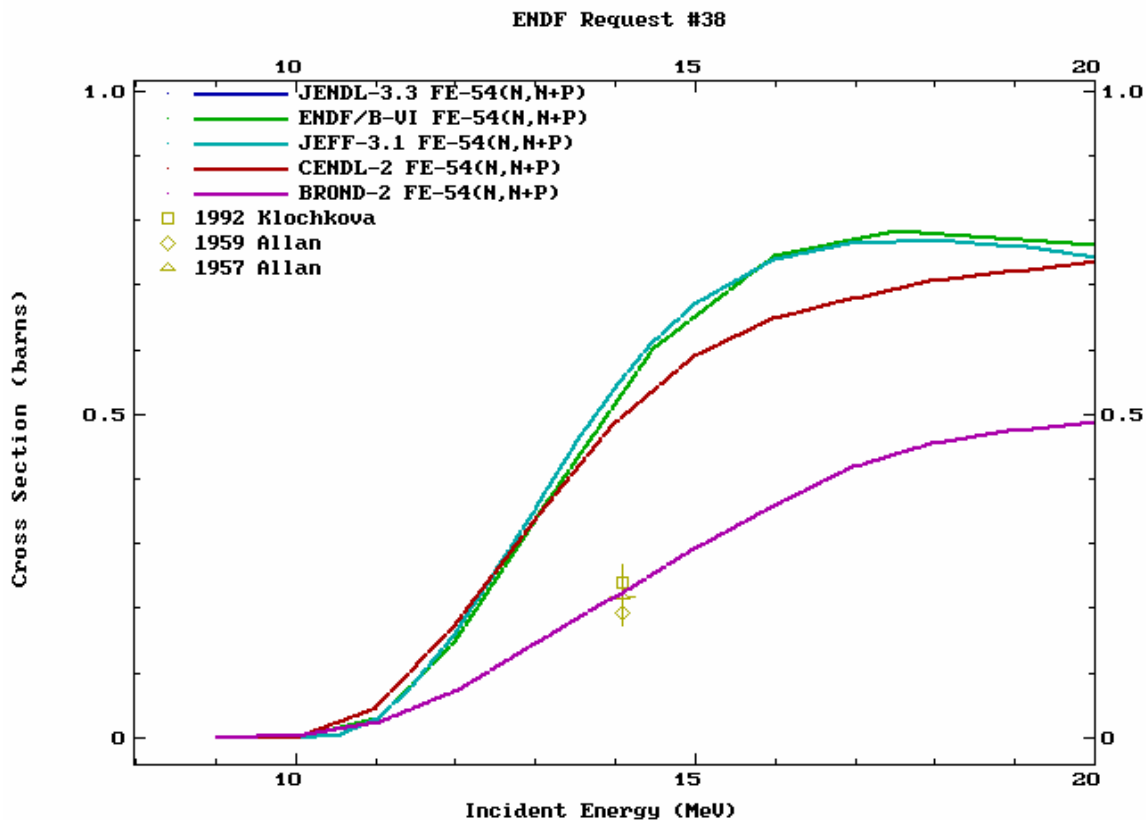


Рис. 8. Сечение (n,np) в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данным.

BROND-2 и JEFF-3.1 недооценивают сечение (n,α) в интервале энергий от 6 до 14 МэВ, а сечение (n,p) в BROND-2 является немного завышенным. Большое различие сечений захвата наблюдается в области энергий в несколько МэВ. Экспериментальные данные для ^{54}Fe отсутствуют в EXFOR, но анализ всех других данных для ядер области Cr-Fe-Ni и то, что в библиотеке ENDF/B-VI.8 учтены "сырые" данные Аллена до 5 МэВ делает оценку ENDF/B-VI.8 (и JEFF-3.1 близкую к ней) предпочтительней.

Выводы: несмотря на имеющиеся недостатки, оценки библиотек ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1) и JEFF-3.1 в быстрой области энергий являются предпочтительными.

4. Угловые и энергетические распределения вторичных частиц

BROND-2: угловые распределения упругого рассеяния взяты как для естественного железа в библиотеке ENDF/B-IV. Приведены 20 дискретных уровней неупругого рассеяния, в 9 из которых, являющихся уровнями коллективной природы, учтены вклады прямых процессов. Все энерго-угловые распределения в реакциях с возбуждением континуума уровней приведены как изотропные распределения Максвелла с заданной температурой.

ENDF/B-VI.b1 (ENDF/B-VI.8), JENDL-3.3 (JENDL-3.1) и JEFF-3.1: содержат полные и детальные энерго-угловые распределения всех вторичных частиц для нейтронов с энергией до 150 (ENDF/B-VII.b1) и 200 МэВ (JEFF-3.1). Учтены все механизмы реакций определяющие энерго-угловые распределения. Однако анализ интегральных сечений, выполненный выше, и анализ спектров нейтронов реакции (n,n') показывает, что сечение одного из 2-х каналов, вносящих вклад в реакцию $(n,np)=(n,n+p)+(n,p+n)$, а именно реакции $(n,n+p)$, является сильно завышенным, что приводит к завышенной оценке всего сечения (n,np) и к неправильной форме сечения (n,n') .

CENDL-2: представляет ревизию JENDL-3.1, где оценка энерго-угловых распределений выполнена независимо от оценки сечений, что может привести к потере согласованности между интегральными и дифференциальными сечениями.

Вывод: Оценки библиотек ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1), JENDL-3.3 и JEFF-3.1 несмотря на отмеченные недостатки являются предпочтительными.

5. Погрешности оценённых сечений

Одинаковые оценённые погрешности сечений приведены в ENDF/B-VI.b1 (ENDF/B-VI.8) и JEFF-3.1. Погрешности получены методом весьма грубой "экспертной" оценки. Ковариационные матрицы (за исключением реакции (n,p)) не заданы.

Вывод: Оценки погрешностей из библиотек ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1) и JEFF-3.1 являются единственно доступными.

6. Заключение

6.1. Общий вывод

Файл из библиотеки JEFF-3.1 может быть рекомендован как наилучший из рассмотренных. Для улучшения файла при его использования в расчетах термоядерных установках необходима совместная переоценка сечений (n,n') и (n,np). При внесении в РОСФОНД файлы MF=8, MF=10 и MF=33 опустить т.к. долгоживущие изомеры не образуются, а надежность оценки погрешностей здесь не анализировалась.

6.2. Автор обоснования оцененных данных

Проняев В.Г.

6.2 Содержание файла

26.2. Железо-55

Радиоактивно. ($T_{1/2}=2.73$ г) распадается в марганец-55 путем захвата орбитального электрона.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка из EAF-2003

26.3. Железо-56

1. Общие характеристики

1.1. $Z=26$ (заряд)

1.2. $A=56$ (атомный номер)

1.3. $A_w=55.454$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Содержание в естественной смеси 91.754 ± 0.036 (атомарные проценты)

1.5. Спин основного состояния 0^+

2. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата

Сечения при энергии 0.0253 эВ и резонансный интеграл захвата в различных библиотеках (Таблица 1) рассчитанные с помощью программы PSYCHE7.1 отличаются несущественно и находятся в пределах погрешности новой оценки С. Мугхабгхаба[1].

Таблица 1.

Библиотека	Упругое сечение, б	Сечение захвата, б	Резонансный интеграл захвата, б
BROND-3	12.08	2.590	1.340
ENDF/B-VI.8	12.05	2.589	1.344
JENDL-3.3	12.08	2.590	1.348
JEFF-3.1	12.10	2.585	1.300
CENDL-2	12.05	2.589	1.338
С. Мугхабгхаб[1]		2.59 ± 0.14	1.4 ± 0.2

3. Резонансная область

Резонансная область представлена разрешёнными резонансами в области энергий нейтронов до 850 кэВ. Количество резонансов, их квантовые характеристики, положение и нейтронные ширины практически не отличаются от библиотеки к библиотеке. Небольшая вариация ширин захвата для р- и d- резонансов между ENDF/B-VI.8 (CENDL-2) и BROND-3 (JEFF-3.1, JENDL-3.3) ведёт к небольшим отличиям в средних сечениях захвата. JEFF-3.1 содержит на 5 р- и 2 d- резонанса больше, чем другие библиотеки. Статистические распределения характеристик уровней, несмотря на то, что идентификация р- и d- уровней не является однозначной, следуют ожидаемым из статистической модели реакций. На рисунках 1 – 3 показано сравнение распределений Вигнера, Портера-Томаса, нарастающей суммы резонансов и силовых функций с их модельной оценкой для s-, р- и d- волн в библиотеке BROND-3. Как показывает сравнение усреднённых сечения захвата с экспериментальными данными полученными с низким разрешением, выше энергии 400 кэВ возможна потеря части захватных площадей при восстановлении сечений из параметров резонансов. Для компенсации этого, в BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.8 вводится фоновое сечение.

Вывод: Резонансные параметры в файлах различных библиотек отличаются незначительно и не влияют на выбор лучшей оценки. Сечение захвата в библиотеке JEFF-3.1 ниже средних сечений наблюдаемых на эксперименте.

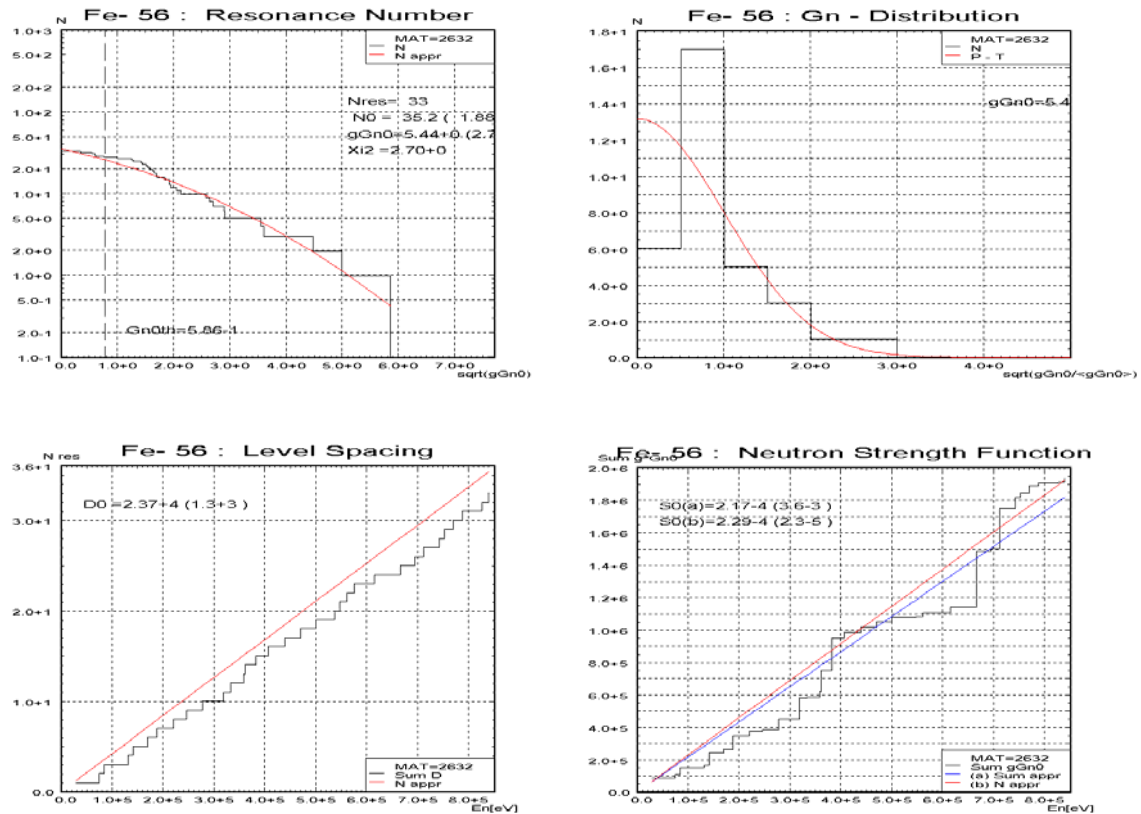
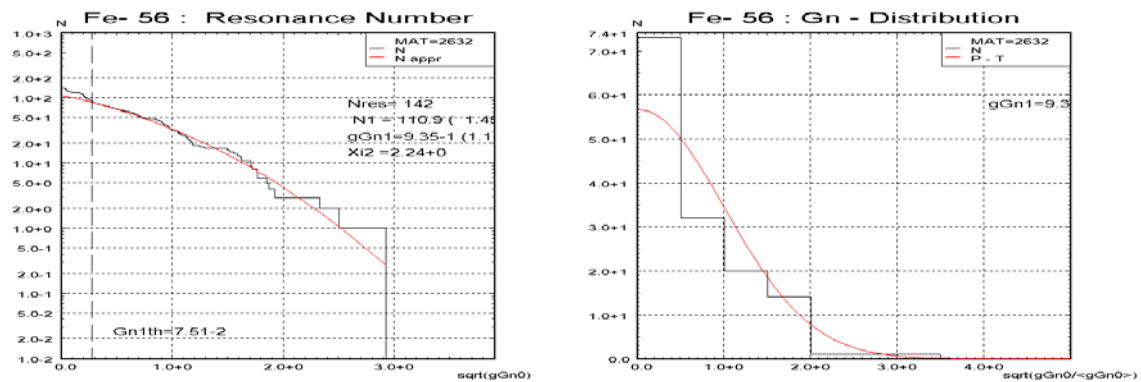


Рис. 1 (слева – направо и сверху – вниз). Распределение Вигнера, Портера-Томаса, суммы нарастающего числа уровней и приведённых нейтронных ширин для s-волны в библиотеке BROND-3.



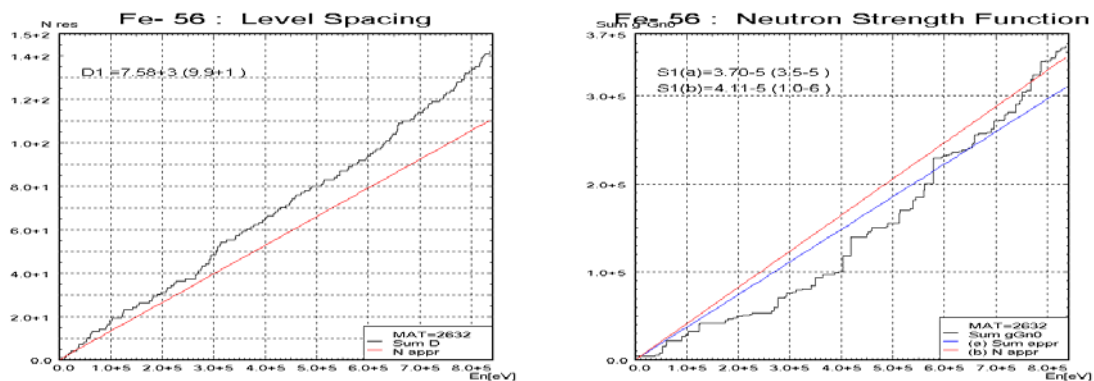


Рис. 2 Тоже что на Рис. 1, но для p- волны.

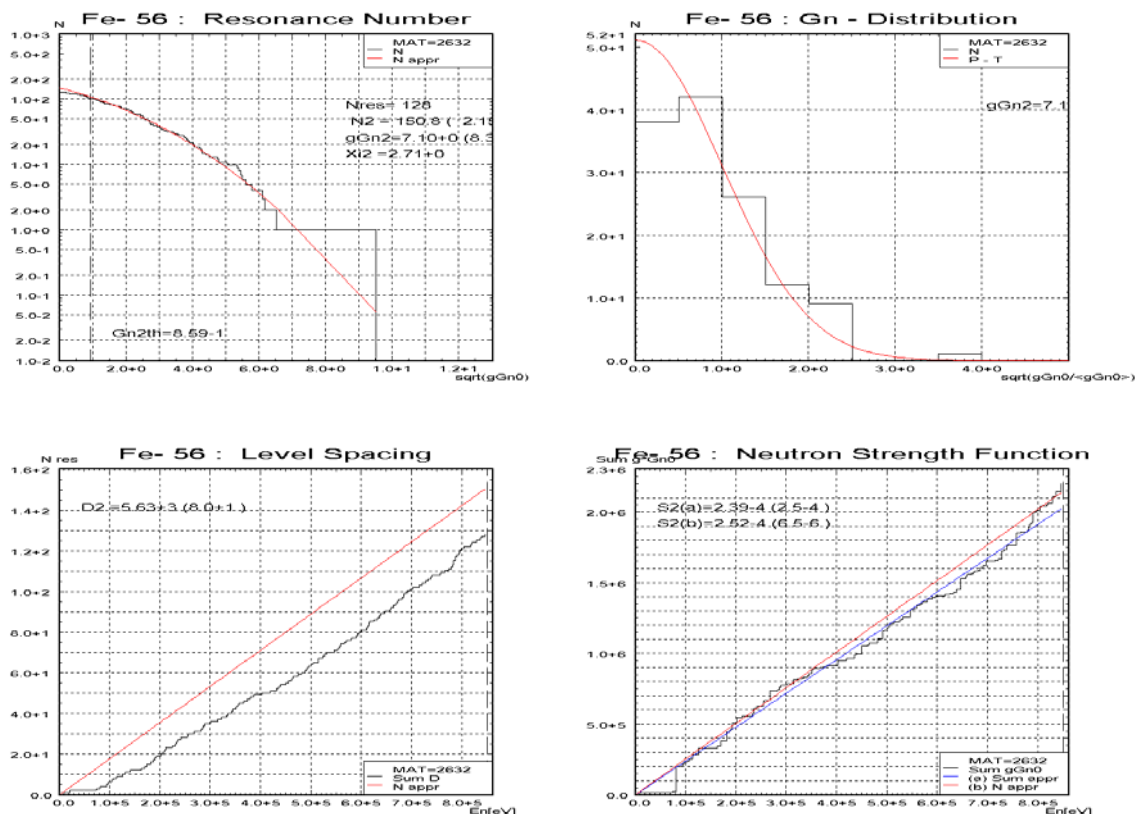


Рис. 3 Тоже что на Рис. 1, но для d- волны.

4. Сечения в области энергий 0.85 – 20 МэВ

Так как оценка BROND-3 (JEFF-3.1) в области быстрых нейтронов основана на одновременном описании методом наименьших квадратов всех экспериментальных данных по парциальным и полным сечениям доступным до 1993 года то вполне обосновано можно считать, что оценка наилучшим образом проходит через совокупность этих данных[2,3]. Поэтому в дальнейшем, для сравнения как правило привлекались только последние экспериментальные данные.

Сравнение полного сечения из библиотек BROND-3, ENDF/B-VI.8 и JENDL-3.3 показано на Рис. 4. Отметим, что новейшие данные показывают, что сечение в BROND-3 возможно недооценено приблизительно на 2 % при энергии выше 16 МэВ.

Сравнение сечения упругого рассеяния из библиотек BROND-3, ENDF/B-VI.8 и JENDL-3.3 показано на Рис. 5. Согласие оценки BROND-3 с прецизионными результатами последних измерений хорошее.

Сравнение различных оценок сечения неупругого рассеяния проведено в главе X посвящённой проверке данных в интегральных экспериментах.

Сечение реакции $(n,2n)$ из библиотеки BROND-3 хорошо согласуется с экспериментальными данными. Из-за высокого порога реакции $(n,3n)$ и небольших сечений реакций (n,np) и $(n,n\alpha)$ конкурирующих с реакцией $(n,2n)$, форма реакции $(n,2n)$ является плоской при энергии 18 – 20 МэВ.

На рисунке 7 показано сравнение сечения захвата в групповом представлении из библиотеки BROND-3 с имеющимися экспериментальными данными. Обсуждение качества оценок захвата проводится в главе X посвящённой проверке данных в интегральных экспериментах. Необходимо отметить, что фоновая подложка в сечение захвата введена в ENDF/B-VI.8 в область разрешённых резонансов для $E_n=400 - 850$ кэВ в групповом виде, в BROND-3 линейно, между тепловой точкой и 850 кэВ, в JENDL-3 – в групповом виде от 500 до 850 кэВ и отсутствует в JEFF-3.1. Это приводит к заметной недооценке сечения захвата в JEFF-3.1 для интервала 400 – 850 кэВ.

Сравнение сечения реакции (n,p) и (n,α) из библиотек оценённых данных с экспериментальными данными полученными после завершения оценки показаны на рисунках 8 и 8а. Согласие между оценёнными и новыми экспериментальными данными хорошее.

Экспериментальные данные по сечениям реакции (n,np) и $(n,n\alpha)$ малочисленны. Сравнение имеющихся данных с результатами оценок из разных библиотек показано на рисунках 9 и 10. Сечения всех других реакций малы и не важны для большинства приложений.

Вывод: Сечения в быстрой области в различных библиотеках отличаются незначительно и не могут служить основанием для предпочтения одной библиотекой перед другой.

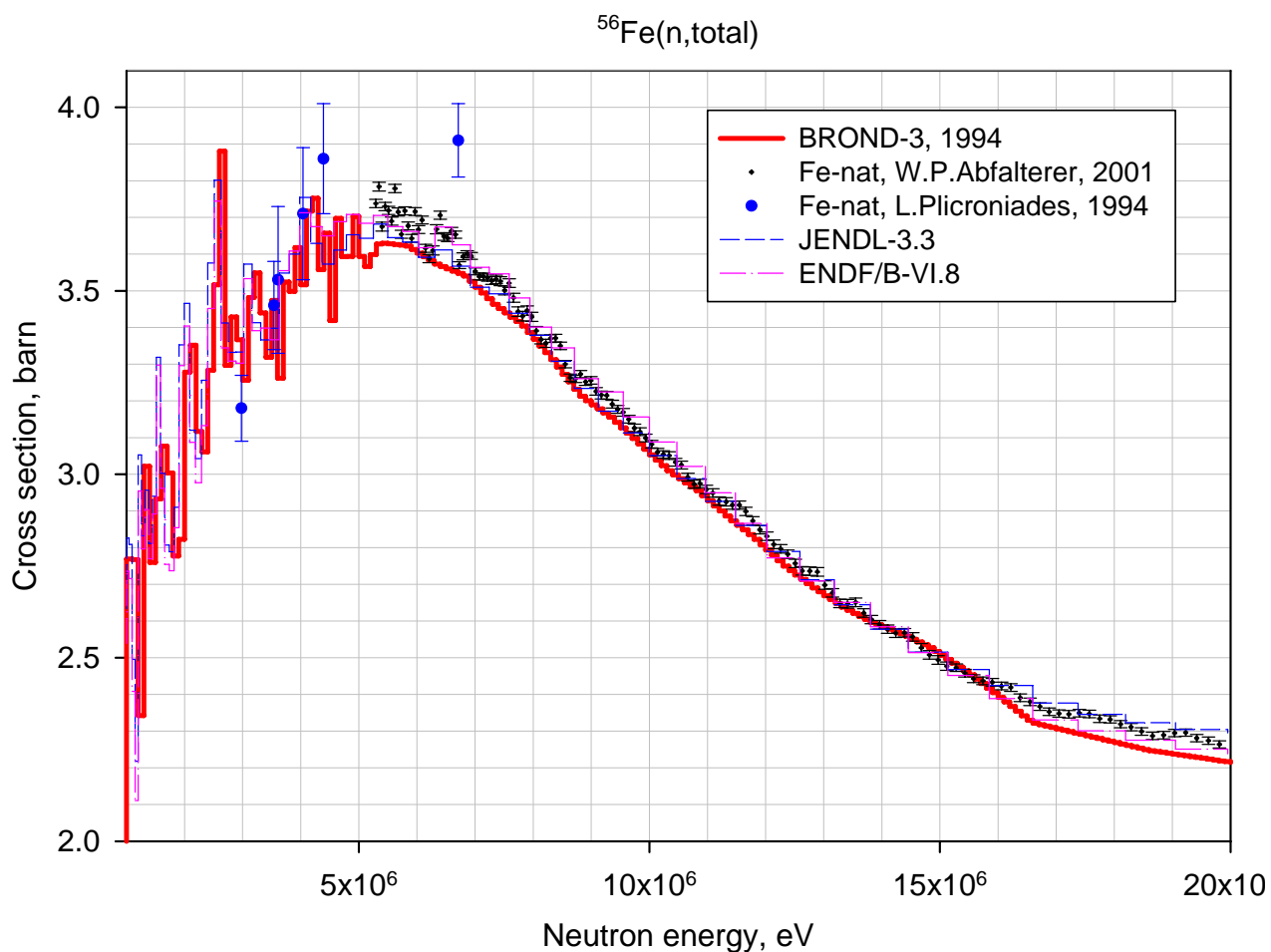


Рис. 4. Сравнение полных сечений из различных библиотек с последними экспериментальными данными.

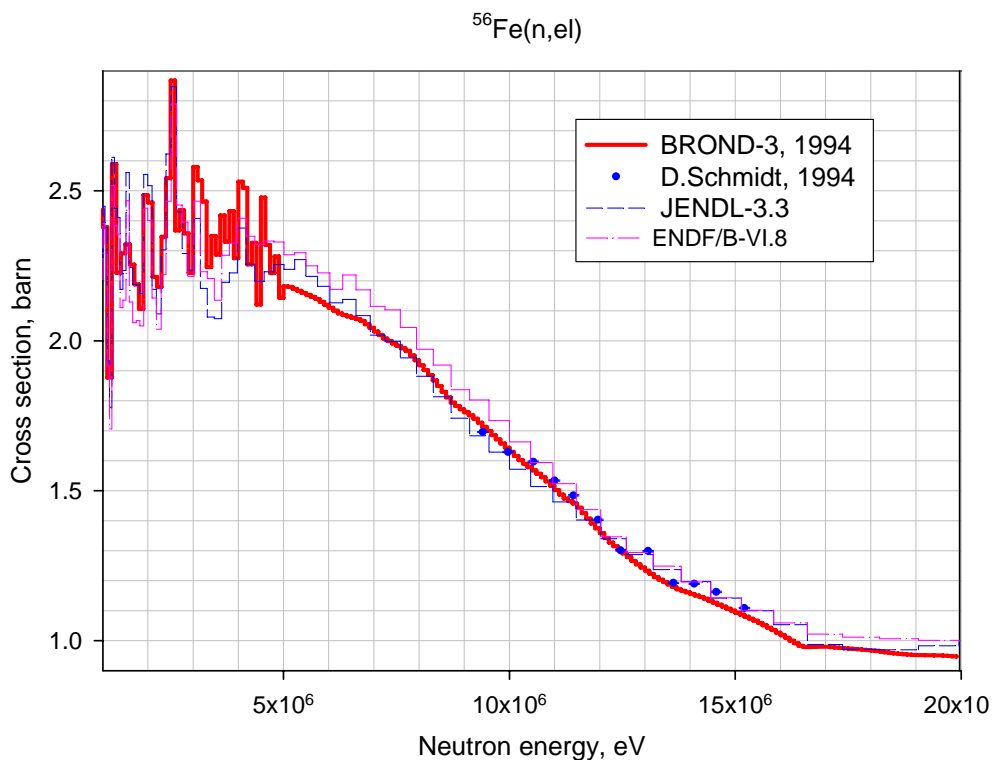


Рис. 5. Сравнение сечения упругого рассеяния из различных библиотек с последними экспериментальными данными.

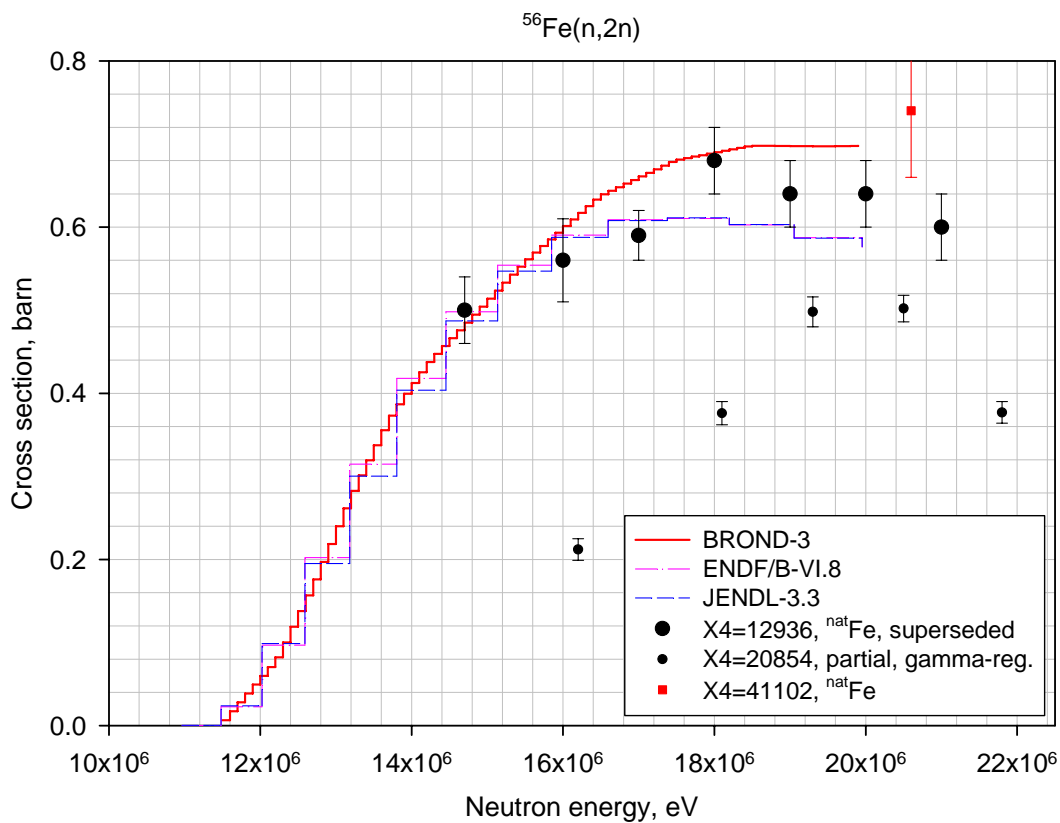


Рис. 6. Сравнение сечения (n,2n) из различных библиотек с последними экспериментальными данными из библиотеки экспериментальных данных ЭКСФОР (X4 – номер работы в ЭКСФОРе).

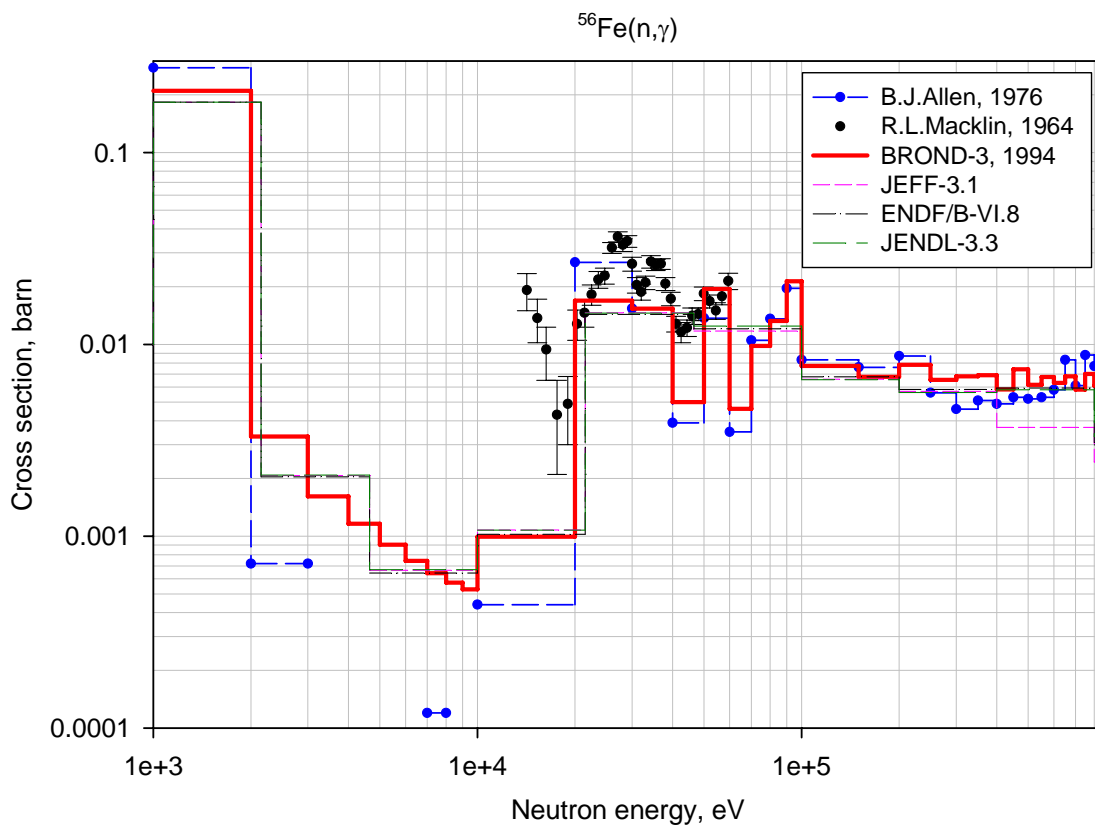


Рис. 7. Сравнение сечения (n,γ) из библиотеки BROND-3, JEFF-3.1, ENDF/B-VI.8 и JENDL-3.3 с экспериментальными данными полученными при “плохом” разрешении в наиболее важной для реакторных приложений области энергий.

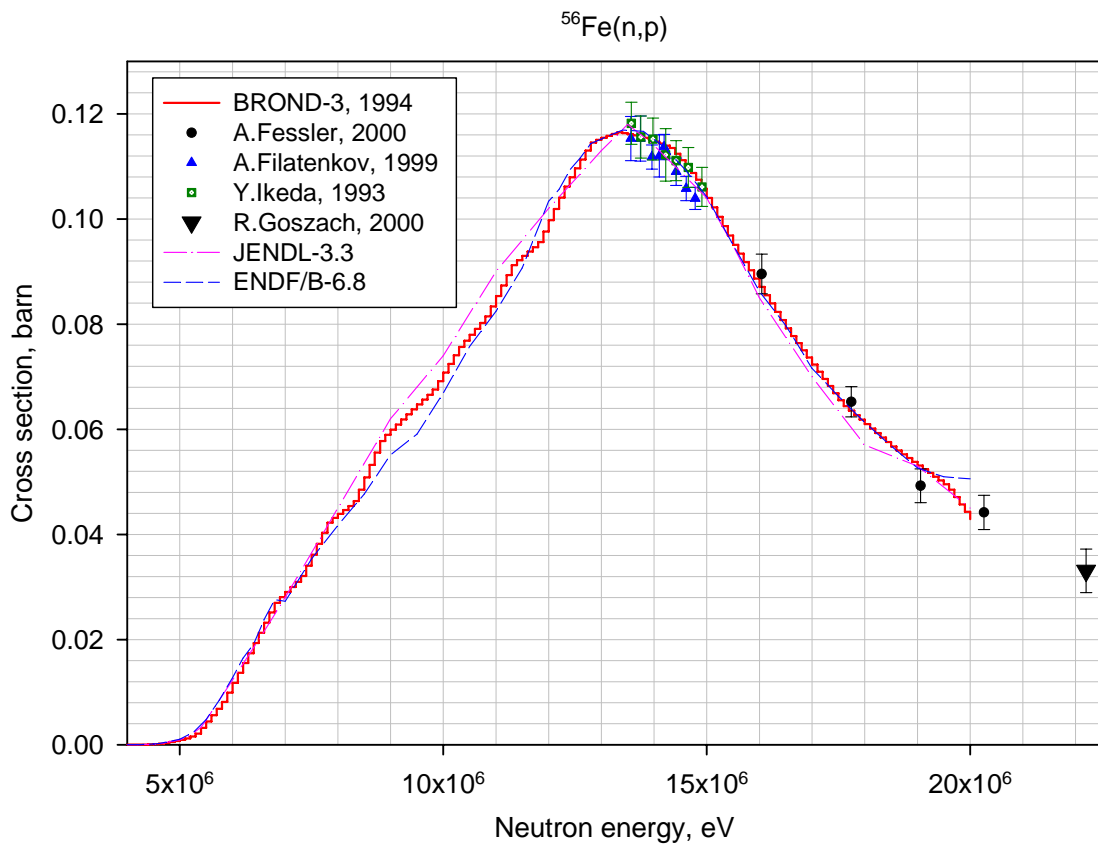


Рис. 8. Сравнение сечения (n,p) из библиотеки BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.8 с экспериментальными данными полученными после выполнения оценки BROND-3.

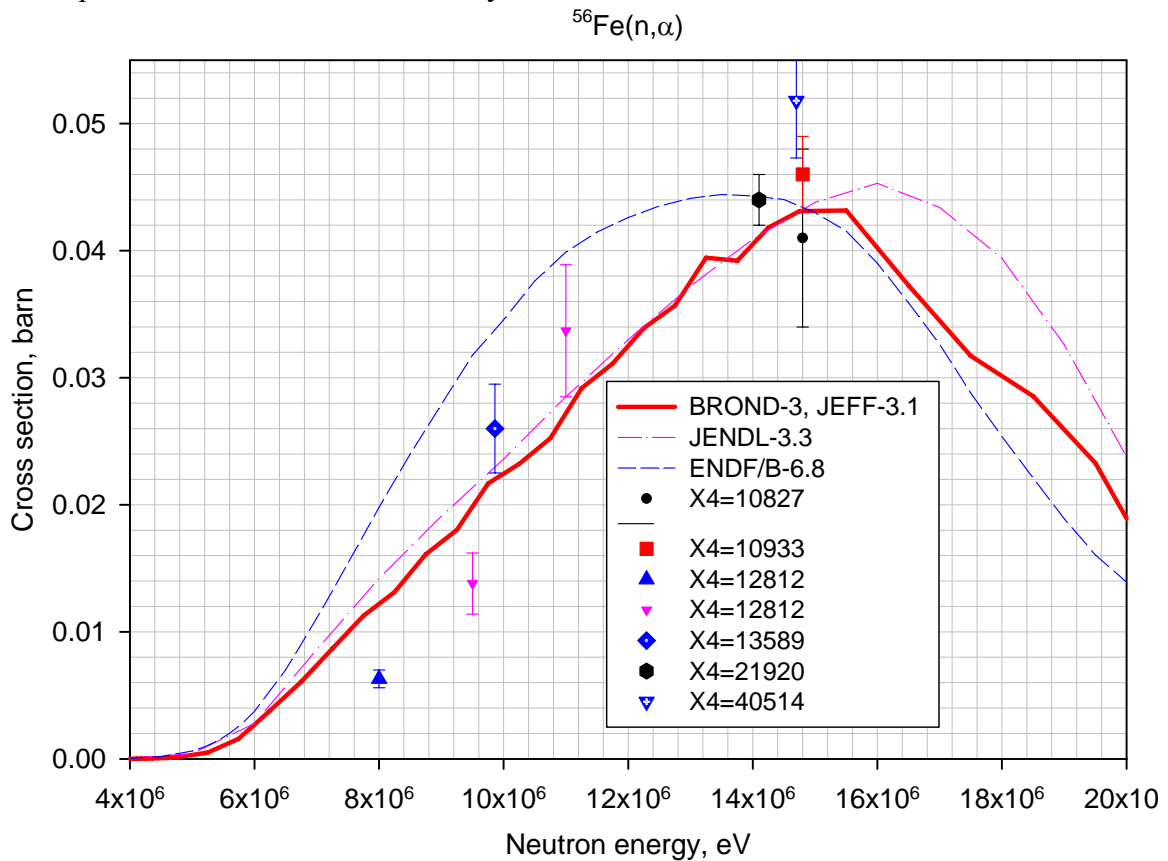


Рис. 8а. Сравнение сечения (n,α) из библиотеки BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.8 с экспериментальными данными.

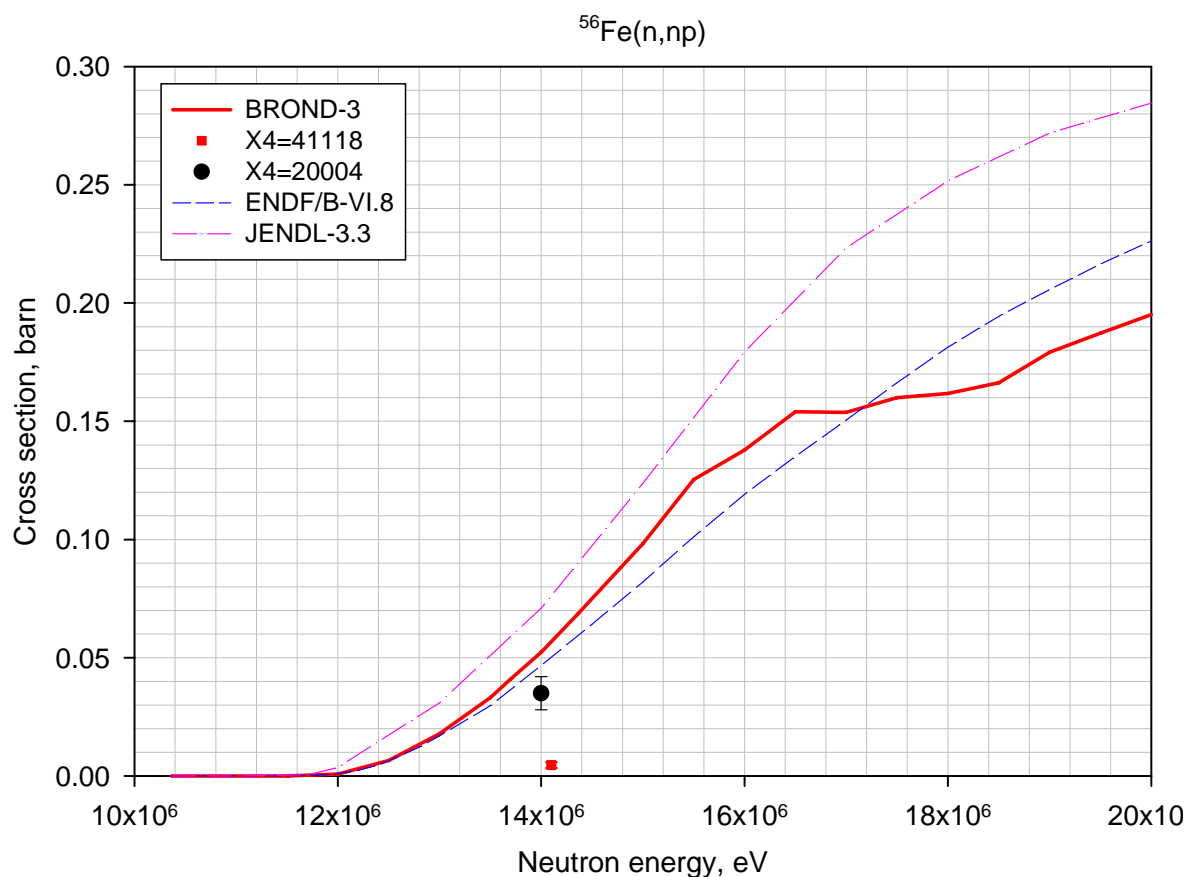


Рис. 9. Сравнение сечения (n,np) из разных библиотеки с имеющимися экспериментальными данными.

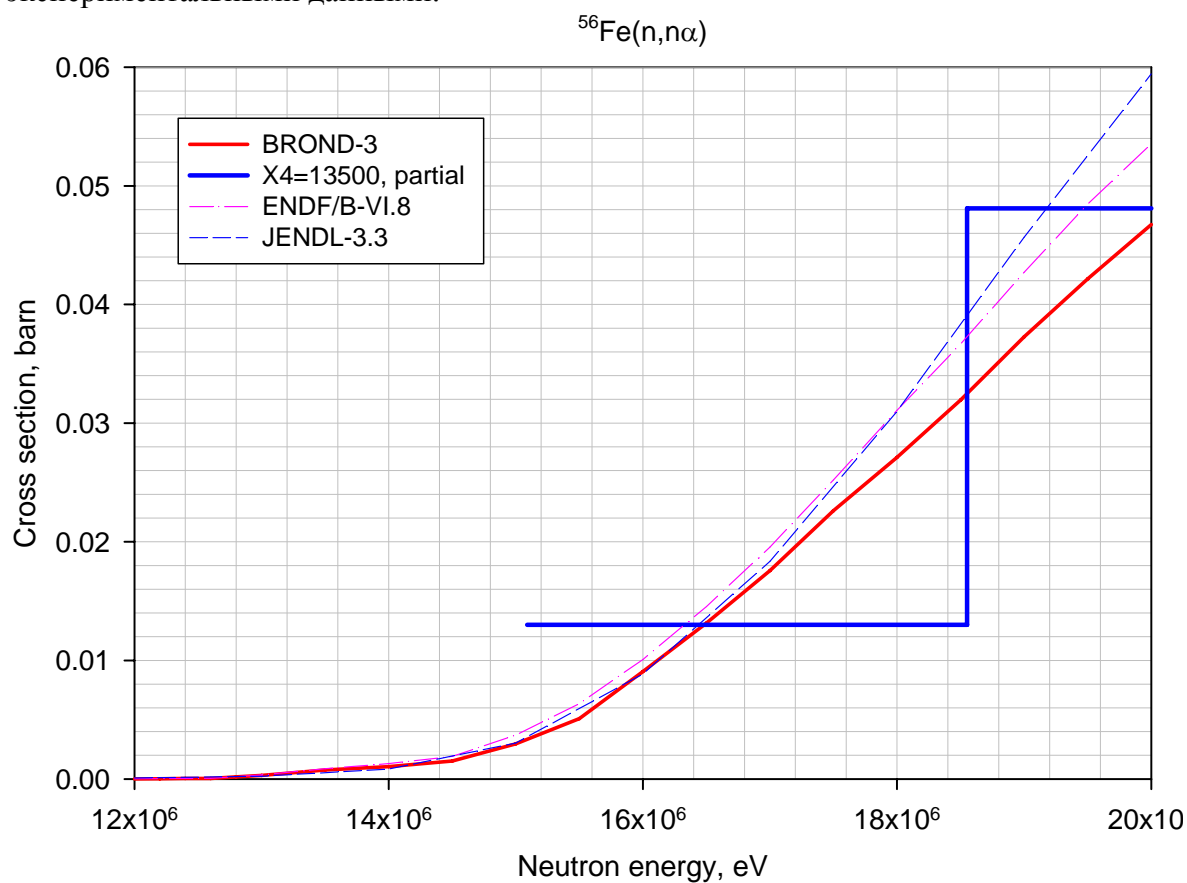


Рис. 10. Сравнение сечения ($n, n\alpha$) из разных библиотеки с имеющимися экспериментальными данными.

5. Угловые распределения нейтронов

Угловые распределения упругого рассеяния нейтронов в области разрешённых резонансов конструкционных материалов могут существенно определять утечку нейтронов и эффект их глубокого проникновения в средах содержащих эти материалы. Рекомендация использовать в таких расчётах угловые распределения упругого рассеяния восстановленные из резонансных параметров трудно реализовать, потому что программы подготовки данных как правило не содержат модулей расчёта угловых распределений. Поэтому в большинстве оценённых файлов угловые распределения упругого рассеяния заданы через коэффициенты разложения по полиномам Лежандра. Однако эти коэффициенты разложения или получены из оптико-модельных расчётов или, в лучшем случае, оценены из данных экспериментов выполненных с плохим разрешением. Для демонстрации этого на рисунке 11 показана энергетическая зависимость коэффициента a_1 полинома Лежандра разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в резонансной области и оценённая в ENDF/B-VI.8 из экспериментальных данных с низким разрешением, в JEFF-3.1 – усреднённая по энергии рассчитанная из резонансных параметров, в BROND-3 – детальная зависимость полученная из оценённых резонансных параметров. Форма энергетической зависимости a_1 с резким знакопеременным изменением величина a_1 определяется интерференцией резонансного и потенциального рассеяния в минимумах сечений. На рисунках с 14 по 39 показано сравнение детальной зависимости коэффициентов Лежандра a_1 и a_2 для различных интервалов области разрешённых резонансов. Такая резкая зависимость формы угловых распределений от энергии естественно наблюдается и на эксперименте. Так на рисунке 40 приведено сечение упругого рассеяния под углом 140 градусов для ^{56}Fe и $^{\text{nat}}\text{Fe}$. Эти же зависимости под углами 39, 90 и 140 градусов вблизи широкого s- и узкого d-резонанса показаны на рисунках 41 – 43. Энергетическая зависимость коэффициентов a_1 и a_2 для этой области энергий из библиотек BROND-3 и ENDF/B-VI.8 показана на рисунках 44 – 45. Очевидно, что экспериментальное разрешение существенно сглаживает энергетическую зависимость коэффициентов разложения по полиномам Лежандра. Интегральные сечения в минимумах вычисленные из таких угловых распределений будут существенно выше полных сечений измеренных с высоким разрешением (рисунок 46).

Вывод: Для приложений, где глубокое проникновение нейтронов или их утечка играет существенную роль, детальная зависимость угловых распределений от энергии нейтронов в резонансной области должна быть учтена. Все библиотеки кроме BROND-3 не учитывают её.

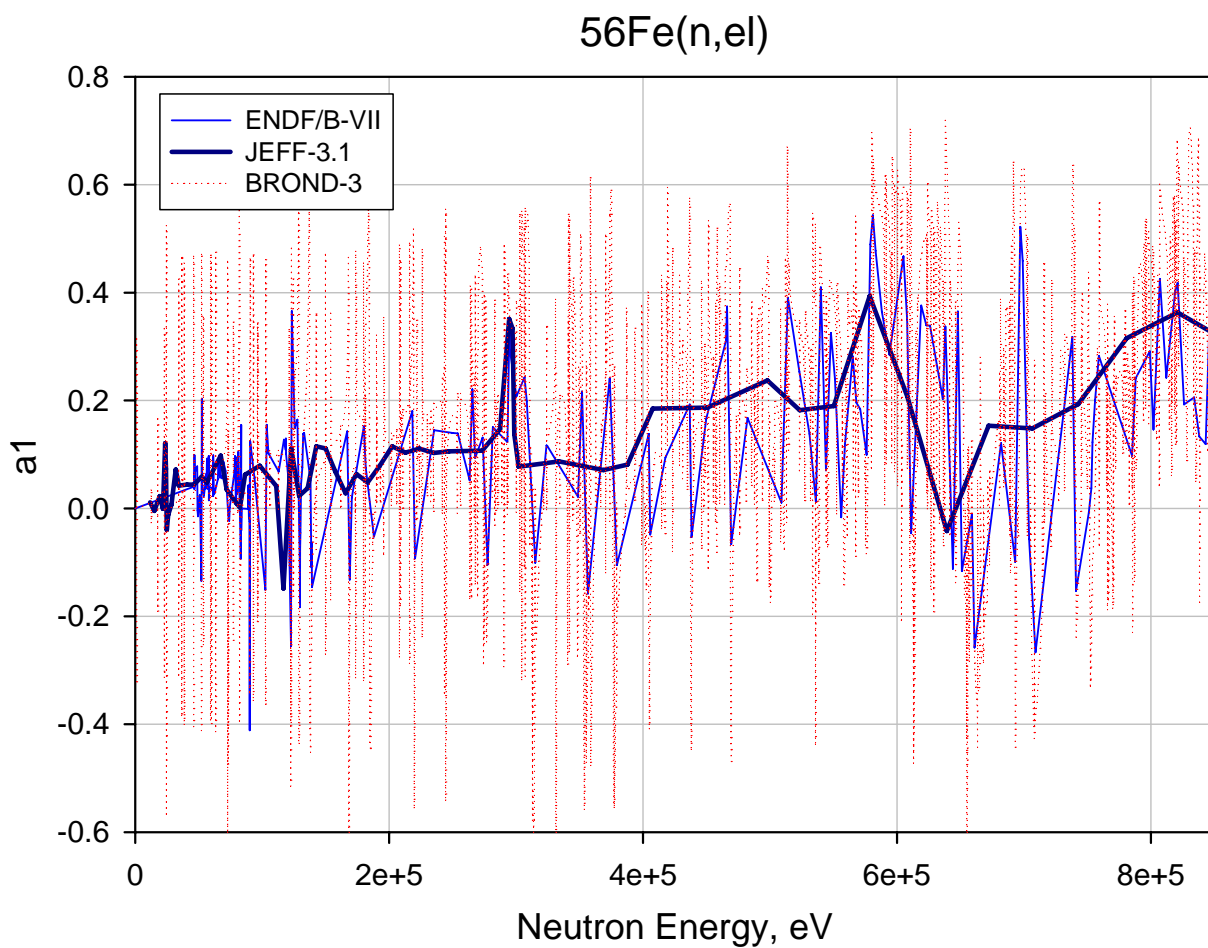


Рис. 11. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в резонансной области.

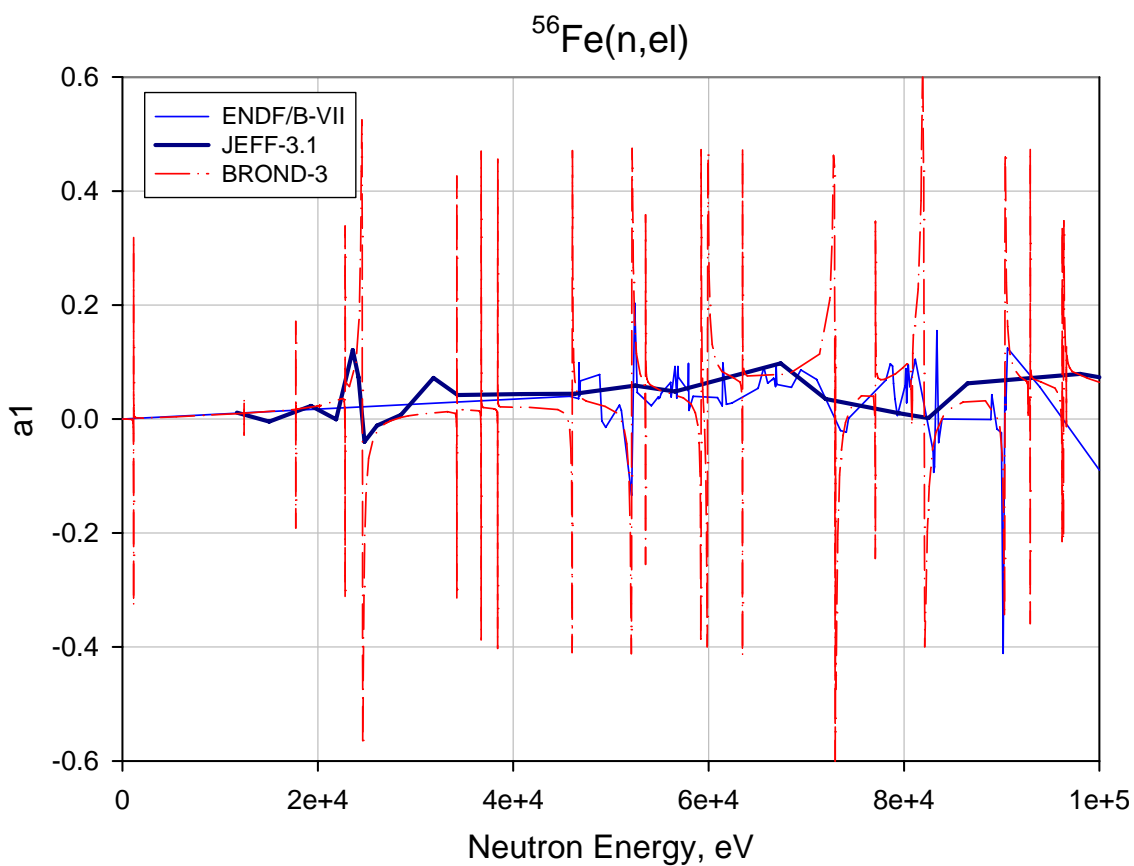


Рис. 12. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в области энергий 0 – 100 кэВ.

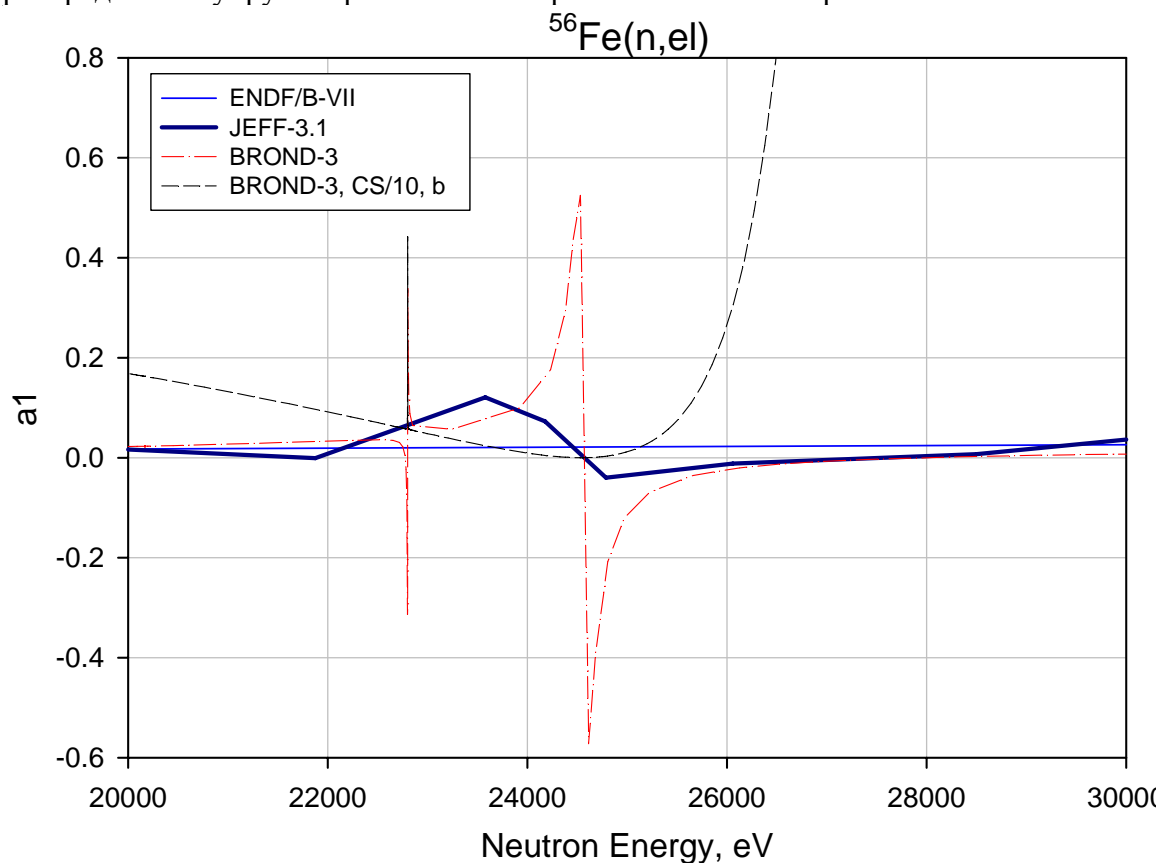


Рис. 13. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в области энергий вблизи 26 – кэВ s-резонанса.

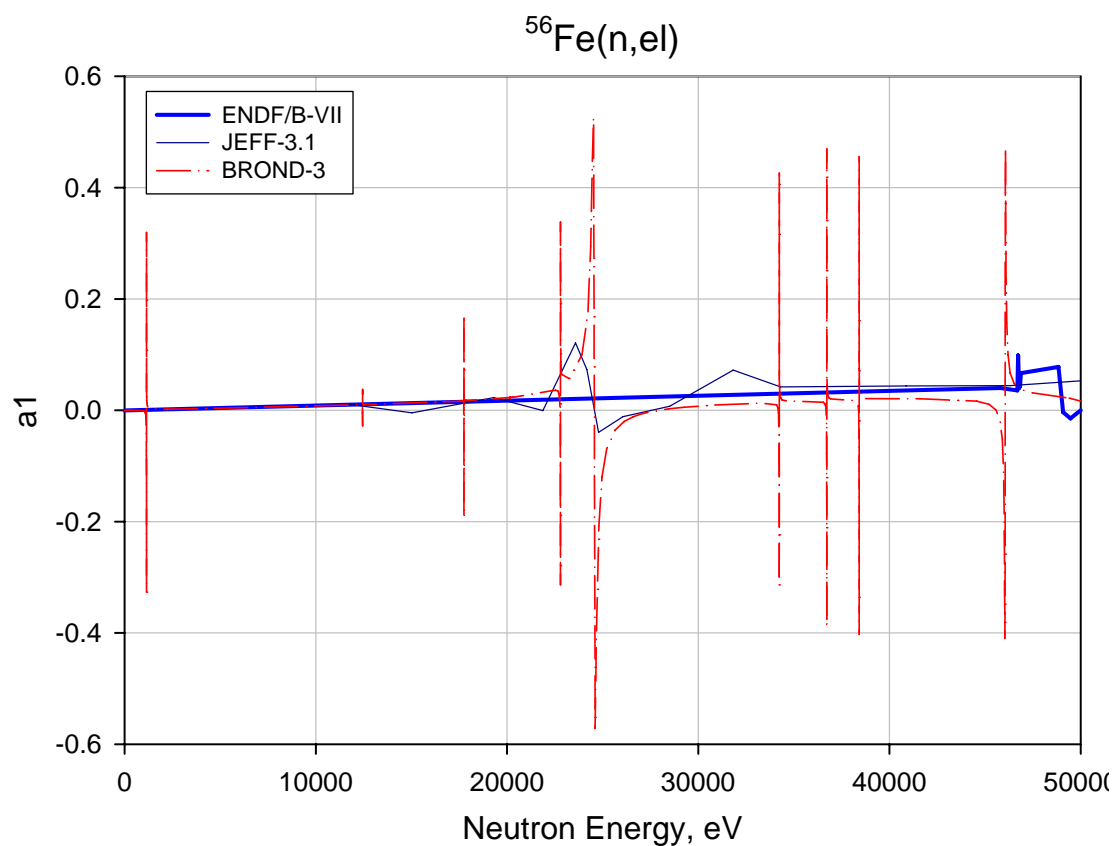


Рис. 14. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 0 – 50 кэВ.

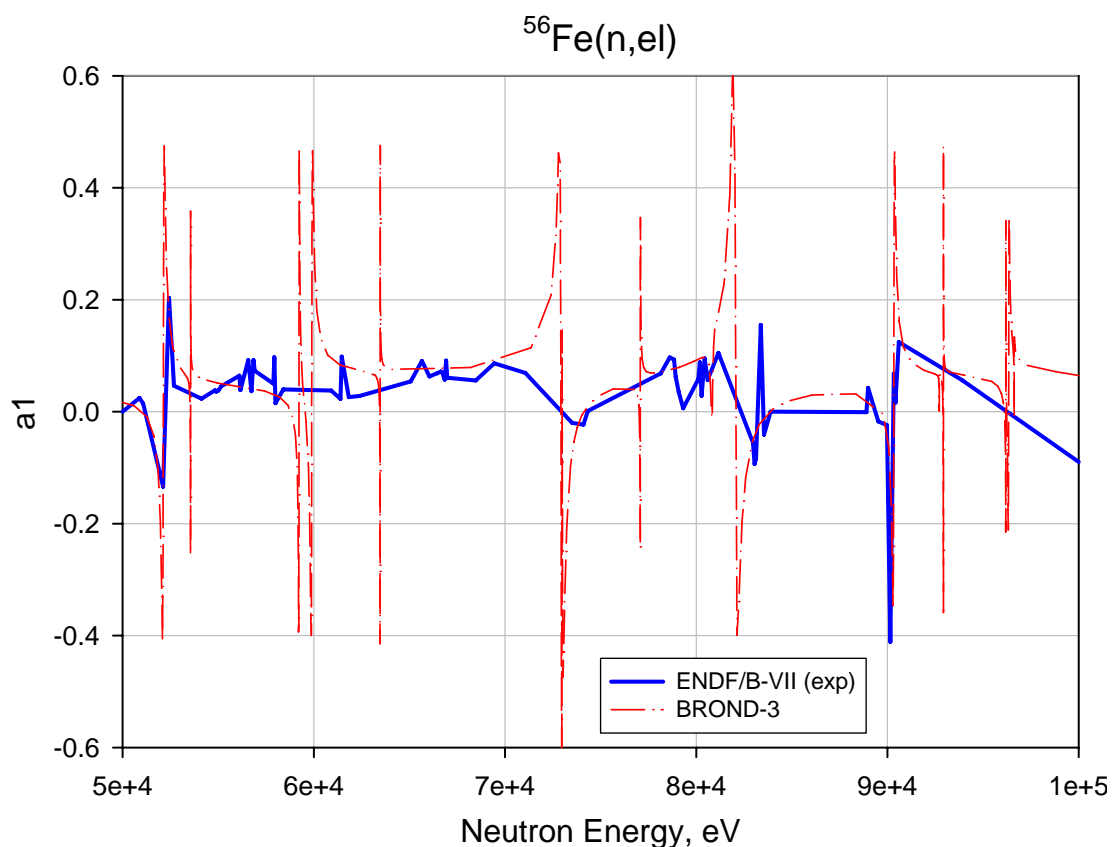


Рис. 15. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 50 – 100 кэВ.

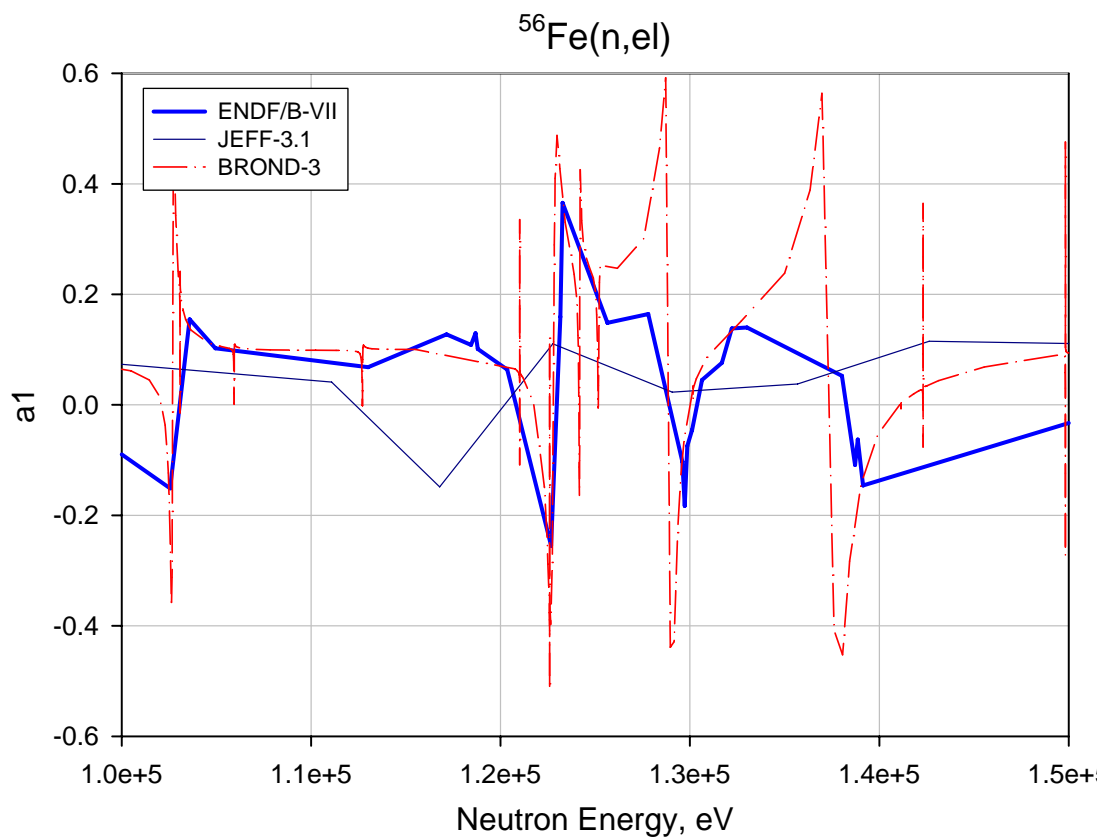


Рис. 16. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 100 – 150 кэВ.

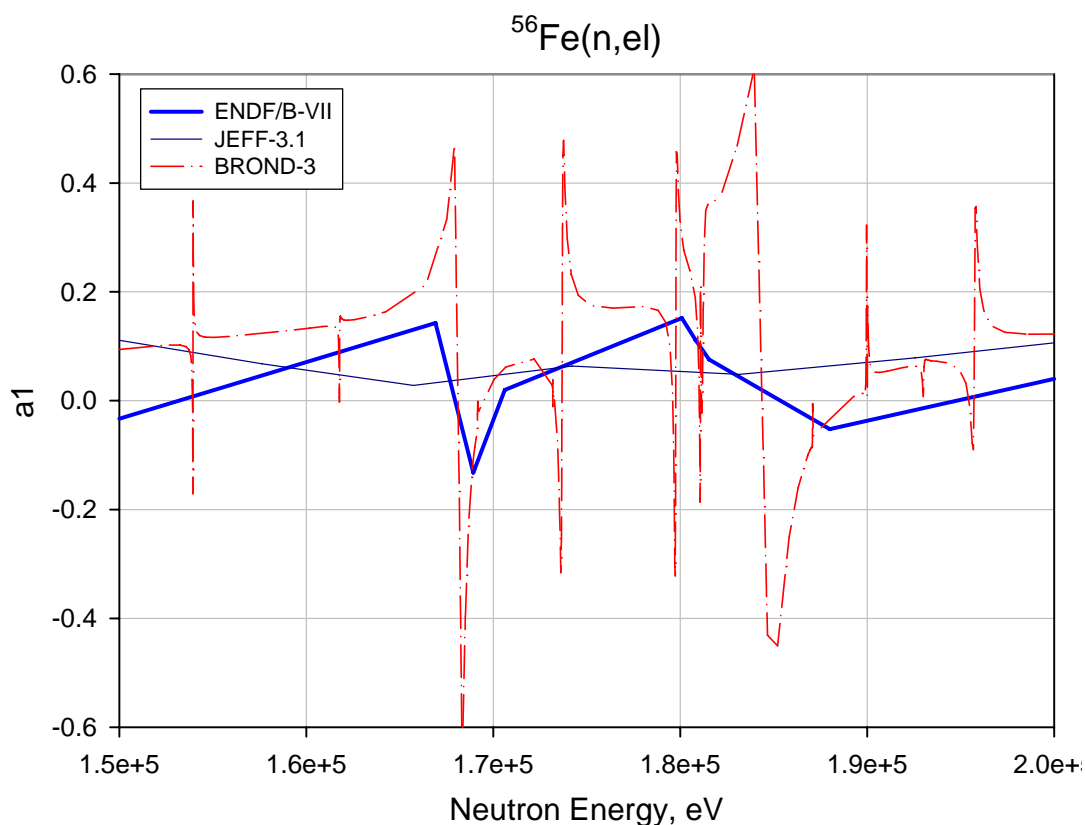


Рис. 17. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 150 – 200 кэВ.

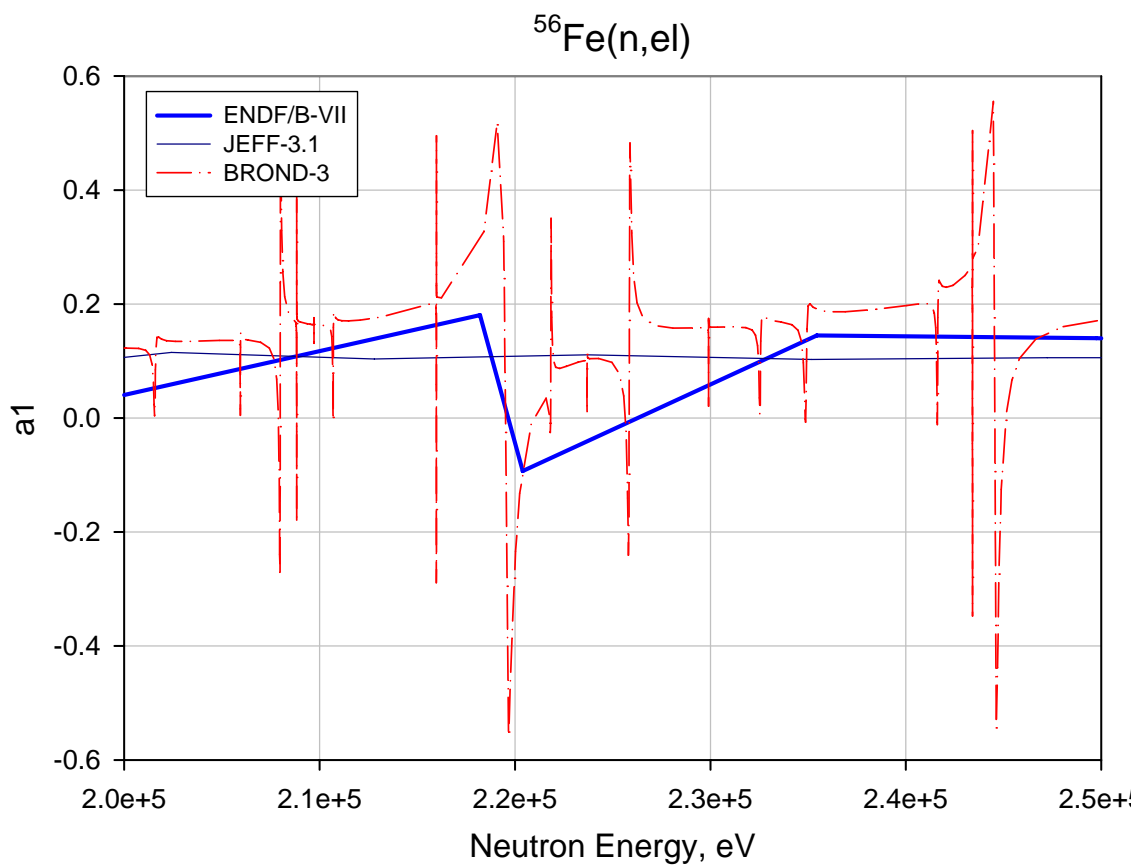


Рис. 18. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 200 – 250 кэВ.

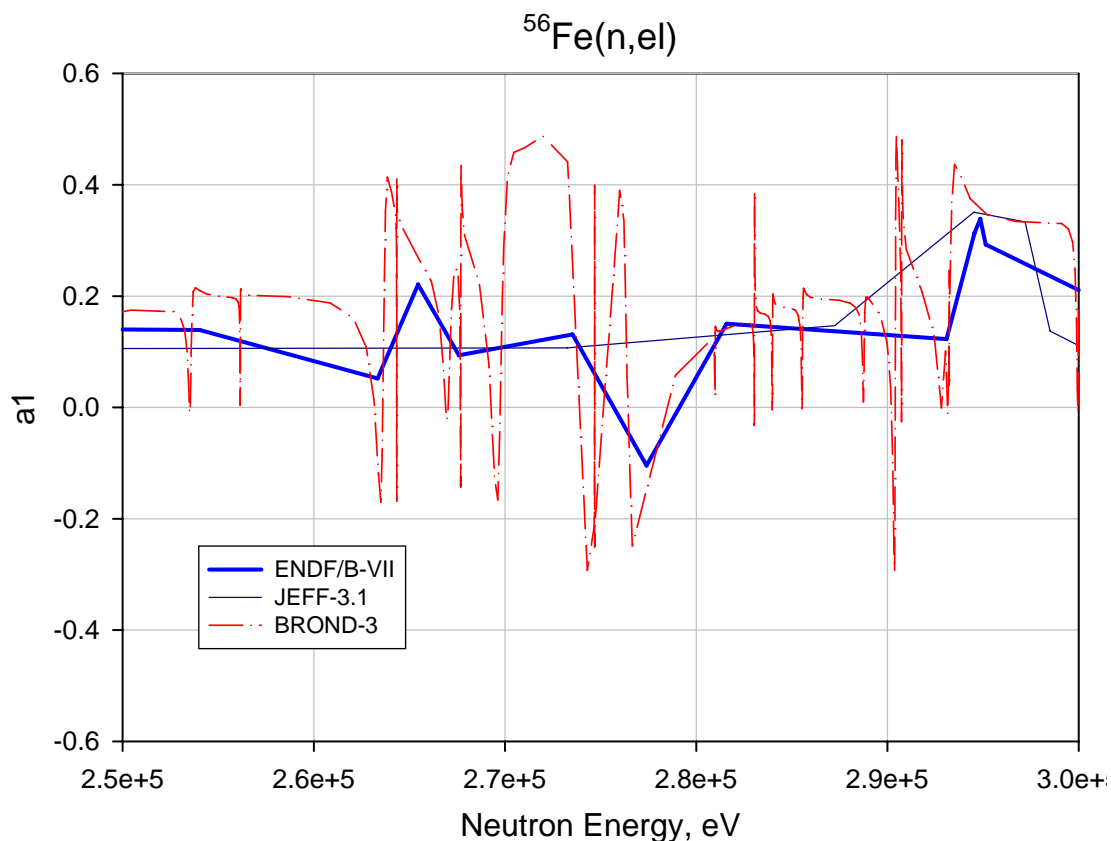


Рис. 19. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 250 – 300 кэВ.

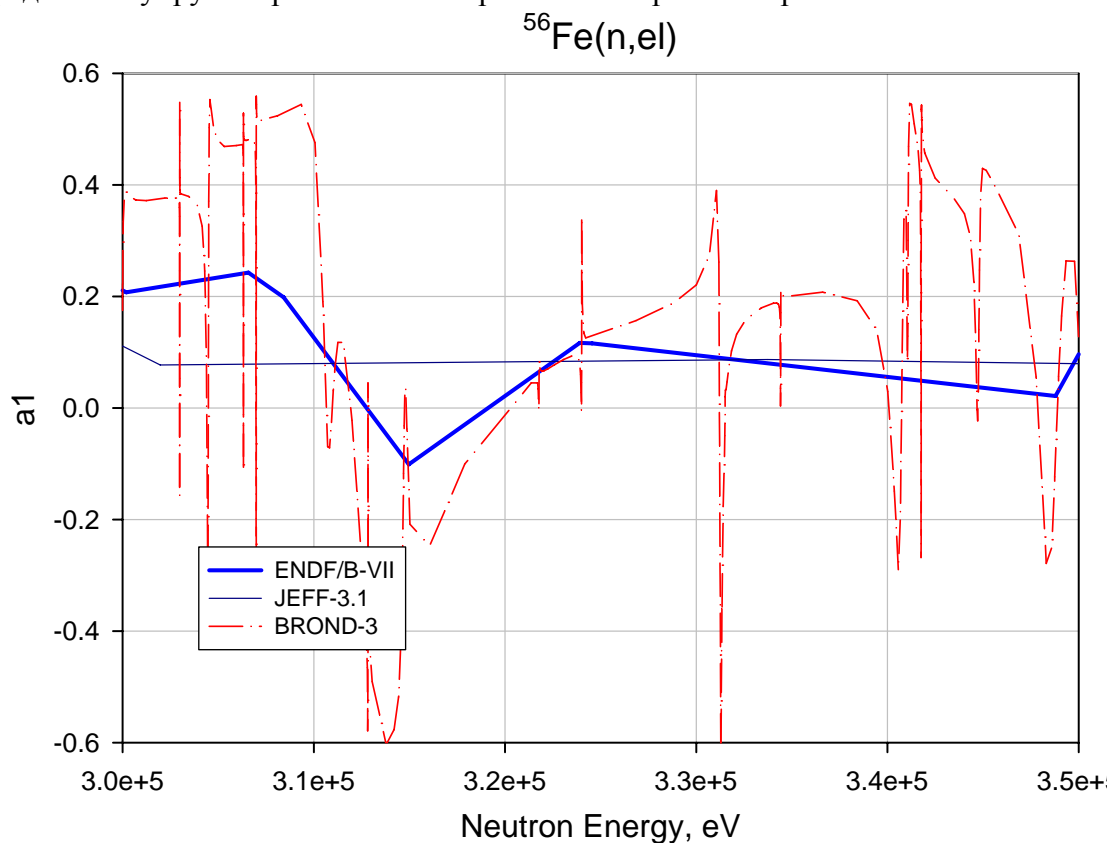


Рис. 20. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 300 – 350 кэВ.

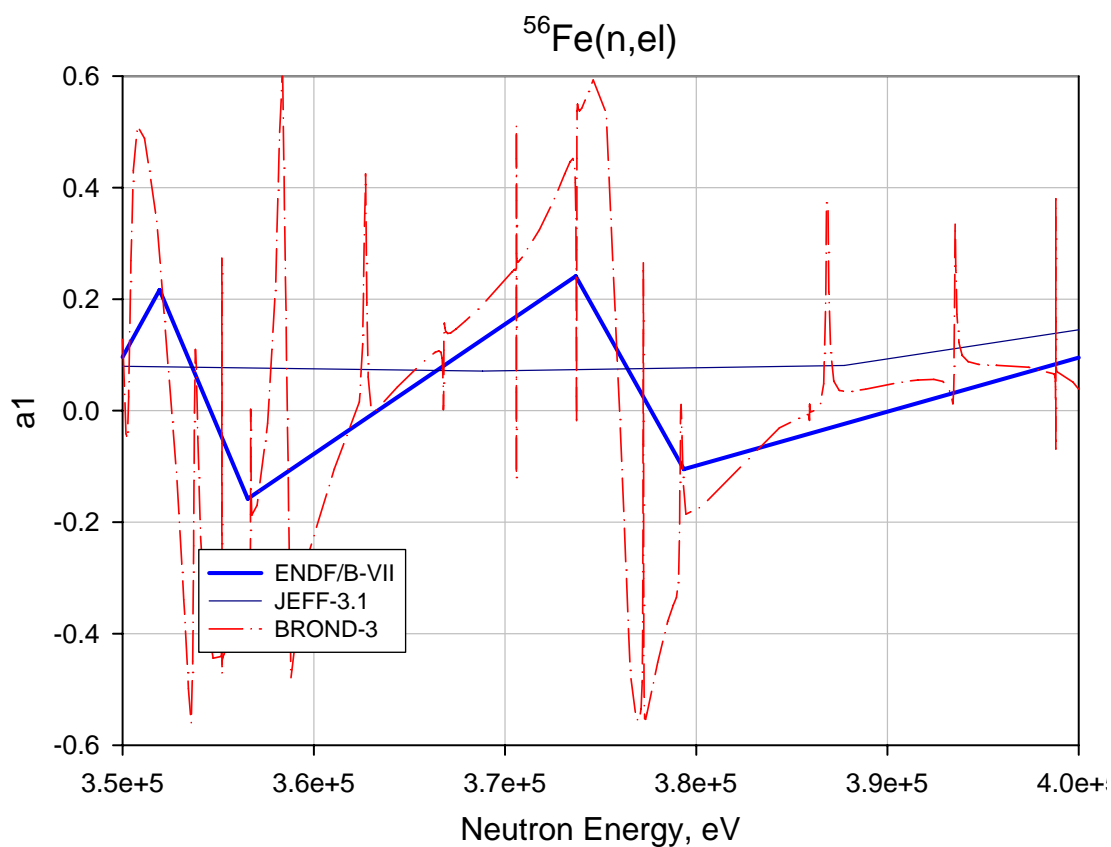


Рис. 21. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 350 – 400 кэВ.

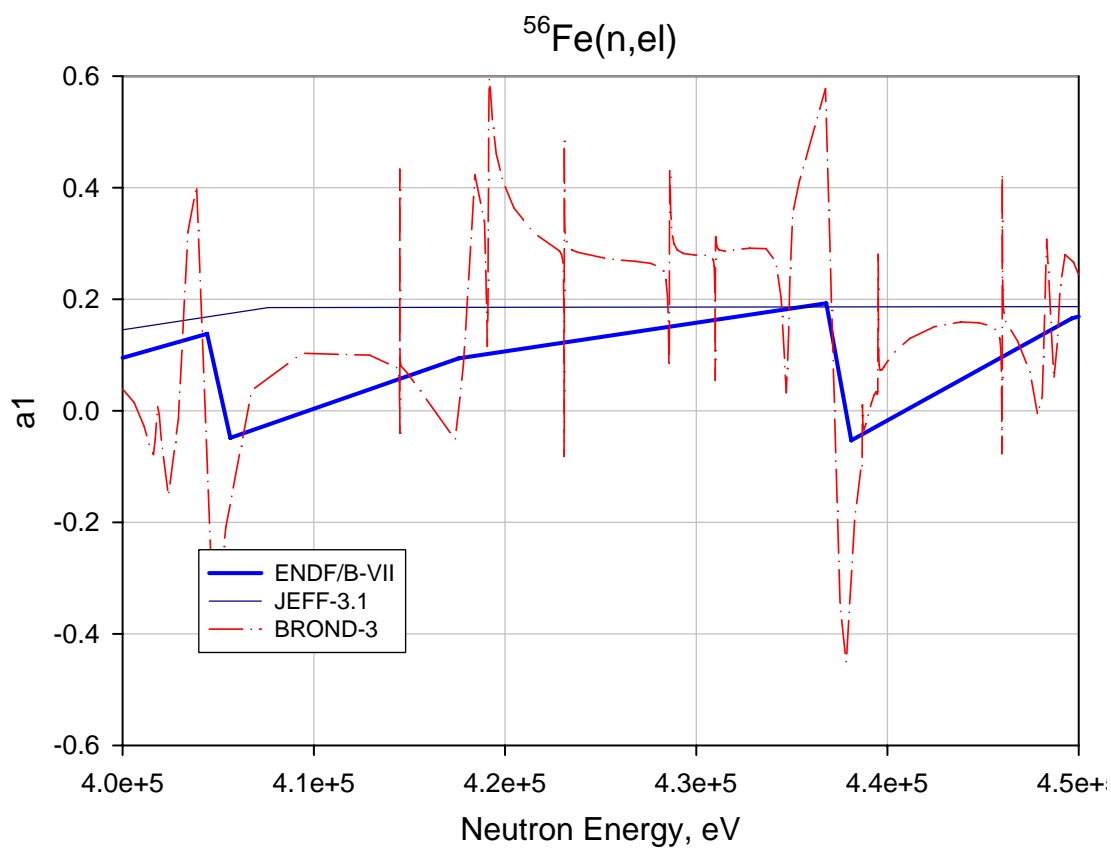


Рис. 22. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 400 – 450 кэВ.

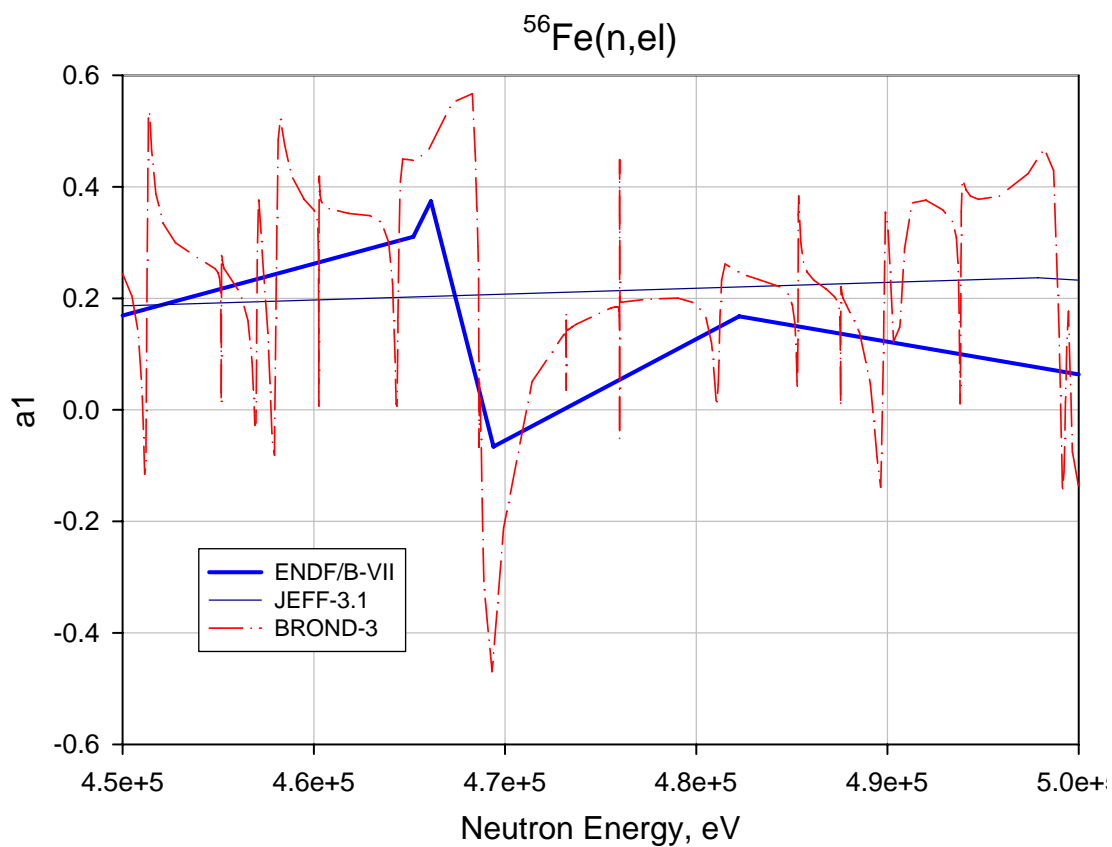


Рис. 23. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 450 – 500 кэВ.

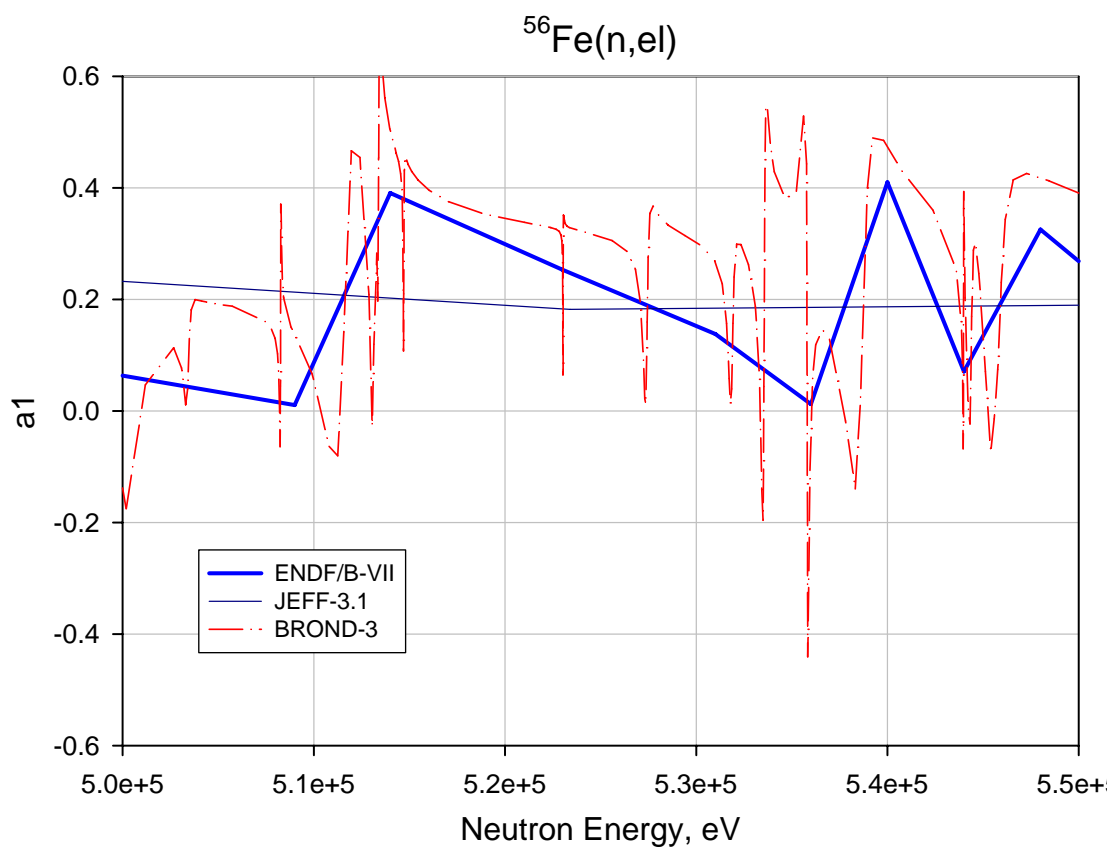


Рис. 24. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 500 – 550 кэВ.

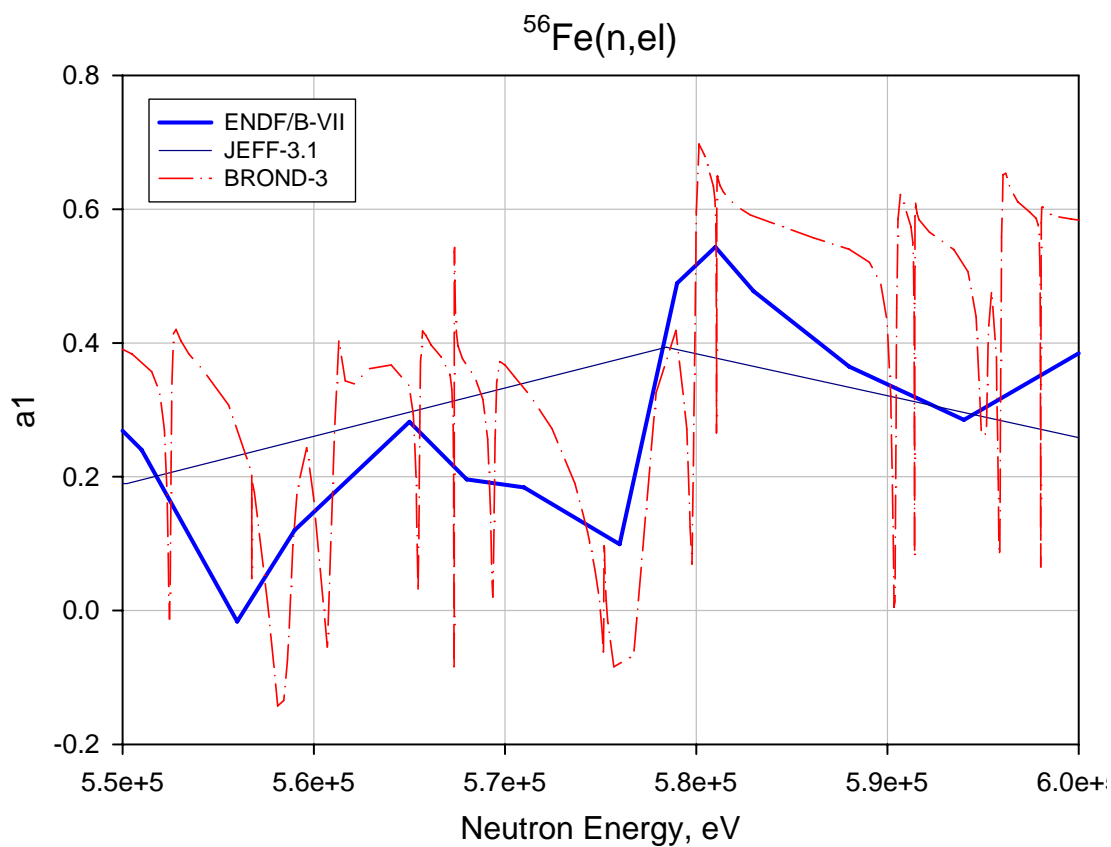


Рис. 25. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 550 – 600 кэВ.

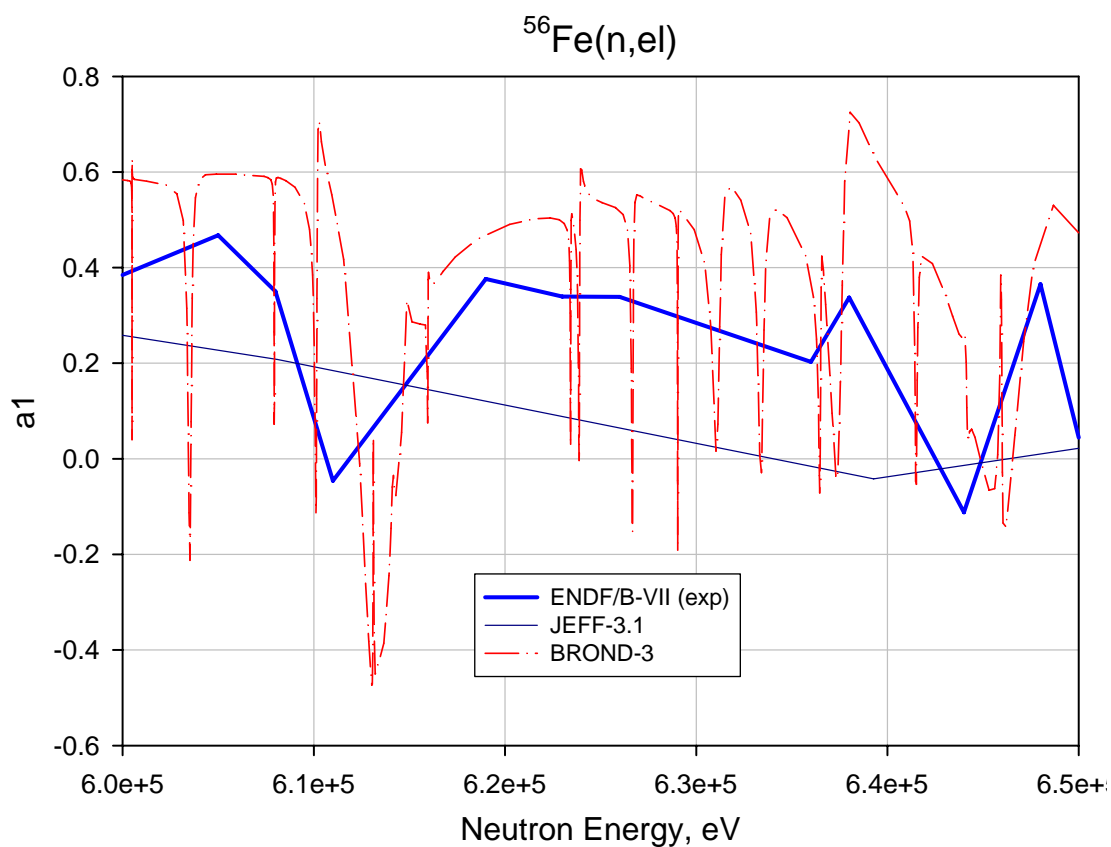


Рис. 26. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 600 – 650 кэВ.

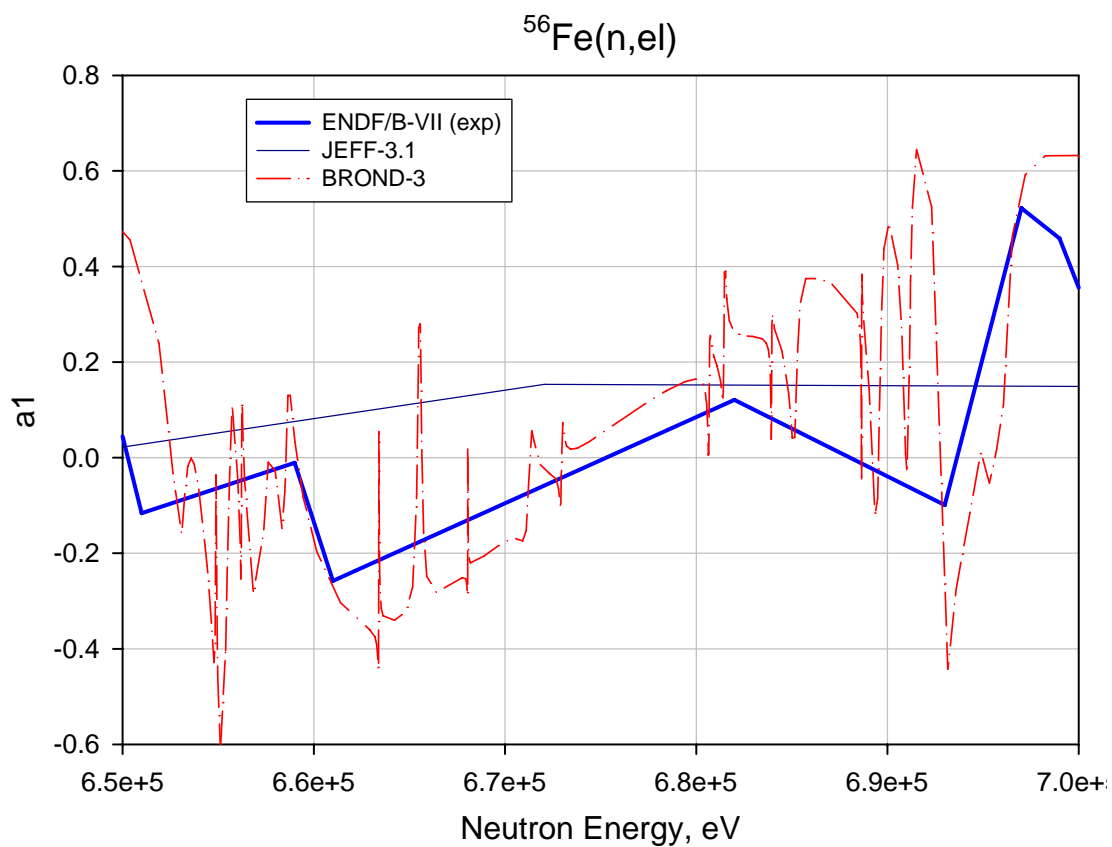


Рис. 27. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 650 – 700 кэВ.

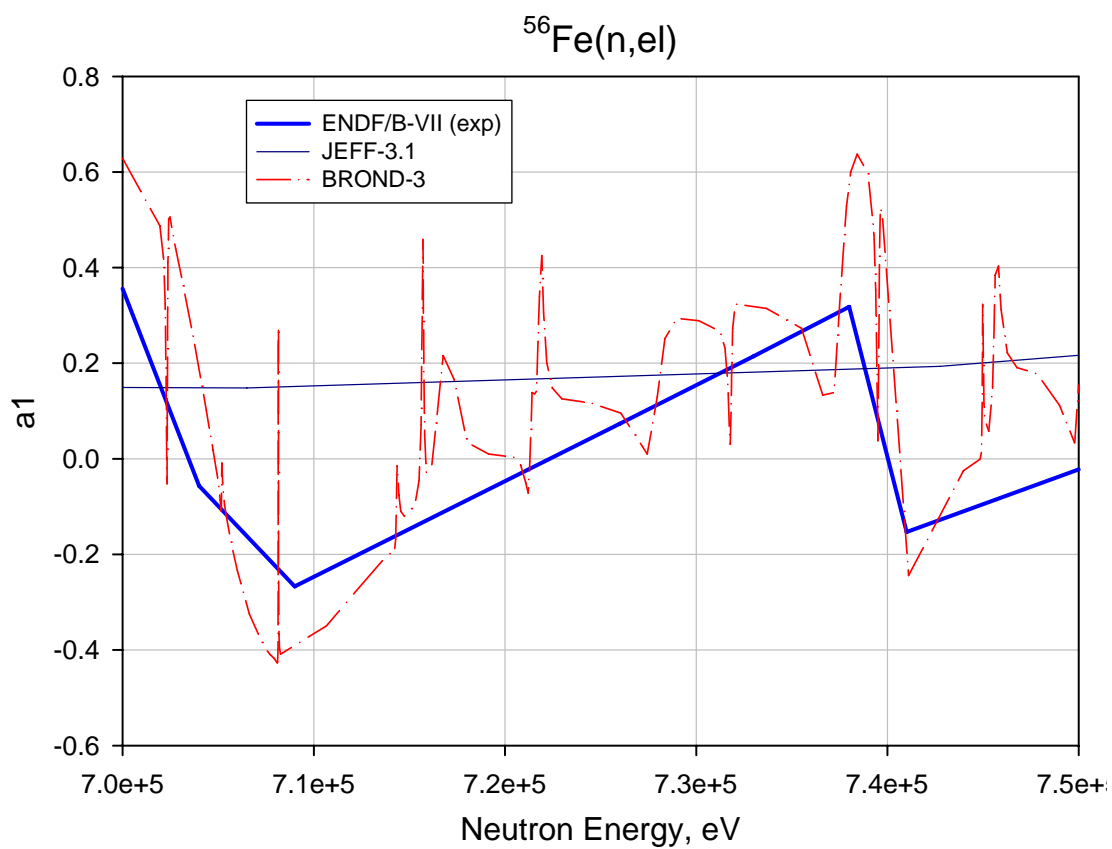


Рис. 28. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 700 – 750 кэВ.

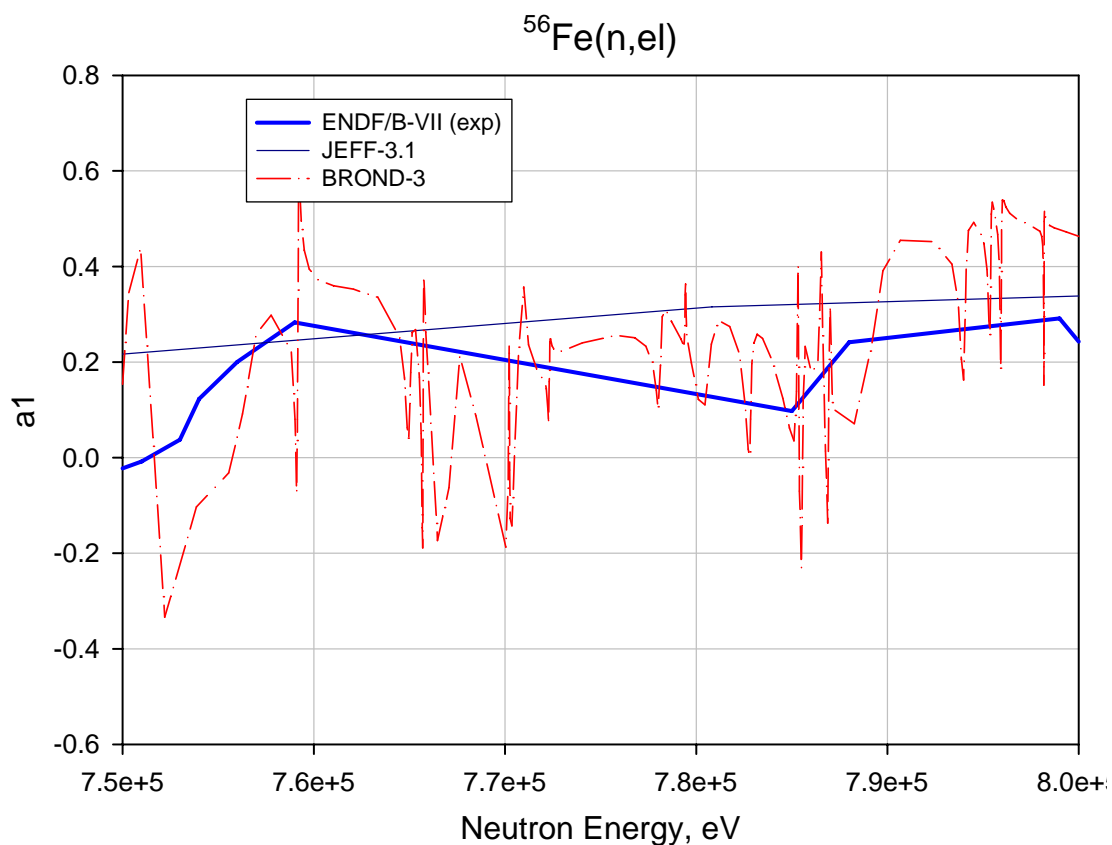


Рис. 29. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 750 – 800 кэВ.

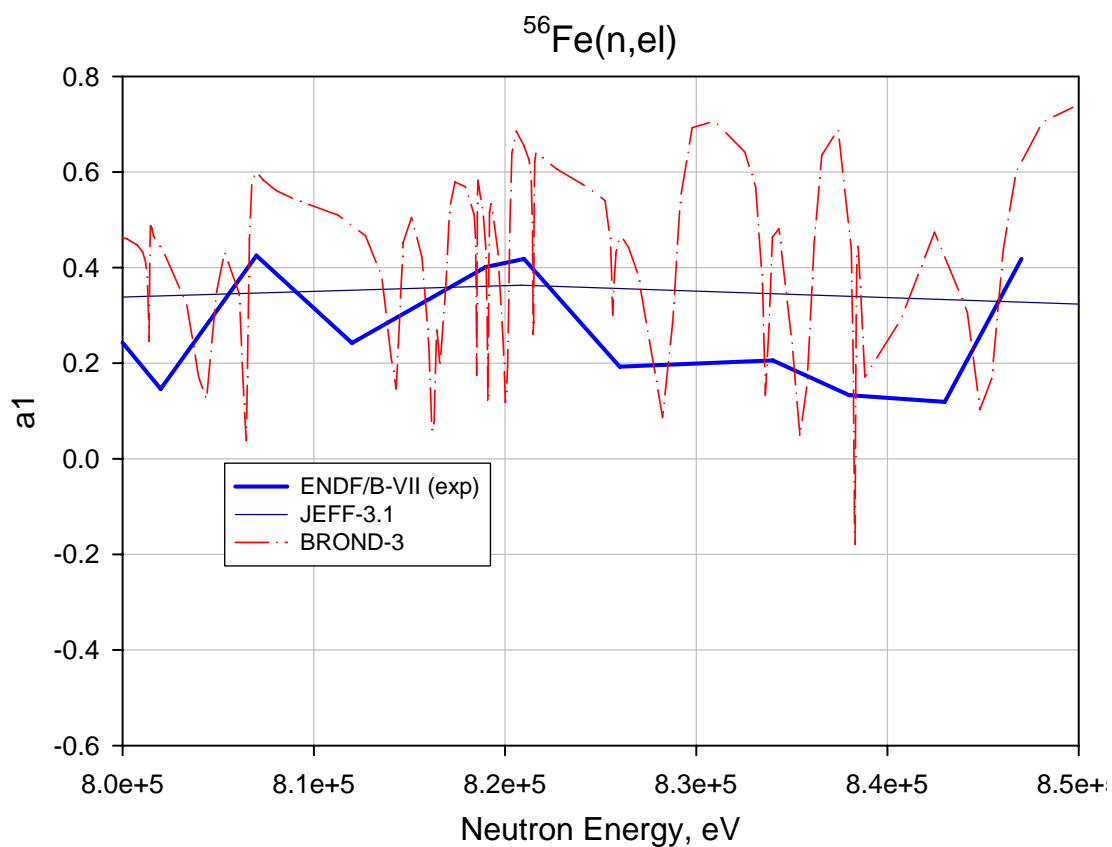


Рис. 30. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 800 – 850 кэВ.

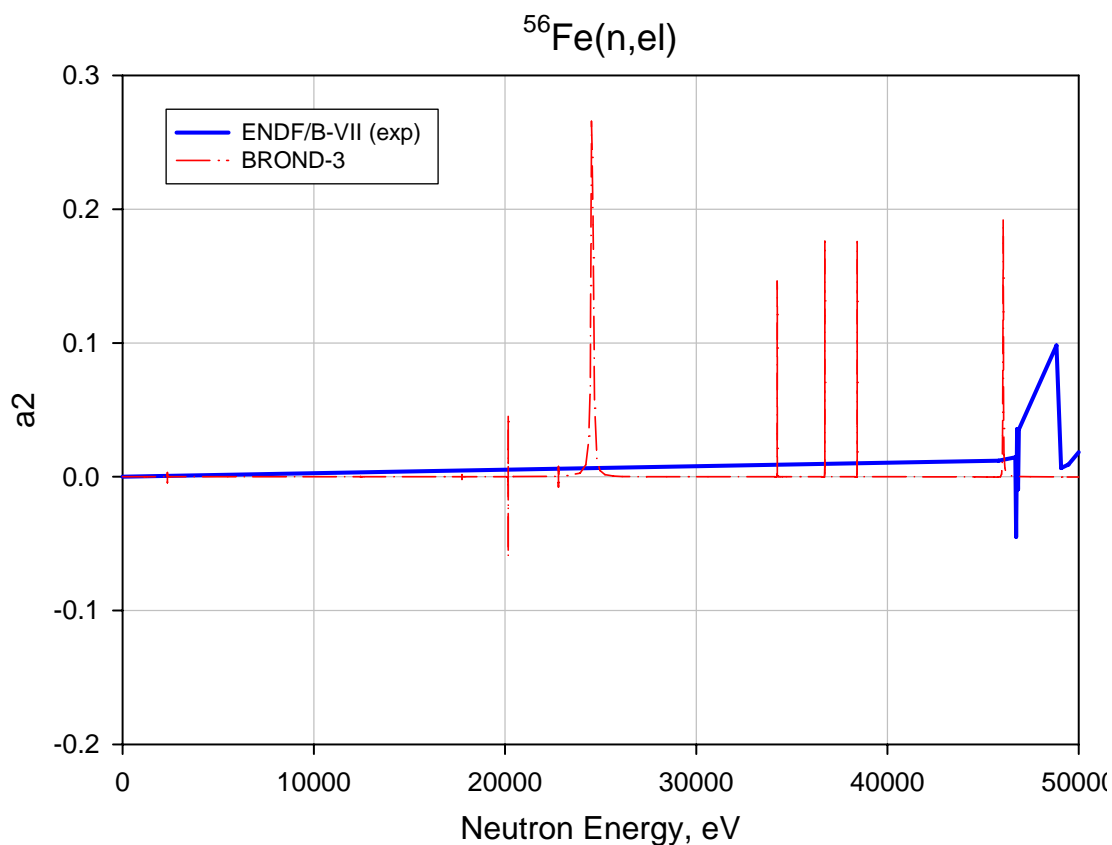


Рис. 31. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 0 – 50 кэВ.

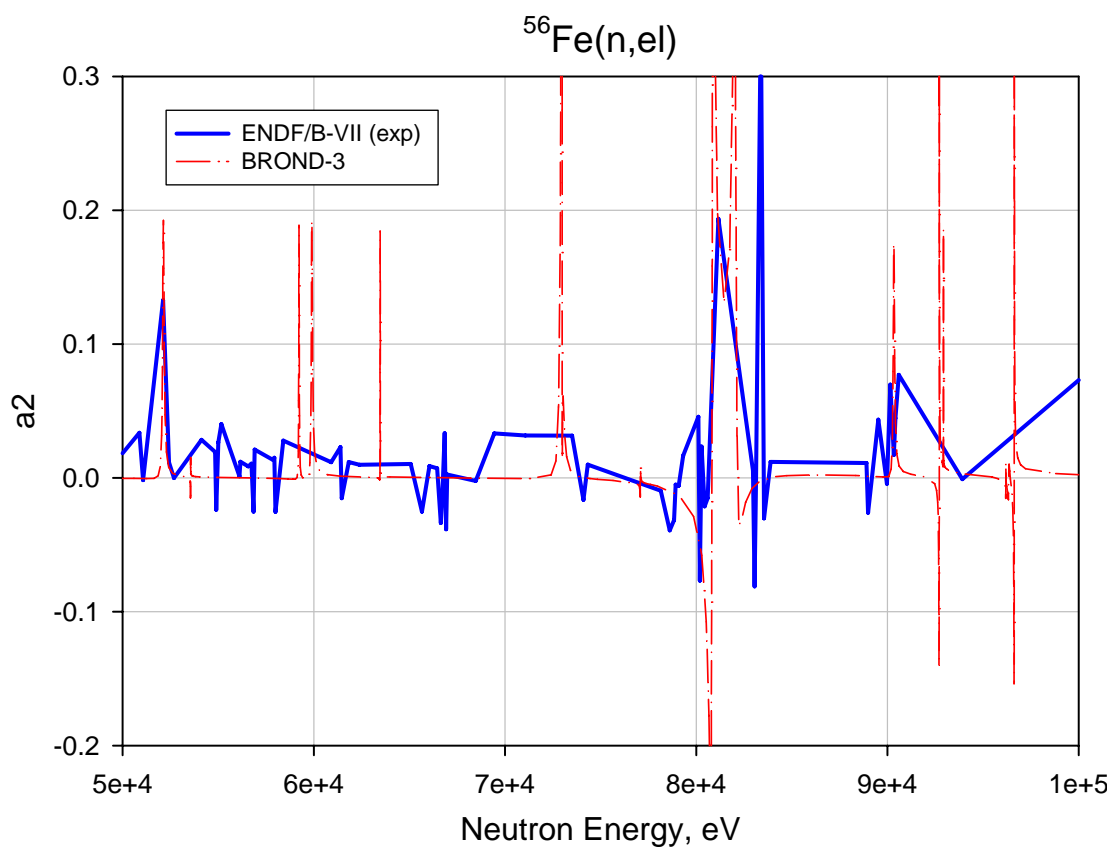


Рис. 32. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 50 – 100 кэВ.

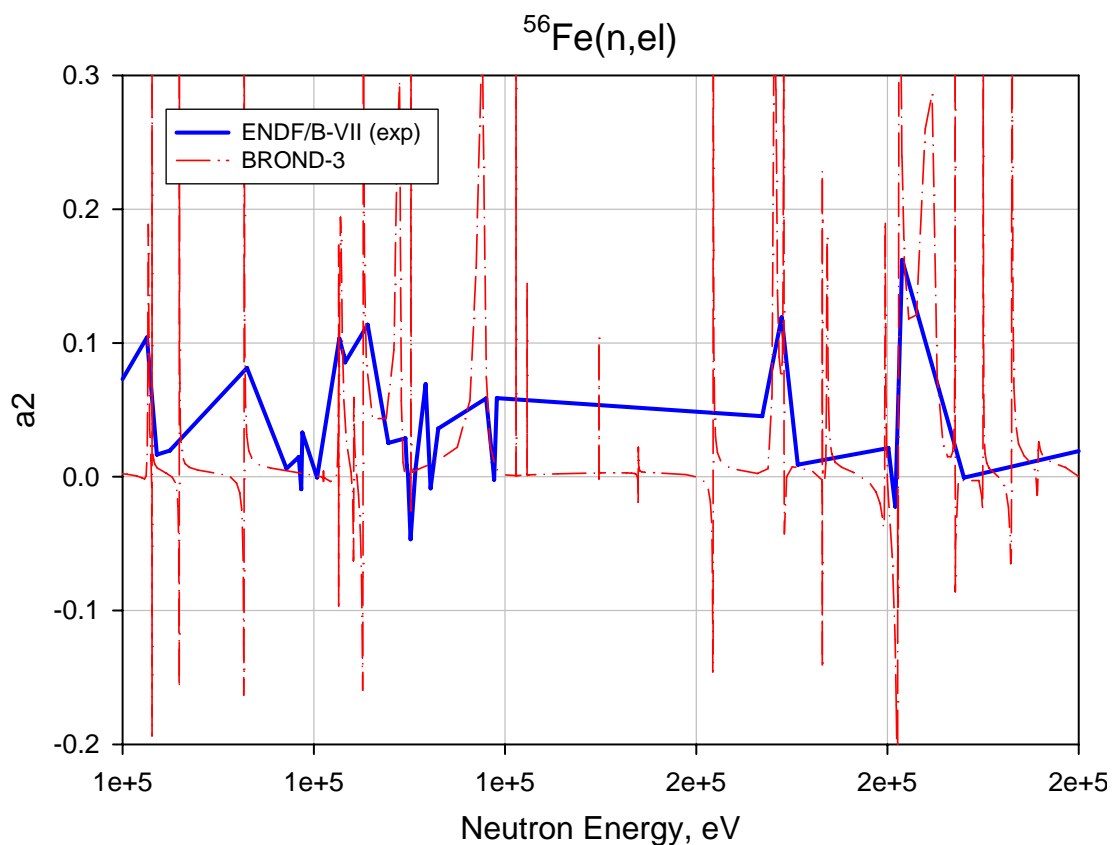


Рис. 33. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 100 – 200 кэВ.

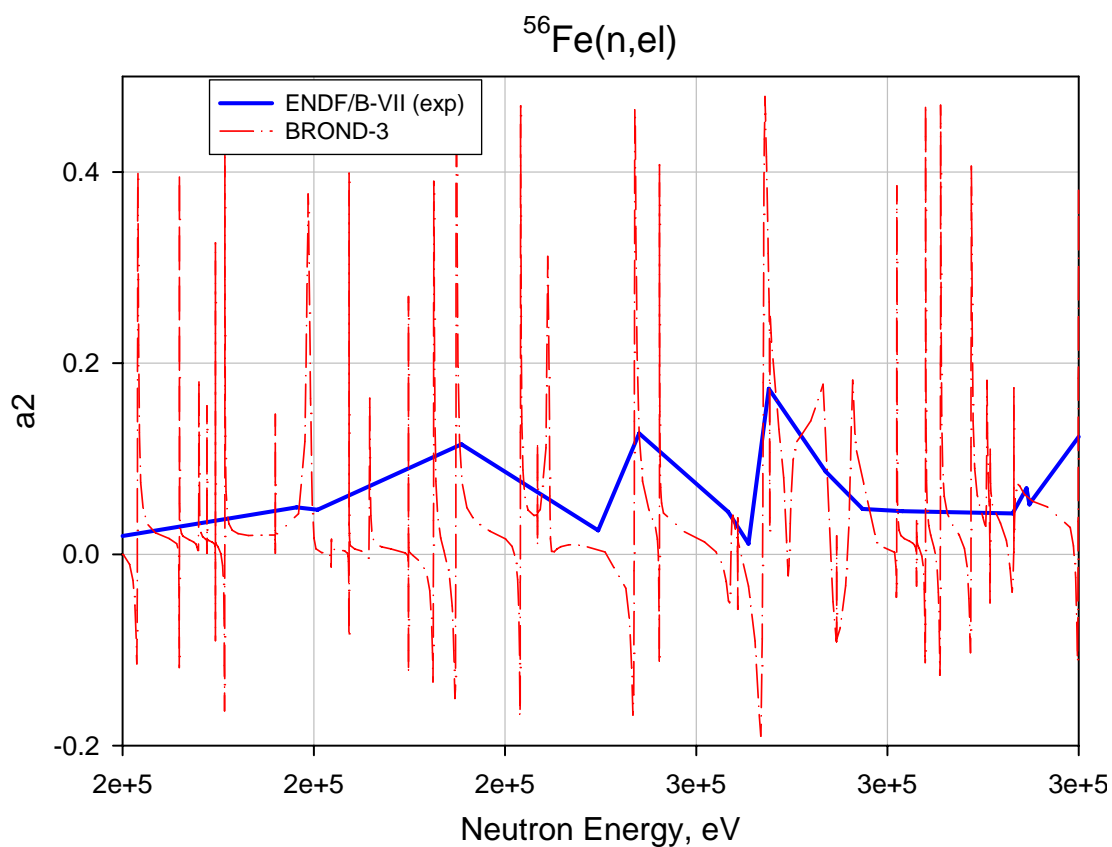


Рис. 34. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 200 – 300 кэВ.

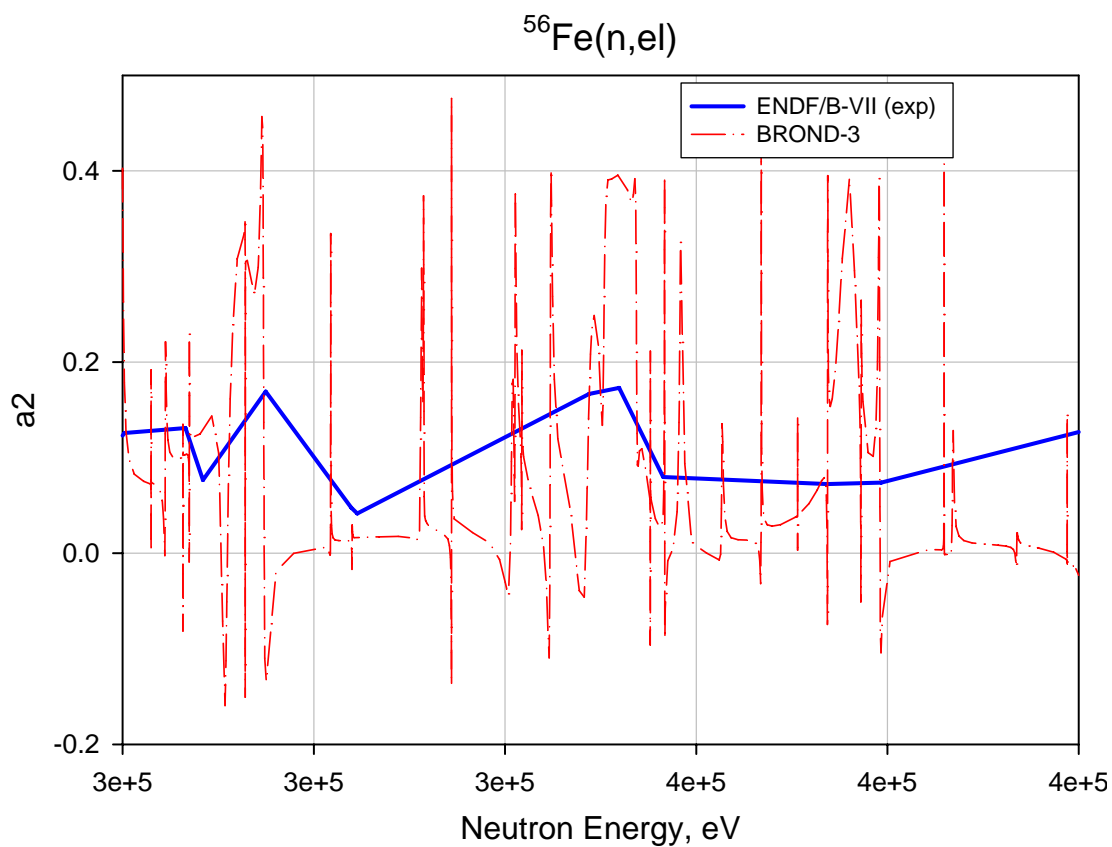


Рис. 35. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 300 – 400 кэВ.

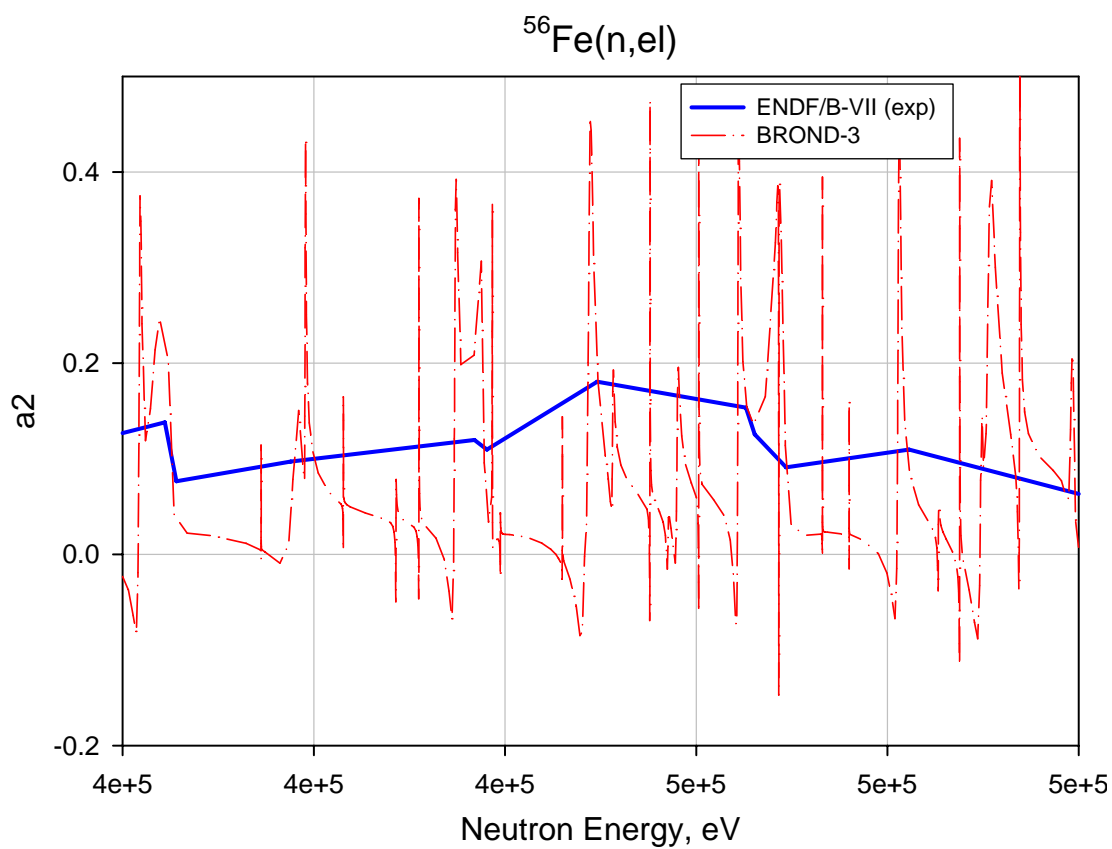


Рис. 36. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 400 – 500 кэВ.

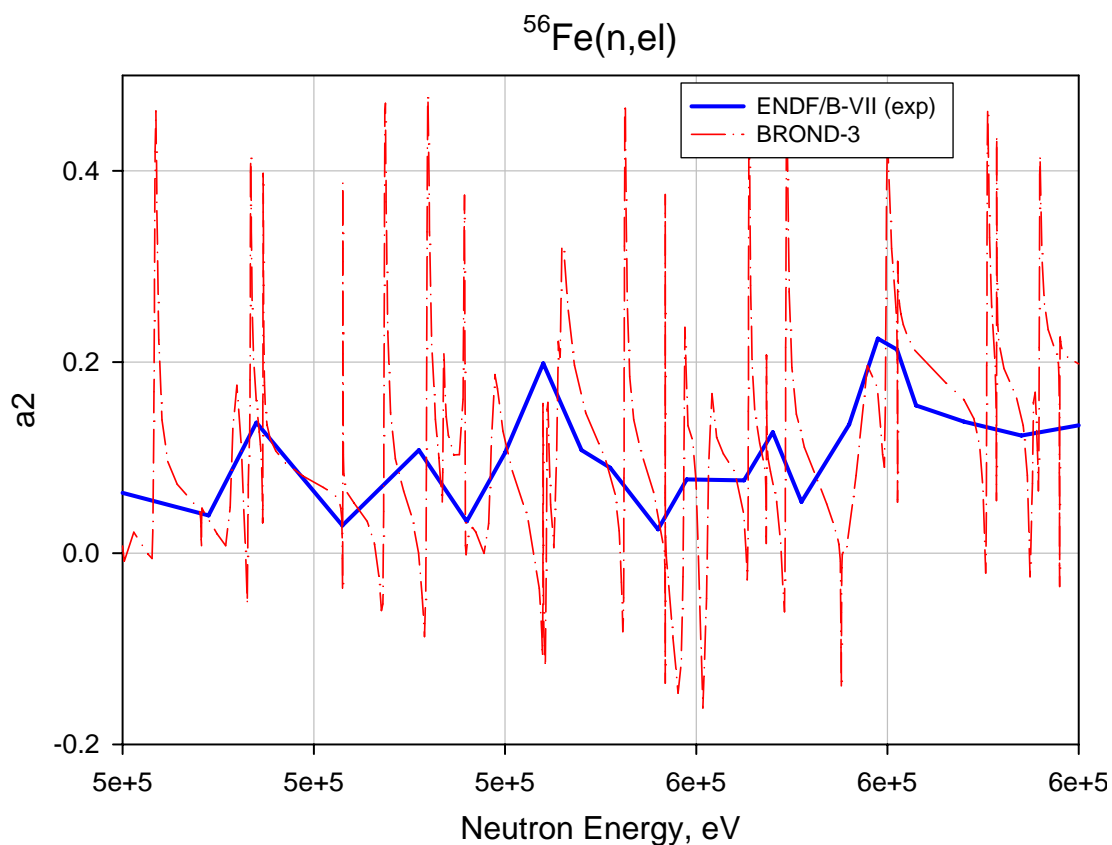


Рис. 37. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 500 – 600 кэВ.

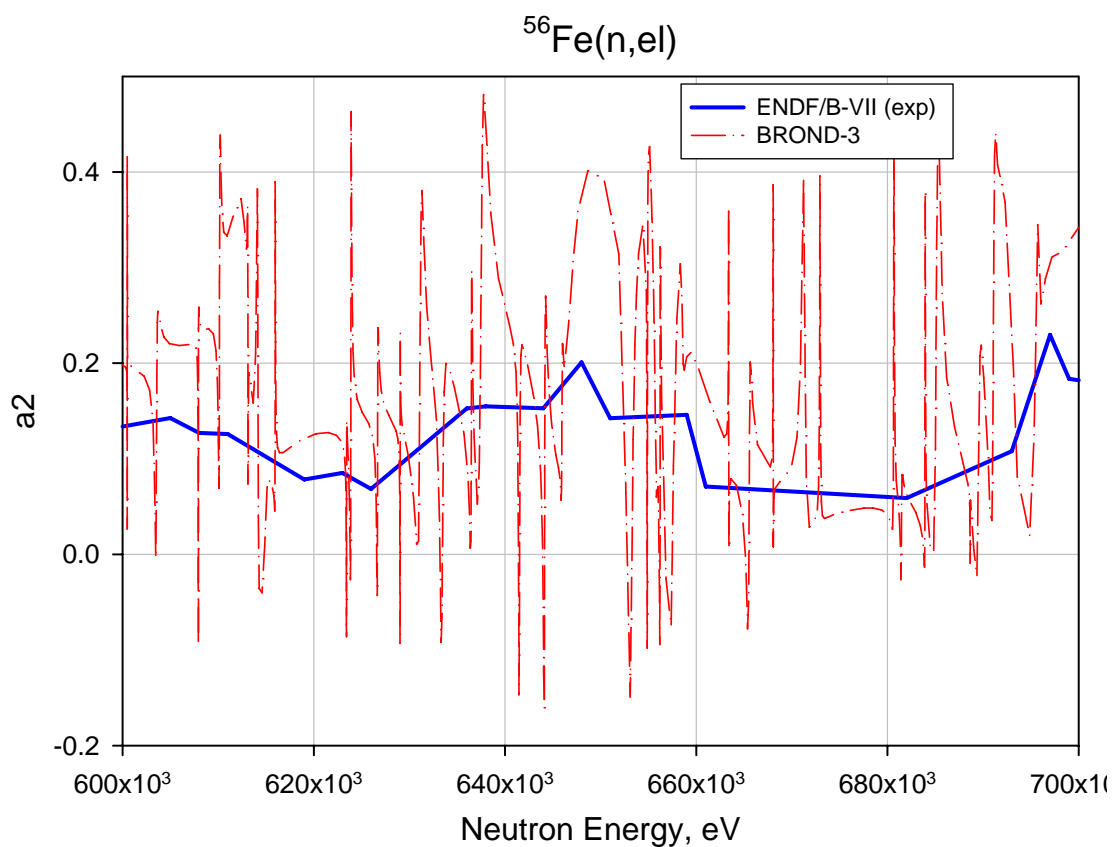


Рис. 38. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 600 – 700 кэВ.

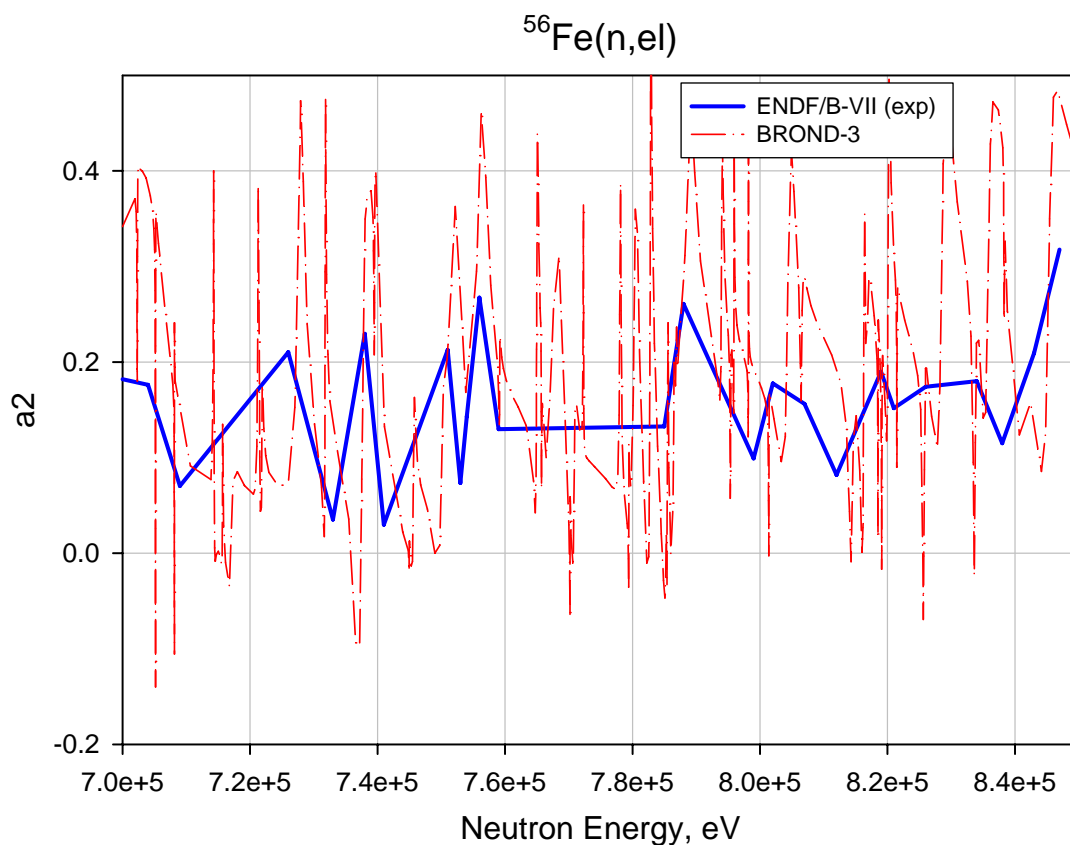


Рис. 39. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 700 – 850 кэВ.

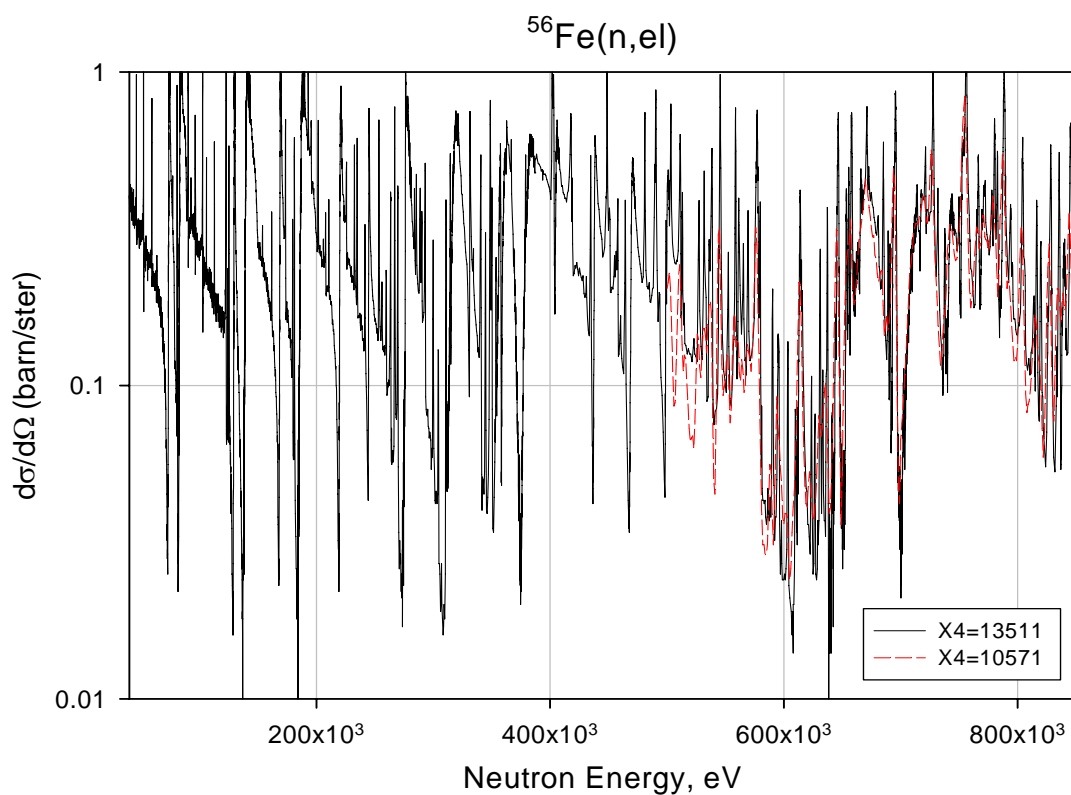


Рис. 40. Сечения упругого рассеяния на ^{56}Fe (X4=13511) и $^{\text{nat}}\text{Fe}$ (X4=10571) измеренные с высоким разрешением под углом 140 градусов в лабораторной системе.

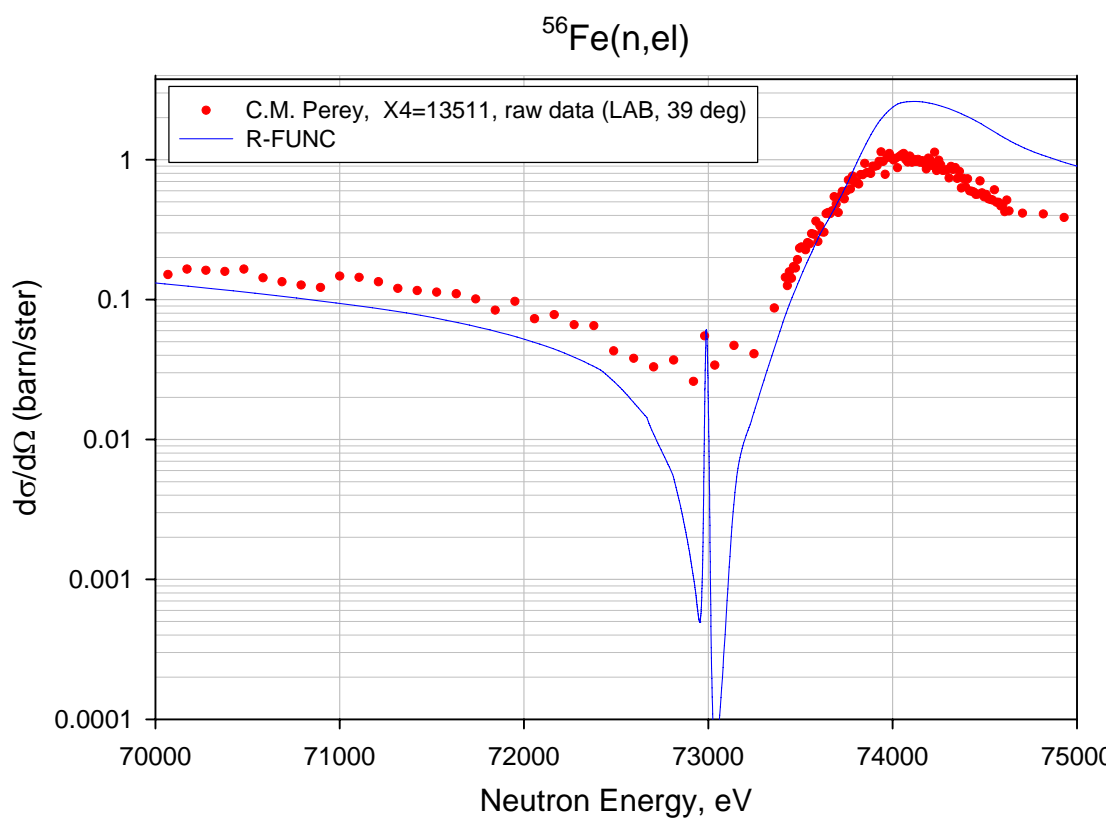


Рис. 41. Энергетическая зависимость сечения упругого рассеяния на ^{56}Fe (X4=13511) измеренного с высоким разрешением под углом 39 градусов в лабораторной системе в сравнении с вычисленной из R-матричных параметров (R-FUNC=BROND-3).

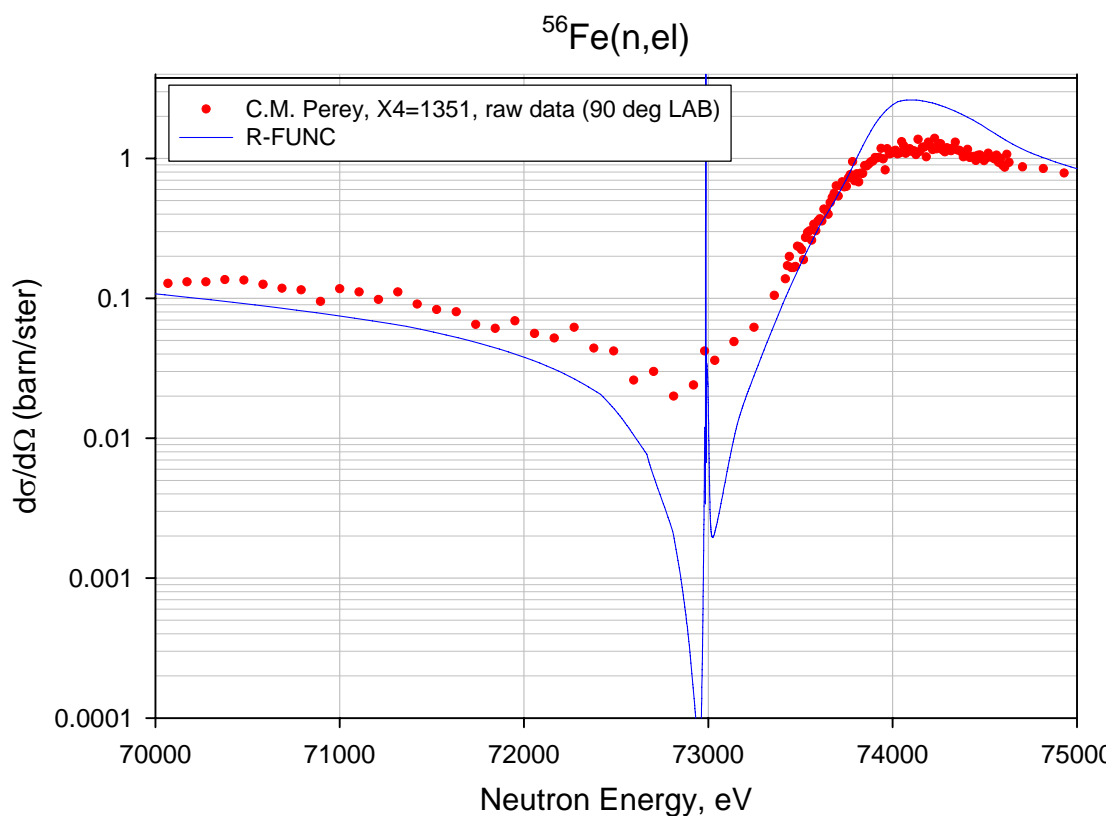


Рис. 42. Энергетическая зависимость сечения упругого рассеяния на ^{56}Fe (X4=13511) измеренного с высоким разрешением под углом 90 градусов в лабораторной системе в сравнении с вычисленной из R-матричных параметров (R-FUNC=BROND-3).

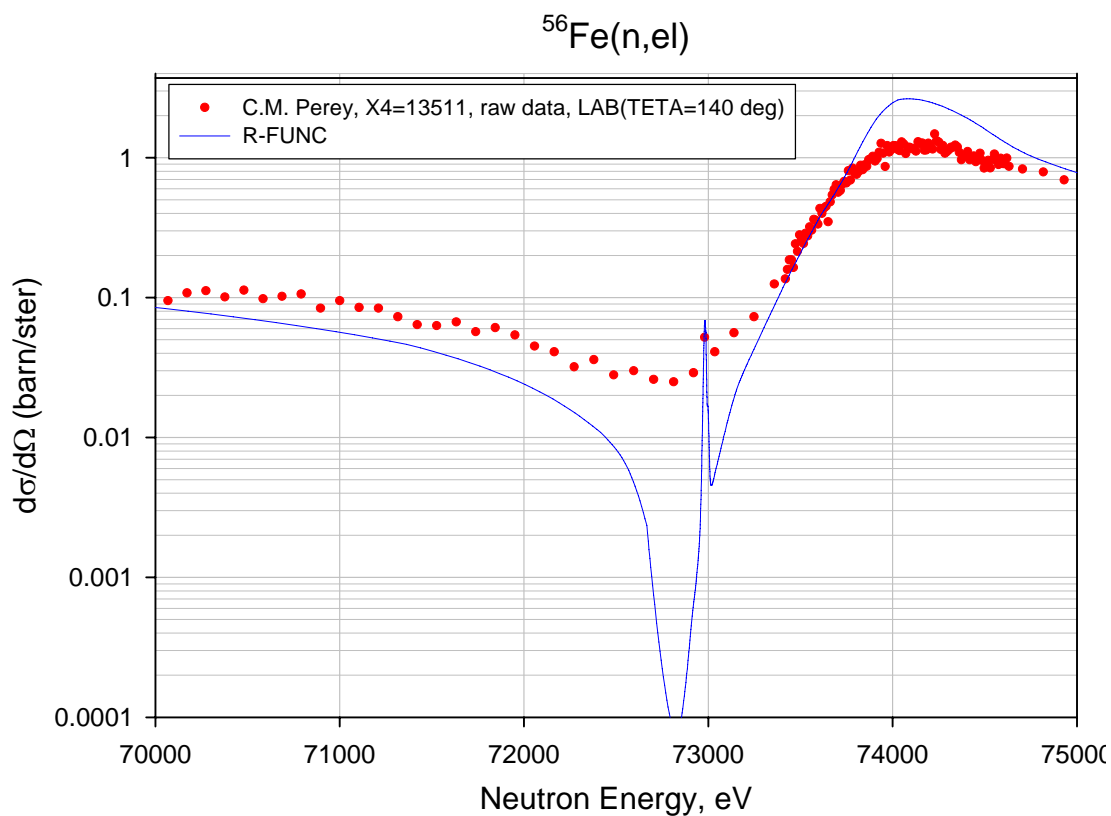


Рис. 43. Энергетическая зависимость сечения упругого рассеяния на ^{56}Fe (X4=13511) измеренного с высоким разрешением под углом 140 градусов в лабораторной системе в сравнении с вычисленной из R-матричных параметров (R-FUNC=BROND-3).

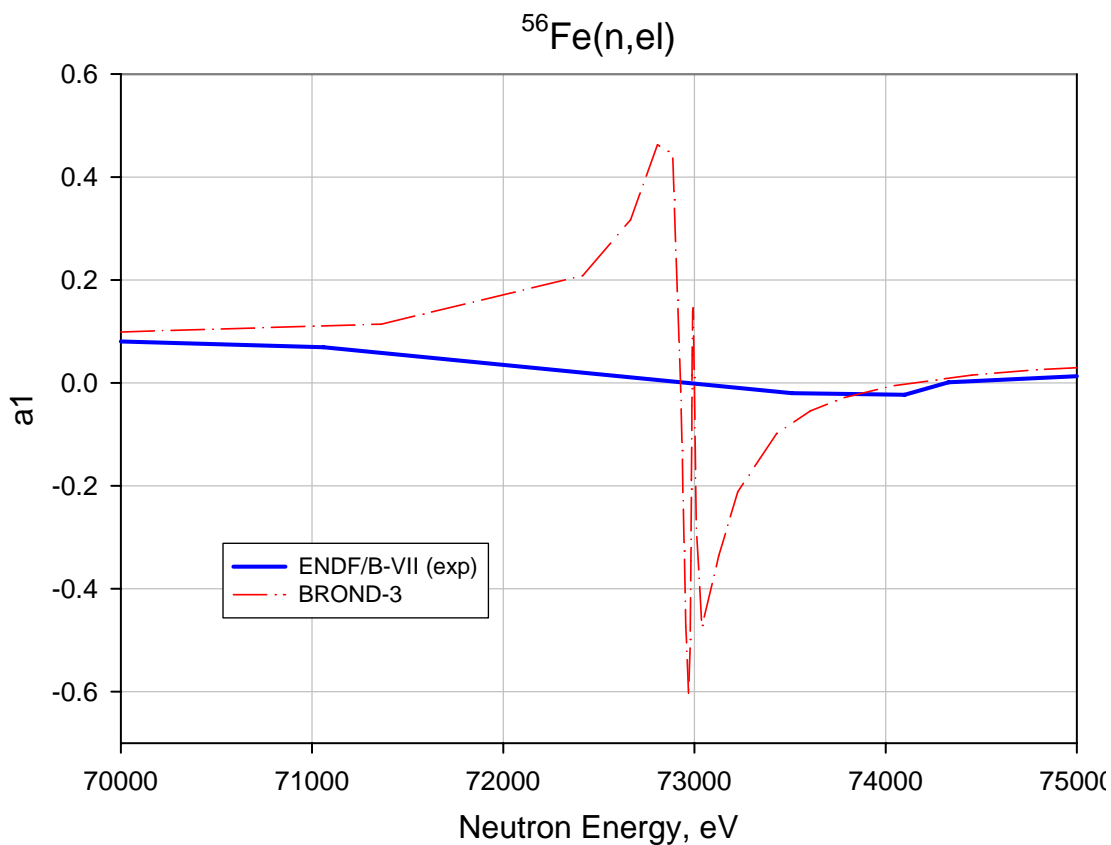


Рис. 44. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 70 – 75 кэВ.

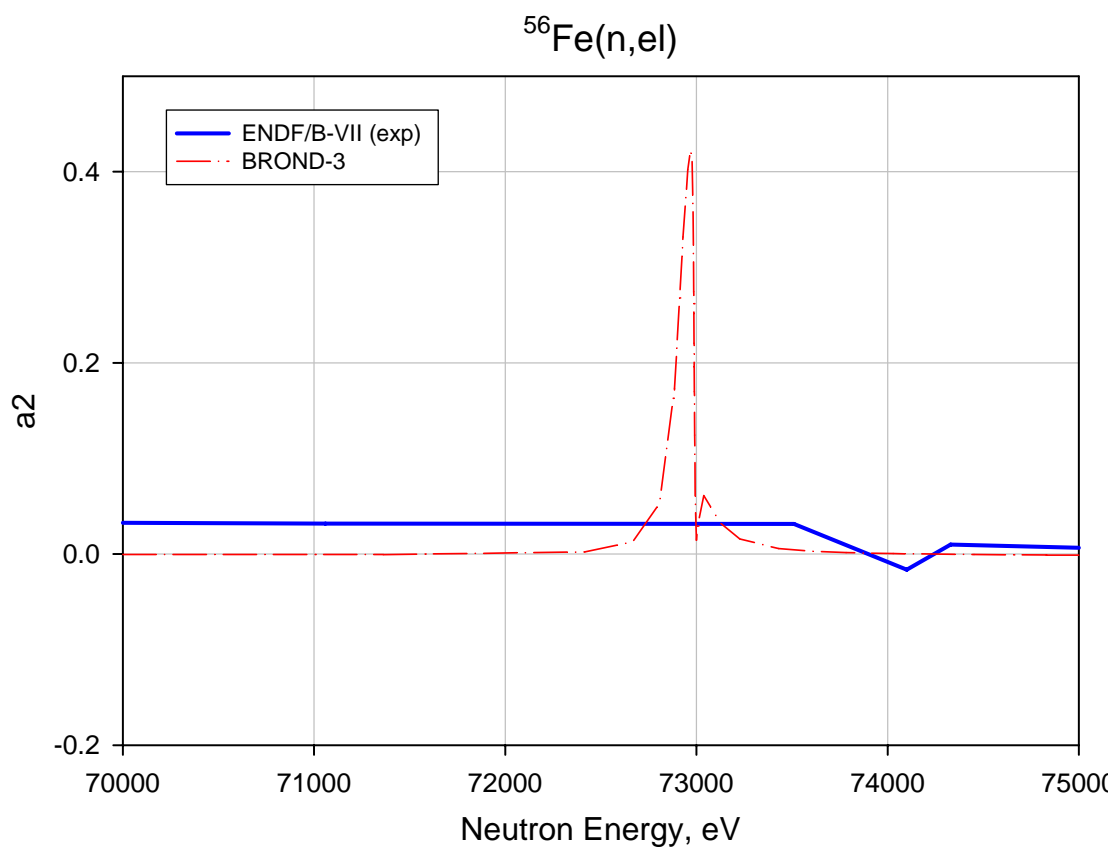


Рис. 45. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 70 – 75 кэВ.

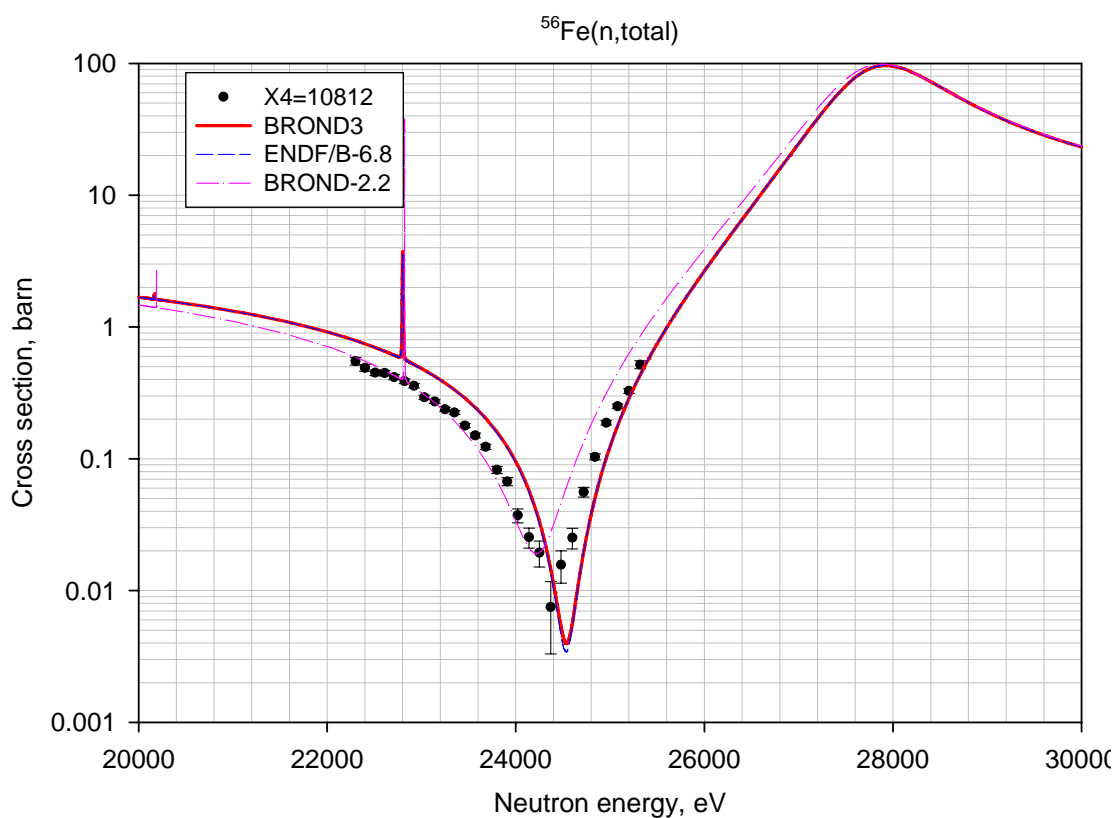


Рис. 46. Полное сечение вблизи интерференционного минимума при 26 кэВ резонансе.

6. Энерго-угловые распределения продуктов реакций

Для сравнения энергетических распределений вторичных частиц на рисунках 47 – 50 представлены полные энергосвечения через вторичные нейтроны и гамма-кванты в различных библиотеках для основных нейтронно- и гамма-производящих каналов (n,n') континуум – MT=91 и ($n,2n$) в зависимости от энергии падающих нейтронов. В целом, можно отметить хорошее согласие между различными библиотеками, в особенности между BROND-3 и ENDF/B-VI.8, где оценки хотя и выполнены независимо, но с использованием одной и той же программы TNG.

Угловые распределения вторичных частиц для области непрерывного спектра во всех библиотеках параметризовались в приближении Калбаха-Манна, а для дискретных уровней неупругого рассеяния коллективной природы – оценивались вклады прямых реакций и компаундного механизма. Полное число дискретных уровней и число уровней коллективной природы учтённых в библиотеках: BROND-3 – 32 (12), ENDF/B-VI.8 – 25 (2), JEFF-3.1 – 32 (11) и JENDL-3.3 – 27 (5).

В библиотеке ENDF/B-VI заданы спектры ядер отдачи, в библиотеке JEFF-3.1 их средние энергии существенно занижены, а в других библиотеках средние энергии ядер отдачи могут быть получены как разность между полной выделяемой энергией и средними энергиями других частиц.

Вывод: Энерго-угловые распределения вторичных частиц в различных библиотеках отличаются незначительно.

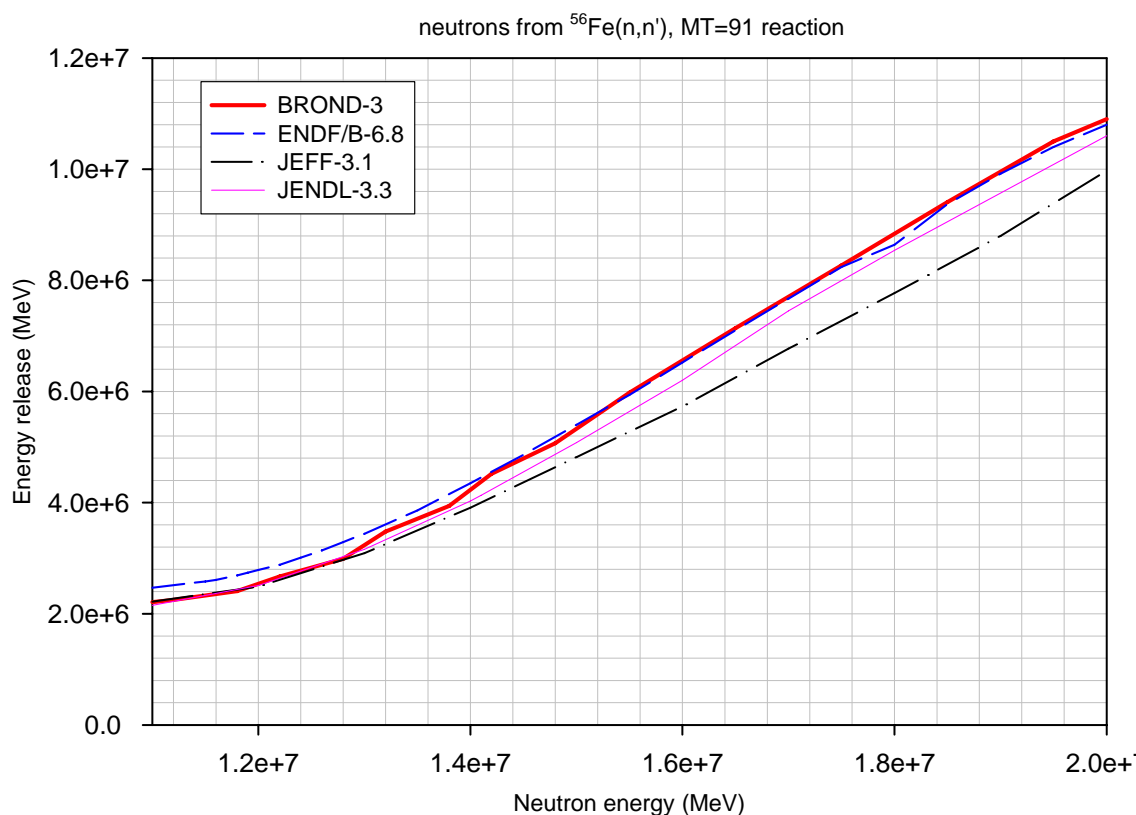


Рис. 47. Энергосвечение (произведение средней энергии по спектру на множественность) за счет вторичных нейтронов в реакции неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней в различных библиотеках.

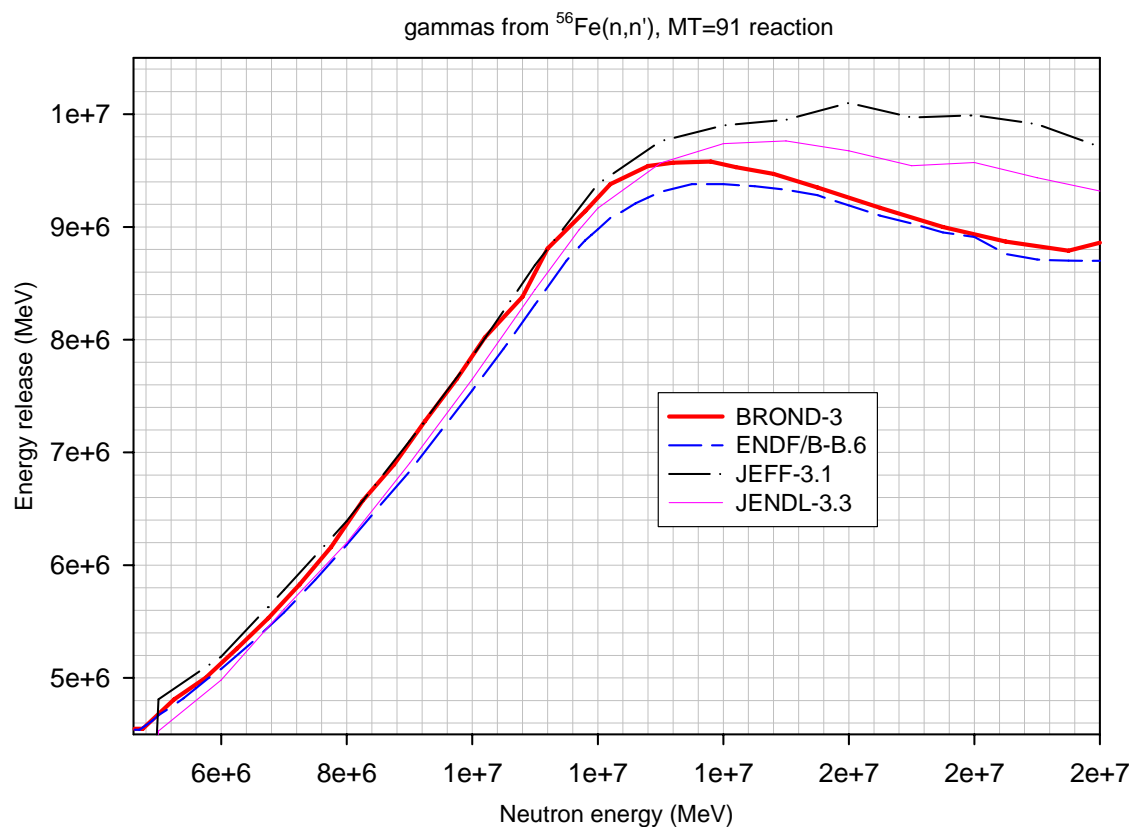


Рис. 48. Энерговыведение (произведение средней энергии по спектру на множественность) за счет вторичных гамма-квантов в реакции неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней в различных библиотеках.

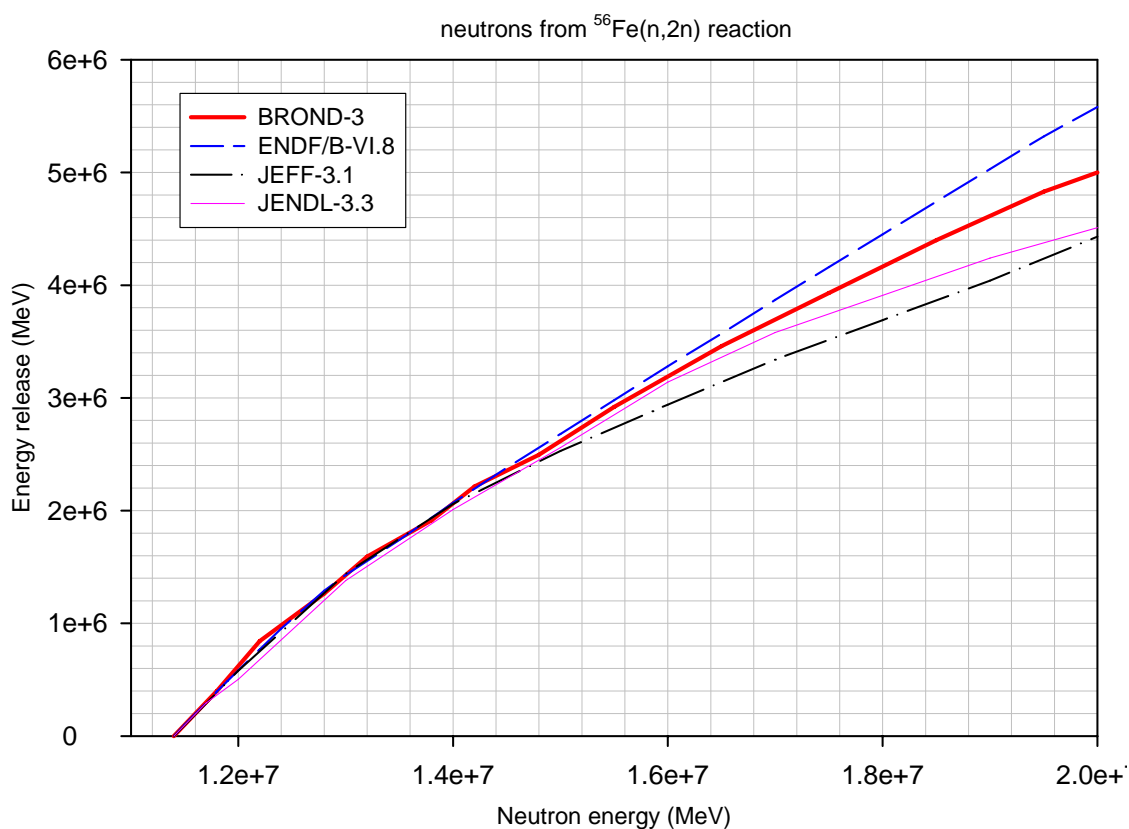


Рис. 49. Энерговыведение (произведение средней энергии по спектру на множественность) за счет вторичных нейтронов в реакции $(n,2n)$ в различных библиотеках.

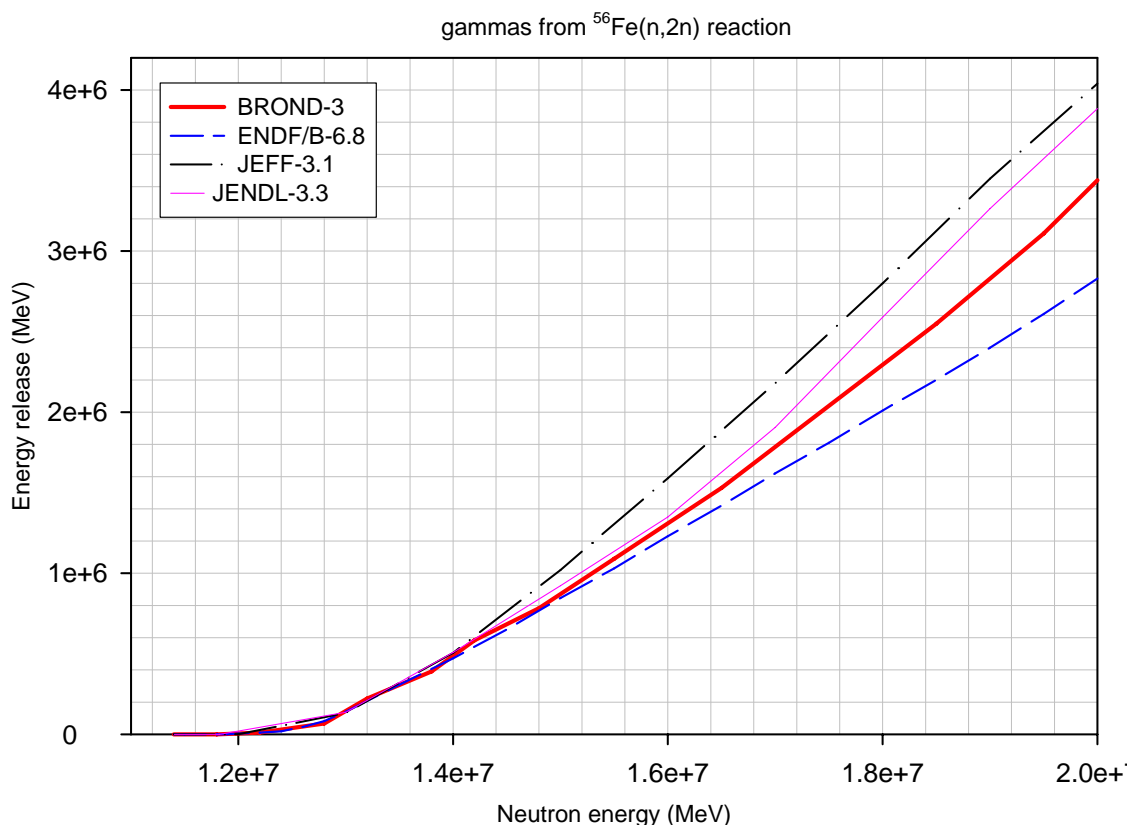


Рис. 50. Энерговыведение (произведение средней энергии по спектру на множественность) за счет вторичных гамма-квантов в реакции (n,2n) в различных библиотеках.

7. Ковариационные матрицы погрешностей

Ковариационные матрицы погрешностей для всех сечений (MF=33, MT=1 – 853) получены в BROND-3 описанием методом наименьших квадратов [1, 2] всех доступных экспериментальных данных в Байесовском подходе с результатами модельных расчётов, взятыми в качестве априорных данных. Приведены ковариационные матрицы и для угловых распределений упругого рассеяния (MF=34, MT=2) оцененные из имеющихся экспериментальных данных.

Те же данные лежат и в основе оценки JEFF-3.1 за исключением матриц для MT=54 – 82 опущенных по неизвестной причине.

В библиотеке ENDF/B-VI.8 приведена грубая экспертная оценка ковариационных матриц.

В библиотеке JENDL-3.3 ковариационные матрицы ошибок были оценены или из описания экспериментальных данных методом наименьших квадратов или с помощью модельного описания экспериментальных данных (программа KALMAN).

Вывод: Погрешности JENDL-3.3 в целом сравнимы с погрешностями BROND-3 (JEFF-3.1). Погрешности ENDF/B-VI.8 представлены весьма грубой оценкой.

8. Валидация оценённых данных в интегральных и критических экспериментах

8.1. Сечение увода нейтронов спектра деления ^{235}U естественным железом под порог деления ^{238}U

Как видно из Таблицы 2 основной вклад в сечение увода вносит сечение неупругого рассеяния. Обращает внимание, что практически все результаты расчетов выполненные с данными из различных библиотек дают более низкие значения, чем полученные в эксперименте. В среднем, экспериментальные значения выше расчетных на 9%. Возможно это обусловлено или погрешностью в оценке сечения увода из данных получаемых непосредственно в эксперименте или неадекватностью модели используемой в расчетах сечения увода из оценённых сечений. Было бы полезным провести описание первичных данных получаемых в эксперименте методом Монте-Карло используя непрерывное представление по энергии нейтронов.

Таблица 2. Экспериментальные величины сечений увода в сравнении с результатами расчета для разных файлов и библиотек оценённых данных

ЭКСПЕРИМЕНТ, барн				

Bondarenko52 [3]				0.72+-0.05
Lovchikova61 [4]				0.73+-0.04
Bethe57 [5]				0.689+-0.043
Lityaev85 [6]				0.67+-0.02

Среднее значение				0.7023
РАСЧЁТ, барн				

Библиотека или файл	Захват	Вклад от реакции		
		Упругого рассеяния	Неупругого рассеяния	Полное сечение увода

ABBN78	0.0132	0.0472	0.5897	0.6500
ABBN93.1	0.0147	0.0465	0.5828	0.6440
ENDF/B-5	0.0136	0.0426	0.6267	0.6829
ENDF/B-6	0.0140	0.0423	0.5738	0.6302
JEFF-2.2	0.0155	0.0461	0.5942	0.6558
JEFF-3	0.0131	0.0440	0.5685	0.6256
JENDL-3.2	0.0146	0.0447	0.5966	0.6559
JENDL-3.3	0.0147	0.0455	0.6005	0.6607
BROND-3*	0.0141	0.0438	0.5555	0.6133

Среднее значение				0.6465

* - Все сечения кроме ^{56}Fe взяты из библиотеки ENDF/B-6.8

Сечение деления ^{238}U нейтронами приведённое на рисунке 55 для двух библиотек показывает, что вклад в неопределенность в расчетах сечения увода обусловленный разными оценками сечения деления не может превышать 1 – 2%. Эффективный порог сечения деления ^{238}U лежит при энергии примерно 1,4 МэВ, что позволяет считать сечение увода нечувствительным к сечению неупругого рассеяния на ^{56}Fe при энергии нейтронов ниже 1,4 МэВ.

Сравнение оценённых интегральных сечений неупругого рассеяния с экспериментальными данными опубликованными после 1990 года показано на рисунках 51 - 53. Данные Коржа не являются абсолютными, они нормированы на данные Лискина при энергии 1,4 МэВ. Все другие данные полученные при регистрации гамма переходов в естественном железе приведены к сечению неупругого рассеяния нейтронов в ^{56}Fe с учетом его содержания и с учётом, что при достаточно высоких энергиях 95% всех гамма-переходов при неупругом рассеянии дают вклад в гамма-линию с энергией 0,847 МэВ.

Сравнение произведения сечения неупругого рассеяния на спектр нейтронов деления ^{235}U тепловыми нейтронами являющегося величиной, лучше представляющей сечение увода показано на рисунке 54. Из рисунка видно, что превышение сечения неупругого рассеяния в библиотеке JENDL-3.3 в области энергий 3 – 4 МэВ над данными других библиотек не подтверждается последними экспериментальными данными (см. рисунки 51 – 53). Кроме этого, маловероятно, что 9% разница в сечении увода между JENDL-3.3 и BROND-3 может быть объяснена только разностью сечений неупругого рассеяния.

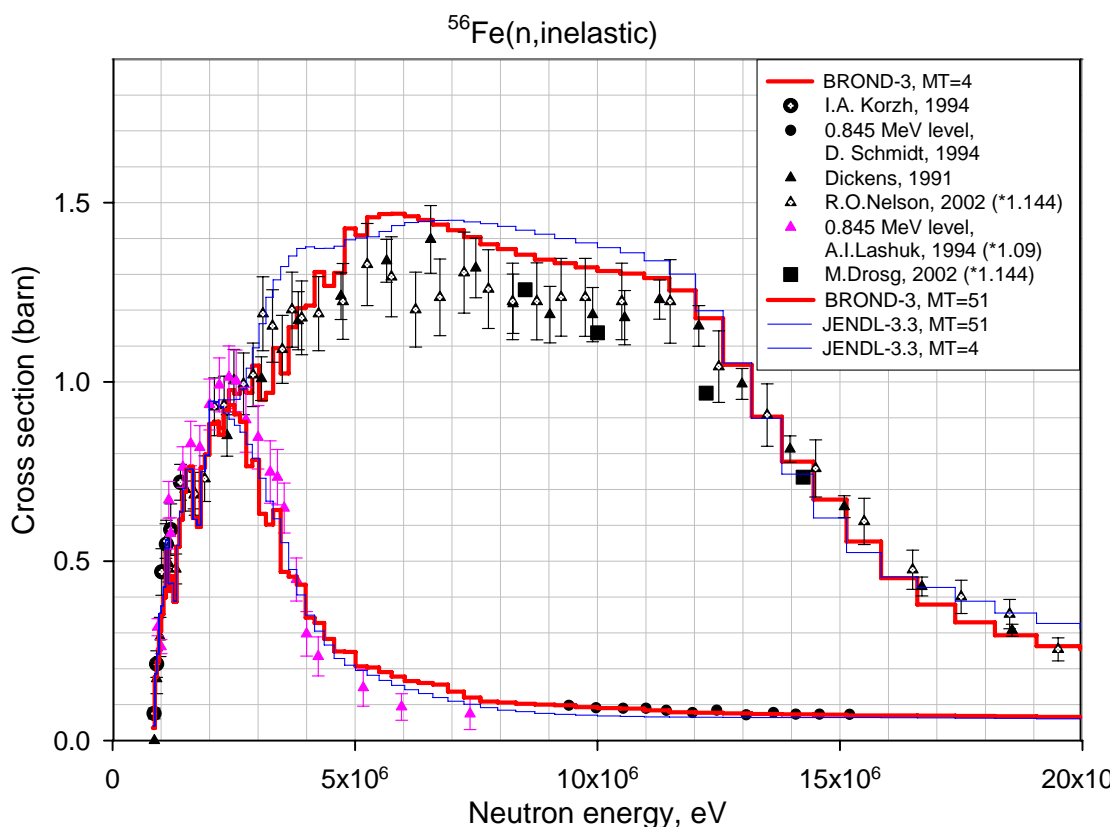


Рис. 51. Сравнение полного сечения неупругого рассеяния и сечения неупругого рассеяния с возбуждением первого уровня (нижние кривые).

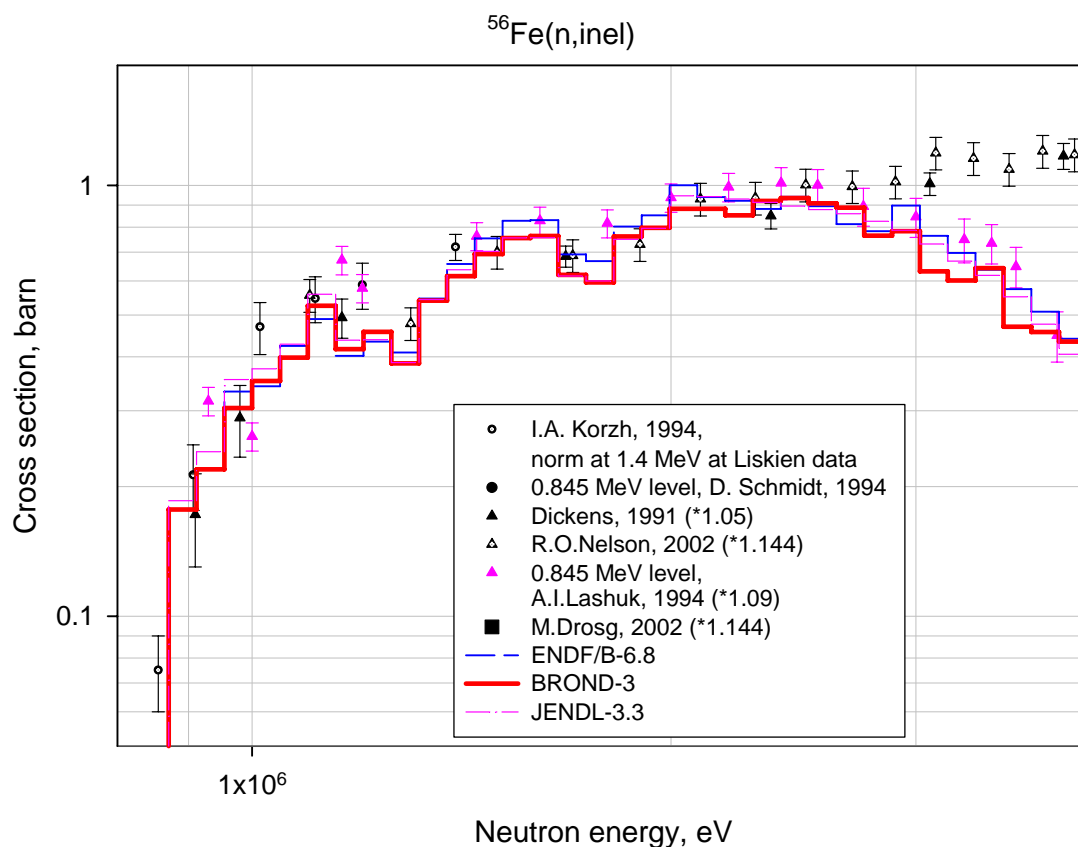


Рис. 52. Сравнение сечения неупругого рассеяния с возбуждением первого уровня из разных библиотек с последними экспериментальными данными. Данные Дикенса и Нельсона (для энергии выше 2,1 МэВ) - для полного сечения неупругого рассеяния.

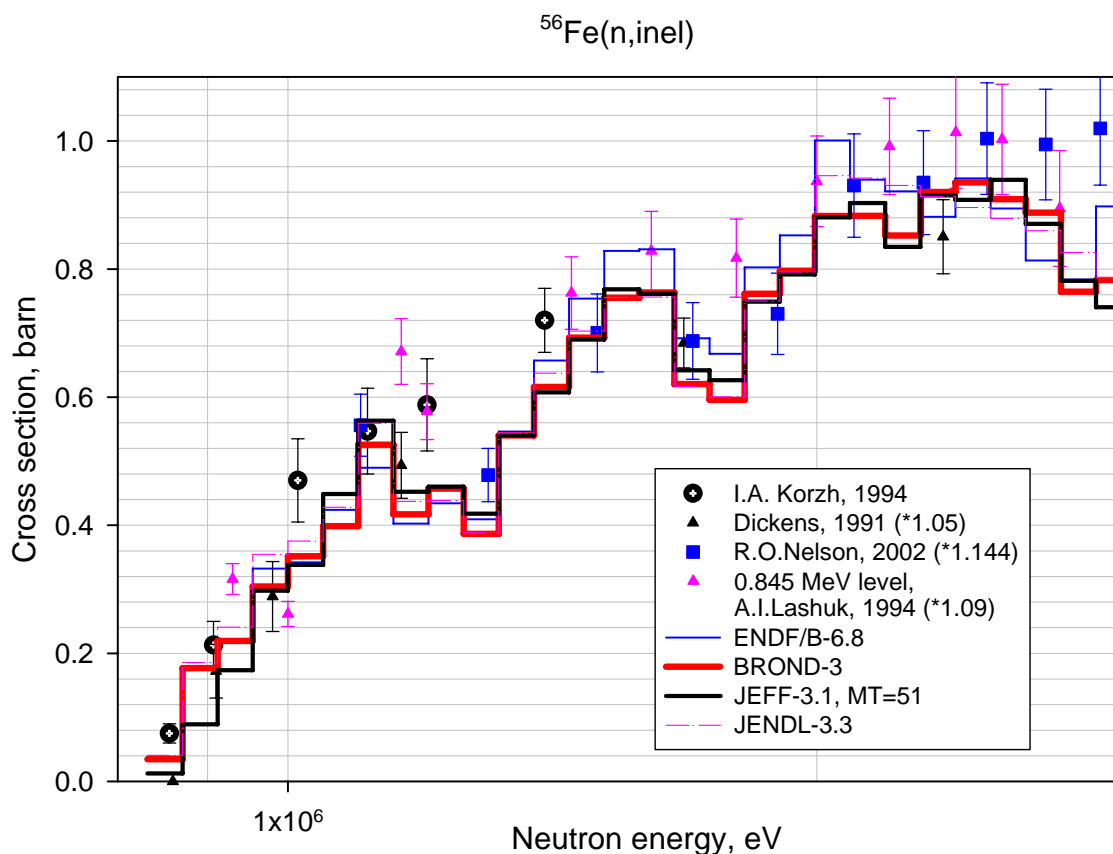


Рис. 53. То же, что на рисунке 47, но в логарифмической шкале по энергии.

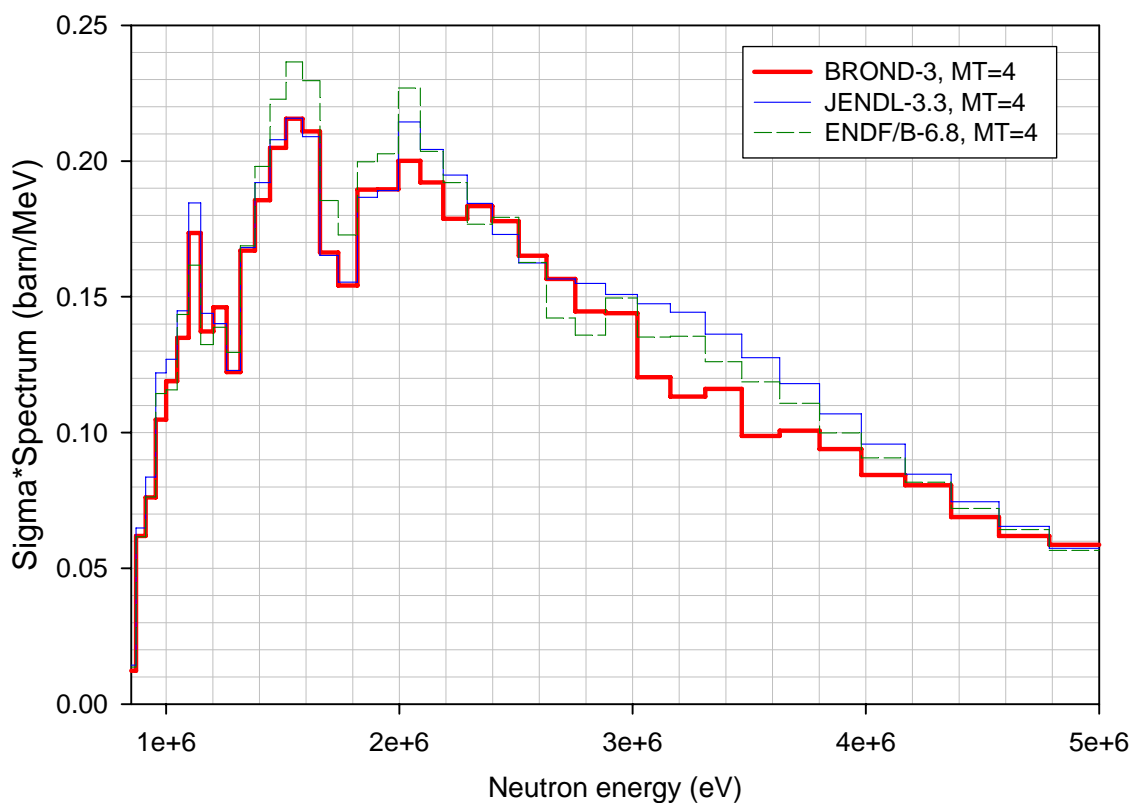


Рис. 54. Произведение нормированного на 1 спектра деления ^{235}U тепловыми нейтронами из библиотеки ENDF/B-VI.8 на полное сечение неупругого рассеяния из разных библиотек.

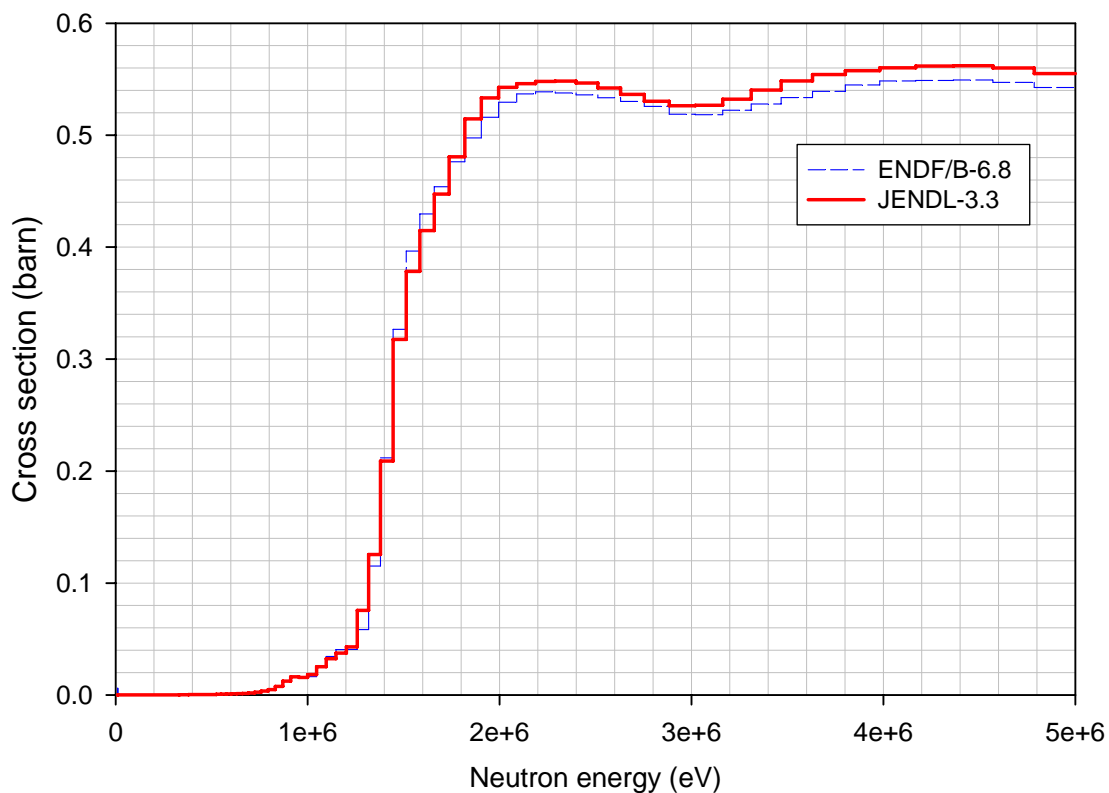


Рис. 55. Сечение деления ^{238}U нейтронами в библиотеках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.8.

Вывод:

Наличие систематического расхождения между результатами оценки сечения увода и его определения в экспериментах по сферическому пропусканию нейтронов деления очевидно. Для разрешения этого противоречия необходим тщательный анализ экспериментов по пропусканию с использованием современных вычислительных методик. Наиболее вероятной причиной расхождения представляется занижение среднего пути быстрых нейтронов деления, проходимых ими в сферической оболочке. *Желательно проведение прямого сравнения измеряемых на эксперименте величин с результатами их детального расчёта методом Монте-Карло.*

Литература

1. H. Vonach et al., Evaluation of the Fast Neutron Cross Sections of ^{56}Fe Including Complete Covariance Information, Physics Data, 13-7, 1992.
2. V. Pronyaev et al., Evaluation of the fast neutron cross sections of ^{52}Cr and ^{56}Fe including complete covariance information, Physics Data, 13-8, 1995.
3. Бондаренко И.И., Ковалев В.Л., Физические измерения на нейтронах деления с конвекторами, IAEA Seminar Physics of Fast and Intermediate Reactors, Vienna, 1961, v. 2, p.159.
4. Ловчикова Г.Н., Сальников О.А., Сечение увода под порог деления U-238 нейтронов спектра деления на элементах Na, K, Sr, Ba, Mo, Nb, Fe. Атомная Энергия, т.11, 1961, с.442.
5. Bethe N.A., Beyster J.R., Carter R.E. Inelastic Cross section for Fission-Spectrum neutrons, J. of Nucl. Energy, v. 4, 1957, p.147.
6. Дулин В.А., Коробейников В.В., Литяев В.М., Цибуля А.М. Определение сечения увода под порог деления U-238 из экспериментов по пропусканию нейтронов деления, Атомная Энергия. т. 59 (2), 1985, с.116

8.2.Бенчмарк эксперимент на быстрой критической сборке КБР-09 с большим содержанием железа

Результаты для k_{∞} полученные из анализа экспериментальных данных на сборке КБР-09 для железа приведены в таблице 1. Приведено экспериментальное значение и 5 расчётных значений для разных вариантов библиотек.

	Эксп Бенч	ABBN- 93	JEFF-3.1	ENDF/B- 6.7	BROND-3*
k_{∞}	1.050±0.008	1.0676	1.0824	1.0793	1.0720
Отличие (расчет – эксп. Дулин)*100%	±0. 8%	+1.7%	+3.0%	+2.8%	+2.1%

* Все данные, кроме данных для ^{56}Fe , взяты из ENDF/B-6.7

Коэффициенты чувствительности дающие наибольший вклад в k_{∞}
 ^{235}U :

(n,g) -0.1633

(n,f) 0.5556

ν 0.9987

содерж. 0.3937

^{nat}Fe :

(n,g) -0.1818

(n,el) 0.03034

содерж. -0.1121

Зная групповые коэффициенты чувствительности и сечения можно оценить вклад в различие k_{∞} между ENDF/B-6.7 и BROND-3 обусловленное разными файлами ^{56}Fe . Изменения в k_{∞} при переходе от ENDF/B-6.7 к BROND-3 составляют -0.00786 от захвата и +0.000036 от упругого рассеяния, что в целом хорошо согласуется с наблюдаемым различием. Из рисунке 52 видно, что различие в k_{∞} между BROND-3 и другими библиотеками почти полностью объясняется различием в фоновом сечении захвата, добавленным в резонансную область.

Вывод: Повышение сечения захвата ^{56}Fe в библиотеке BROND-3 по сравнению с данными ENDF/B-6.7 ведет к некоторому снижению расчетно-экспериментального расхождения для сборки КБР-09 содержащей большое количество железа. Однако расхождение продолжает оставаться существенно превосходящим экспериментальную погрешность

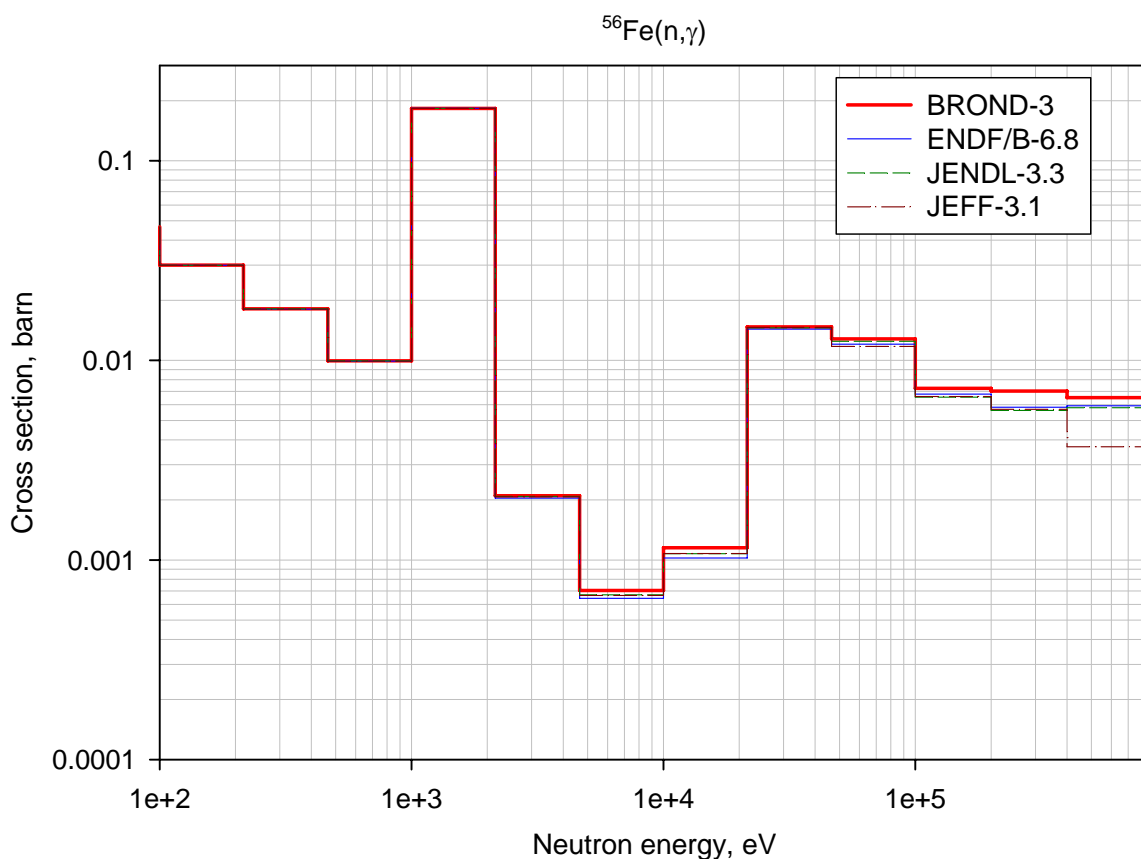


Рис. 56. Сечение захвата нейтронов $^{56}\text{Fe}(n,\gamma)$ из разных библиотек в 26-и групповом разбиении.

8.3. Бенчмарк-эксперименты на сборках, содержащих железо в качестве отражателя и эксперименты по глубокому проникновению нейтронов в железе

Библиотека ENDF/B-VII(beta1 версия) была протестирована на большом количестве интегральных экспериментов по глубокому проникновению нейтронов в моноэлементных средах и в критических экспериментах на сборка с железом в качестве отражателя. Так как различия в в разных библиотеках сечениях железа, определяющие исследуемые величины, редко превышает несколько процентов, анализ результатов этих тестов может позволить сделать вывод и о данных из других библиотек. Общим выводом является, что нейтронные данные для железа из библиотек ENDF/B-VI и ENDF/B-VII заметно уменьшают утечку нейтронов из компактных металлическихборок, окружённых железом, для нейтронов с энергией менее 1 МэВ, а также выход быстрых нейтронов с энергией менее 1 МэВ при их прохождении через большие толщи железа. Этот эффект также заметен для моноизотопных сред в интегральных экспериментах по пропусканию сферических (OKTAVIAN) и плоских (FNS) слоёв.

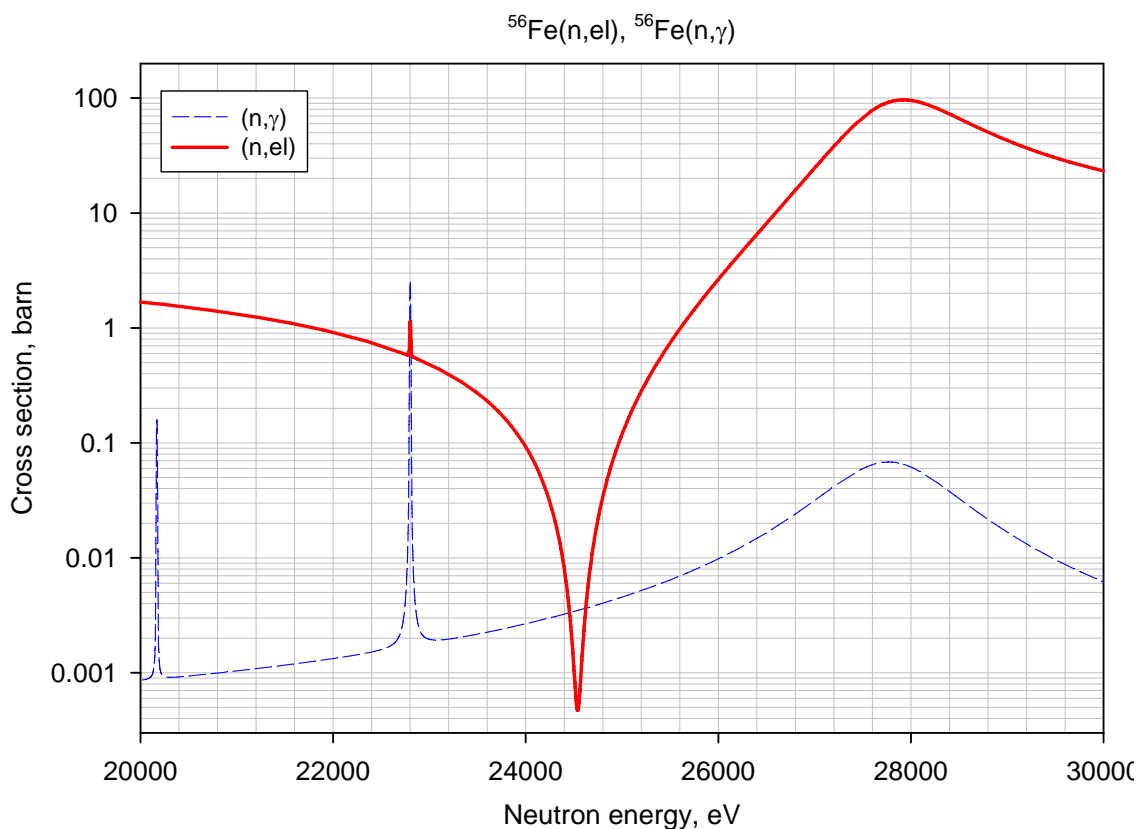


Рис. 57. Сечение захвата и упругого рассеяния нейтронов ^{56}Fe из библиотеки BROND-3 вблизи широкого s-резонанса при 26 кэВ.

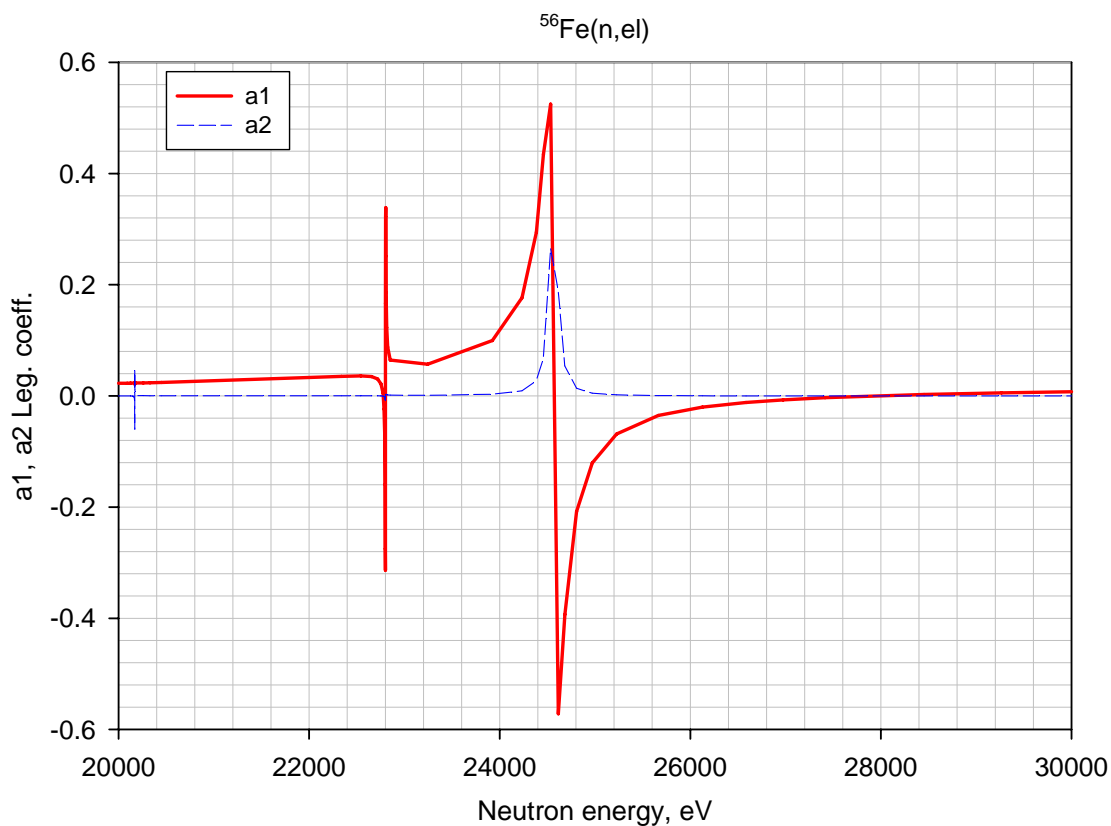


Рис. 58. Коэффициенты Лежандра a_1 и a_2 угловых распределений упругого рассеяния нейтронов ^{56}Fe из библиотеки BROND-3 вблизи широкого s-резонанса при 26 кэВ.

Рассчитанные выходы вторичных гамма-квантов в этих средах как правило заметно ниже наблюдаемых на эксперименте. Объяснение этому, вероятнее всего, – слишком грубый

учёт угловой зависимости упругого рассеяния от энергии нейтронов в резонансной области энергий (ниже 1 МэВ по энергии). Для более точного расчёта глубокого проникновения, утечки и отражения нейтронов в моноизотопных средах необходимо учитывать не только детальную зависимость хода сечений и спектра нейтронов в резонансной области, как показано на рисунке 57, но и угловые распределения, коррелированные с сечением упругого рассеяния как показано на рисунке 58.

9. Заключение

9.1 Вывод

В РОСФОНД рекомендуется включить оценку, выполненную для BROND-3 (Проняев, 2005). В дальнейшем целесообразно её дальнейшее улучшения, в частности, в связи с более углубленной валидацией по результатам интегральных экспериментов.

9.2. Автор обоснования оцененных данных

Проняев В.Г.

26.4. Железо-57

Содержание в естественной смеси 2. 2%

1. Общие характеристики

1.1. $Z=26$ (заряд)

1.2. $A=57$ (атомный номер)

1.3. $A_w=56.446$ (отношение массы ядра к массе нейтрона)

1.4. Содержание в естественной смеси 2.119 ± 0.010 (атомарные проценты)

1.5. Спин основного состояния $1/2^-$

Оценка ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1) была выполнена в 1989 году и не подвергалась существенной ревизии за исключением расширения верхнего предела по энергии с 20 до 150 МэВ в 1996 году. Оценка JENDL-3.3 представляет собой выполненную в 2000 году существенную ревизию оценки JENDL-3.2. В области разрешённых резонансов в оценке JEFF-3.1 использованы параметры из файла JENDL-3.3, а для более высоких энергий оценка основывается на модельных расчётах. Оценка для библиотеки BROND-2 была выполнена в 1985 году и оценка CENDL-2 – ревизию 1991 года оценки JENDL-3.1 для библиотеки термоядерных данных.

2. Область разрешённых резонансов и тепловые сечения

Значения сечений в тепловой точке, резонансных интегралов захвата, радиуса потенциального рассеяния, а также области неразрешённых резонансов приведены в таблице 1. Особенностью ^{57}Fe является низкий порог неупругого рассеяния (14.248 кэВ) приводящий к тому, что вклад сечения неупругого рассеяния в область разрешённых резонансов является резонансным и большим. По требованию формата резонансное сечение неупругого рассеяния в области разрешённых резонансов должно быть задано в качестве подложки в этом сечении и через конкурирующую ширину в параметрах резонансов. Все файлы содержат подложку в сечении неупругого рассеяния в области разрешённых резонансов, но ни один из файлов – конкурирующие ширины в области разрешённых резонансов. Для BROND-2 конкурирующие ширины в области разрешённых резонансов первоначально вводились в файл, но затем были исключены. Отсутствие конкуренции может приводить к завышению сечений реакций упругого рассеяния и захвата. Для примера, на рисунке 1 показаны результаты расчёта средних сечений захвата в области разрешённых резонансов без учёта (BROND-2) и с учётом (BROND-2.1) конкурирующих ширин канала неупругого рассеяния. Так как нейтронные ширины канала упругого рассеяния и гамма-ширины также изменялись в оценке, разброс оценок является заметным.

Таблица 1. Характеристики оценок в тепловой точке и резонансной области.

Библиотека	σ_{el}^{therm} барн	$\sigma_{n,\gamma}^{therm}$ барн	RI барн	RRR формализм	R_0 фм	$E_{min}(URR)$ эВ	$E_{max}(URR)$ кэВ
ENDF/B-VI.8	2.5961	2.4258	1.4402	R-M	5.9	-	-
BROND-2	2.1262	2.4411	1.4564	B-W	5.9	200	500
JEFF-3.1	0.2021	2.4623	1.4188	R-M	6.5	-	-
JENDL-3.3	0.2021	2.4623	1.4188	R-M	6.5	-	-
CENDL-2	0.2021	2.4623	1.4188	B-W	6.5	-	-
Mu03		2.48±0.30	1.6±0.2				

Сравнения групповых сечений полученных из оценённых резонансных параметров и гладких сечений приведённых в разных библиотеках показаны на рисунках 2 – 7. Расхождения в оценках обусловлены противоречивостью экспериментальных данных. Так различия в полных сечениях для нейтронов с энергией ниже нескольких кэВ объясняются в первую очередь различиями в радиусах потенциального рассеяния и параметров отрицательных резонансов заложенных в области разрешённых резонансов в разных библиотеках. Оценки ENDF/B-VI.8 и BROND-2, где выбор радиуса потенциального рассеяния основан на измерениях полного сечения в области 10 – 100 эВ, где оно существенно определяется радиусом потенциального рассеяния, является предпочтительным по сравнению с оценками JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Сечение захвата в резонансной области, по-видимому, наилучшим образом представлено в библиотеке ENDF/B-VI.8, так как в ней резонансные ширины захвата, определённые в экспериментах с высоким разрешением были поправлены, чтобы добиться описания наблюдаемого среднего сечения захвата. Сечение неупругого рассеяния в резонансной области энергий оценивалось в основе имеющихся экспериментальных данных[1], в BROND-2 и JENDL-3.3 – рассчитывалось из резонансных параметров основанных на разных экспериментальных результатах, а в JEFF-3.1 – рассчитывалось в оптико-статистической модели. Различия в сечении достаточно заметны и вероятно прямое использование последних экспериментальных данных в оценке ENDF/B-VI.8 является наилучшим подходом.

Вывод: Оценка ENDF/B-VI.8 может быть рекомендована для файла библиотеки РОСФОНД в области разрешённых резонансов. В то же время очевидна желательность пресмотра данных о резонансных параметрах с тем, чтобы конкурирующий процесс – неупругое рассеяние – нашел в них адекватное отражение и конкуренция этого процесса с захватом и упругим рассеянием учитывалась бы корректно.

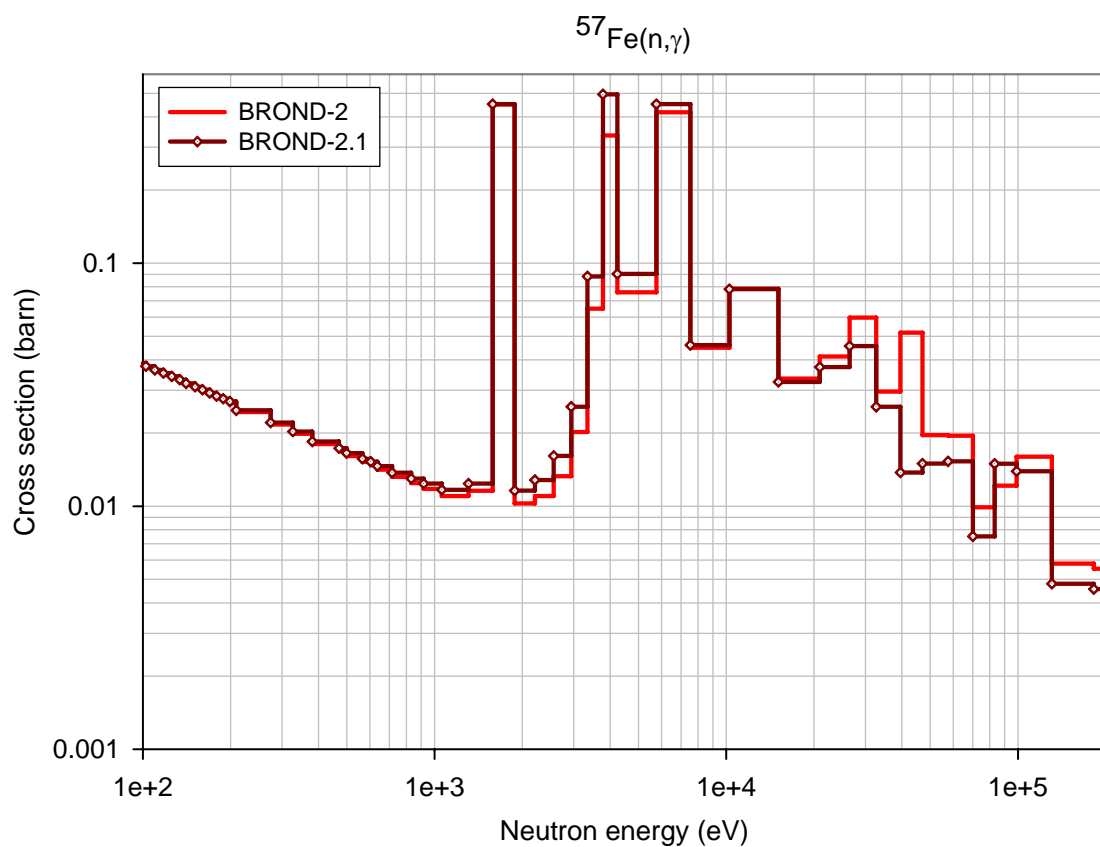


Рис. 1. Сечение захвата в резонансной области рассчитанное из резонансных параметров с учётом (BROND-2.1) и без учёта (BROND-2) конкуренции со стороны канала неупругого рассеяния.

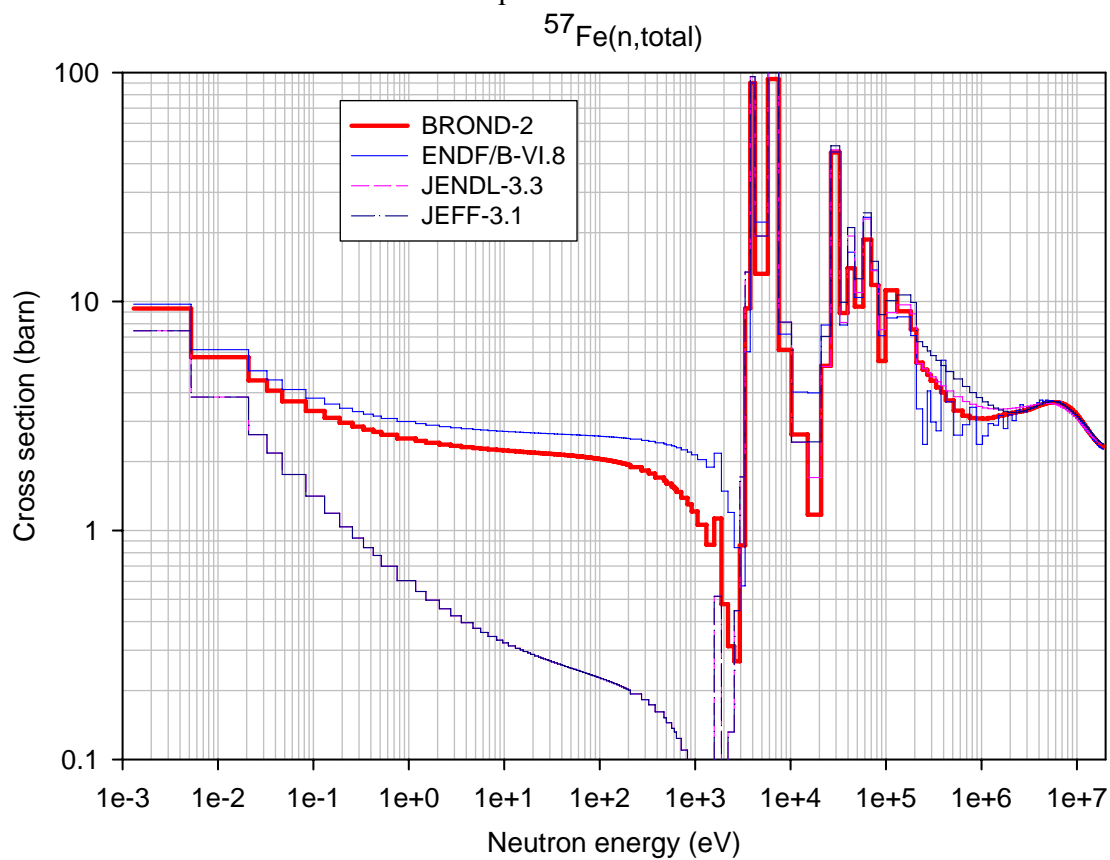


Рис. 2. Сравнение полного сечения в групповом представлении из разных библиотек.

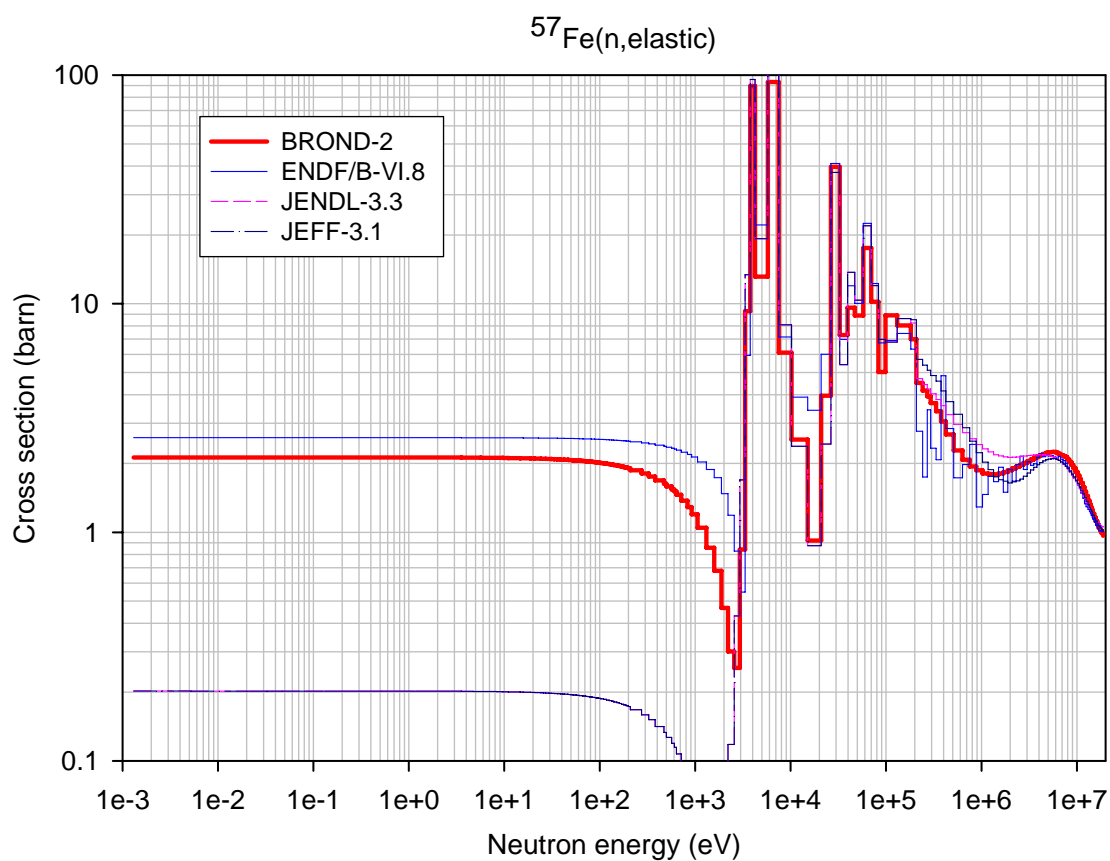


Рис. 3. Сравнение сечения упругого рассеяния в групповом представлении из разных библиотек.

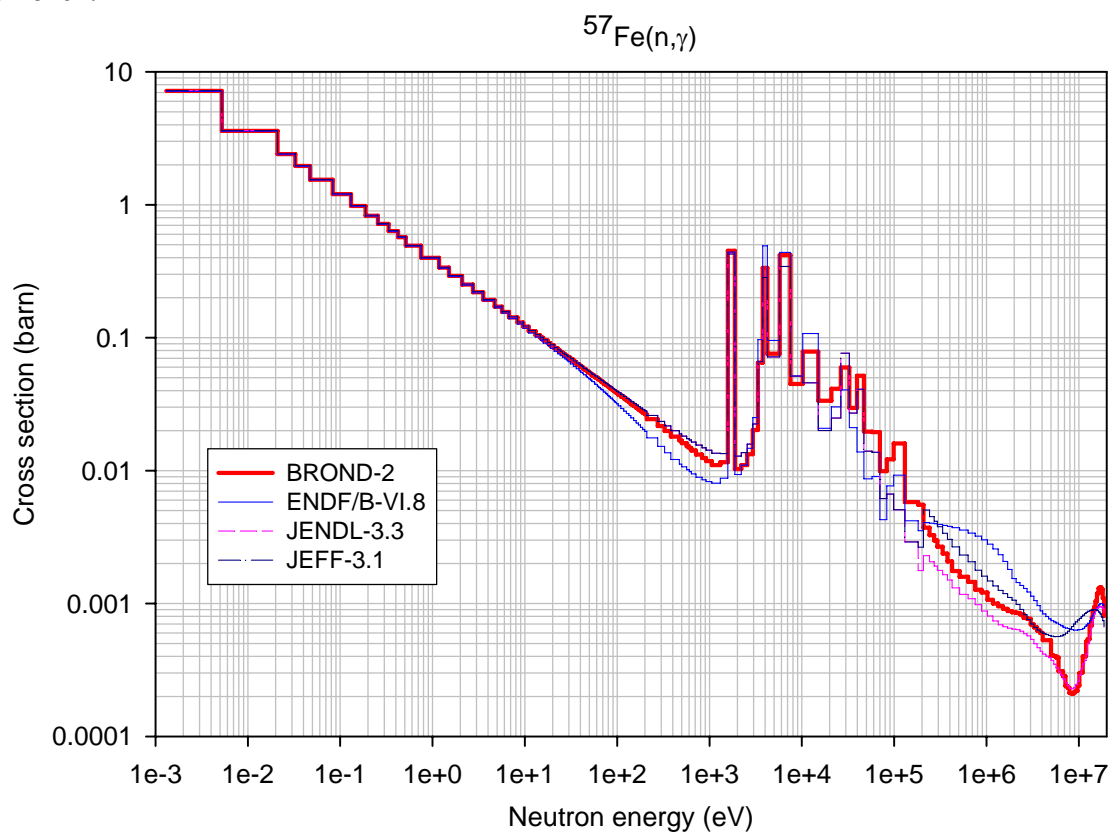


Рис. 4. Сравнение сечения захвата в групповом представлении из разных библиотек.

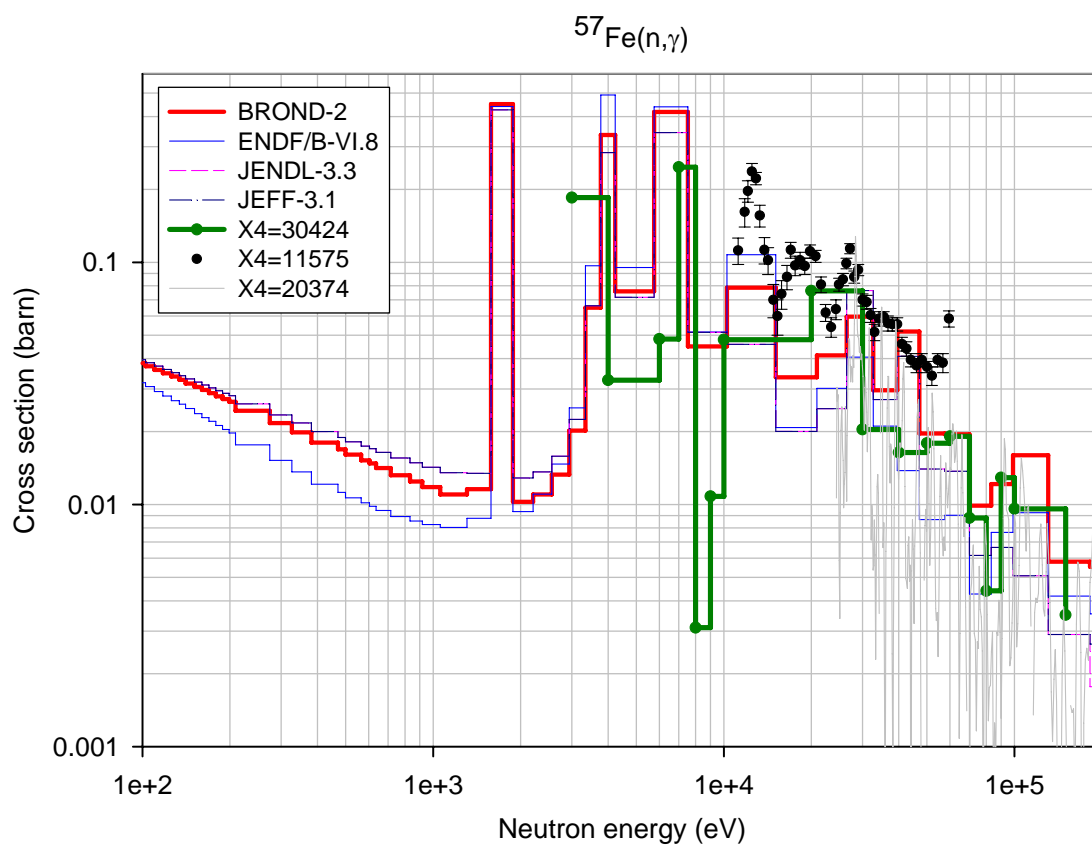


Рис. 5. Сравнение сечения захвата в групповом представлении из разных библиотек и имеющихся экспериментальных данных.

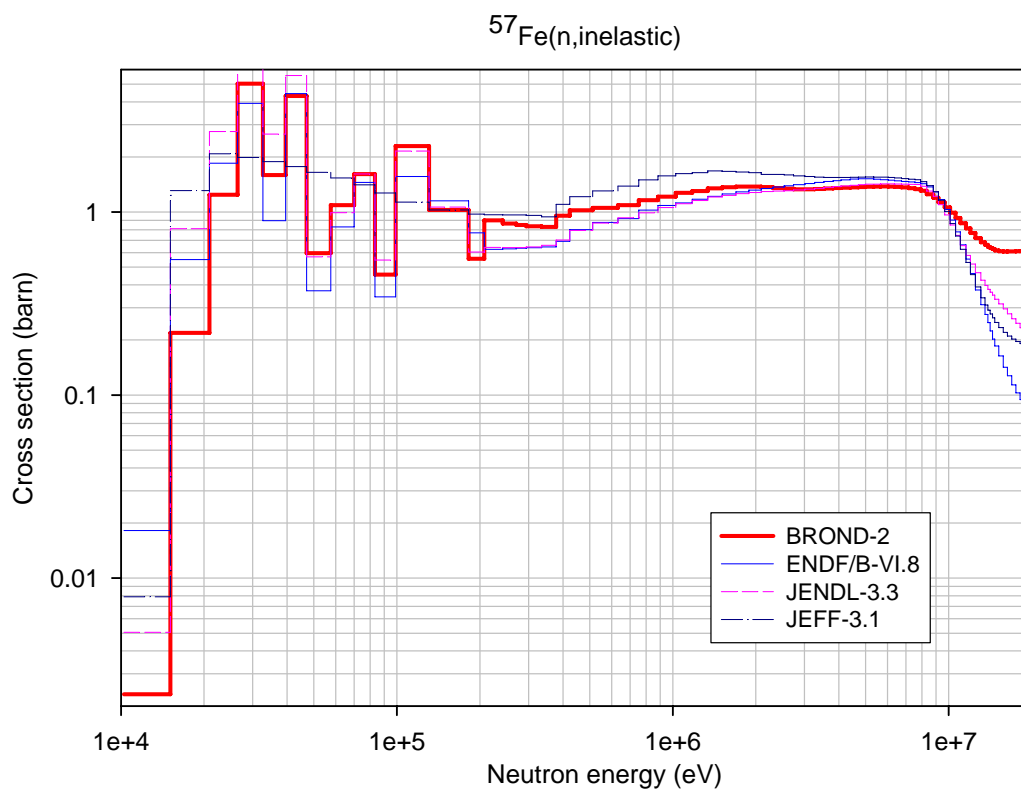


Рис. 6. Сравнение сечения неупругого рассеяния в групповом представлении из разных библиотек.

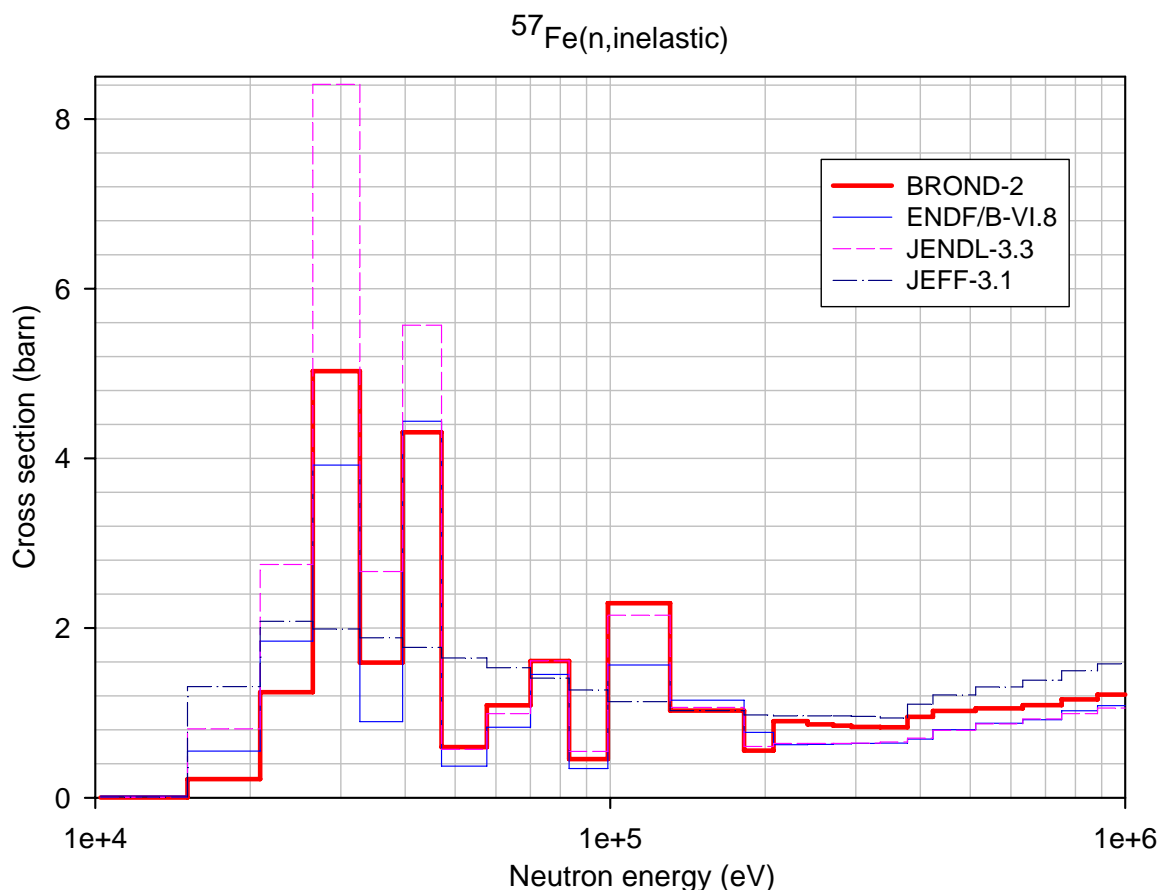


Рис. 7. Сравнение сечения неупругого рассеяния в групповом представлении из разных библиотек.

3. Область энергий выше 200 кэВ

Библиотека ENDF/B-VI.8 содержит в качестве оценки полного сечения, - сечение на естественном железе измеренное с высоким разрешением, в то время как другие библиотеки – результаты расчётов по оптической модели. В BROND-2 для энергии от 200 до 500 кэВ введена область неразрешённых резонансов. Как видно из рисунков 8 и 9 различие в оценках для энергии менее 2 МэВ большое и экспериментальные данные полученные с высоким разрешением Харвеем[2] и Пандеем[3] и усреднённые в таком же групповом разбиении как и оценённые данные отличаются на 10 – 20%. Такие же различия между оценками наблюдаются и для сечения упругого рассеяния (рисунок 10), где экспериментальные данные отсутствуют. Сечение в BROND-2 рассчитанное из средних резонансных параметров полученных в области разрешённых резонансов является, по-видимому, наиболее достоверным. Рассчитанные для JENDL-3.3 в оптико-статистическом подходе сечения близки к оценке БРОНД-2. В целом, оценка JENDL-3.3 является вероятно наилучшей для сечений в высокой области энергий, включая и сечения неупругого рассеяния и захвата показанные на рисунках 11 и 12. Экспериментальные данные для всех сечений, кроме полного сечения, отсутствуют.

Сравнение сечений для других реакций, экспериментальные данные для которых отсутствуют или они малы, показаны на рисунках с 13 по 17. Оценка JENDL-3.3 может быть рекомендована, так как она не противоречит имеющимся экспериментальным данным и согласуется с результатами большинства других оценок, полученных независимо в модельных расчётах.

Вывод: Оценка JENDL-3.3 может быть рекомендована для файла MF=3 (сечения) библиотеки РОСФОНД.

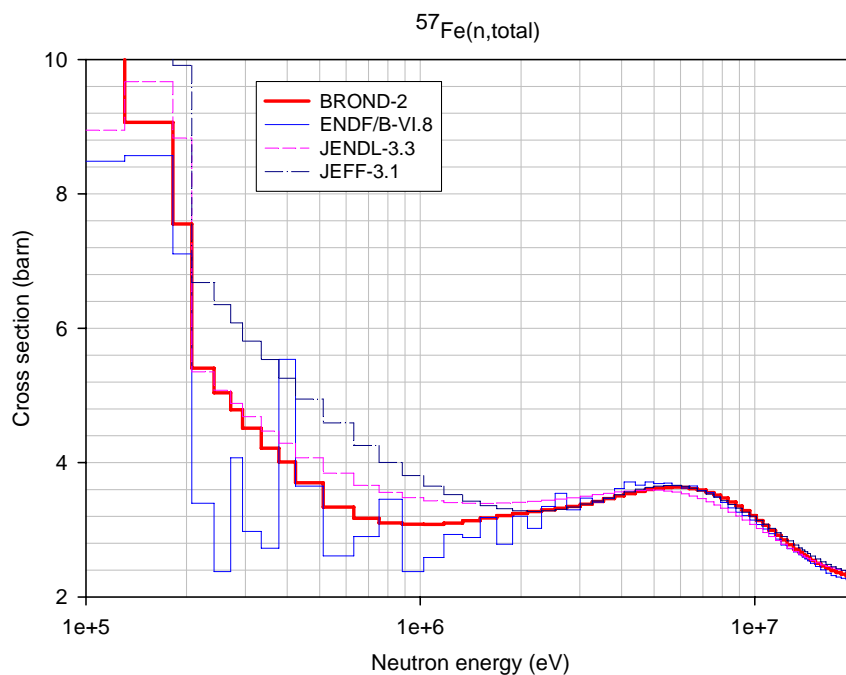


Рис. 8. Сравнение полного сечения в групповом представлении из разных библиотек.

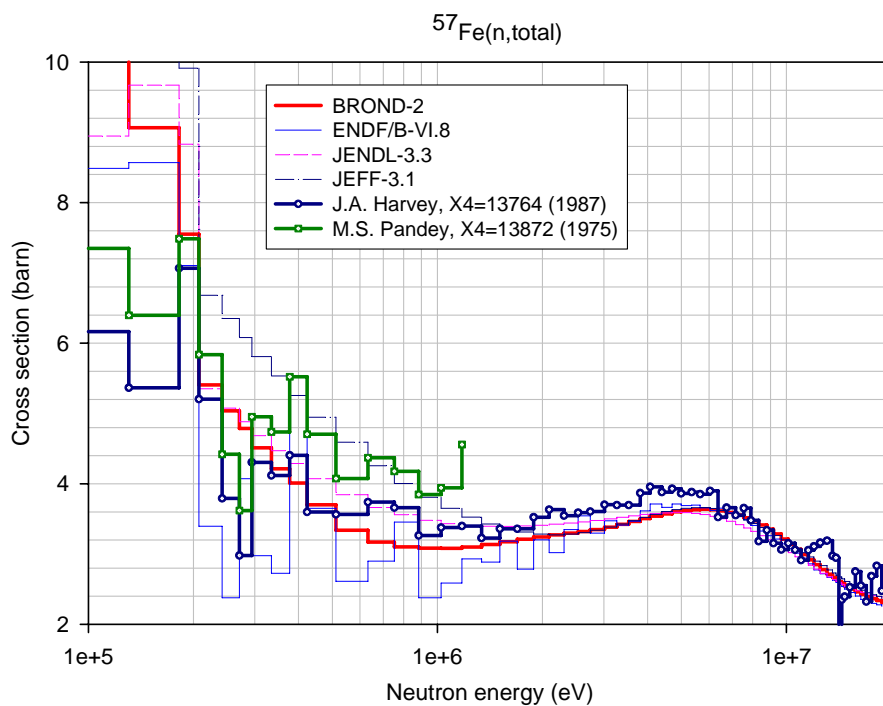


Рис. 9. Сравнение полного сечения в групповом представлении из разных библиотек с экспериментальными данными.

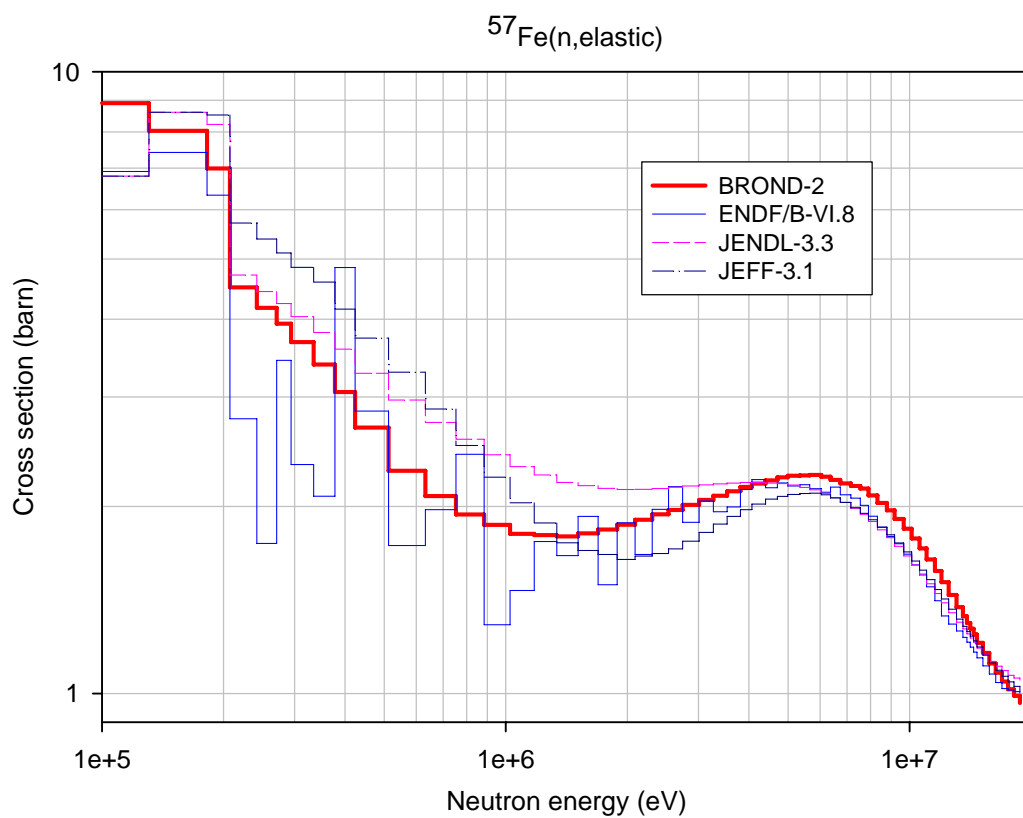


Рис. 10. Сравнение сечения упругого рассеяния в групповом представлении из разных библиотек.

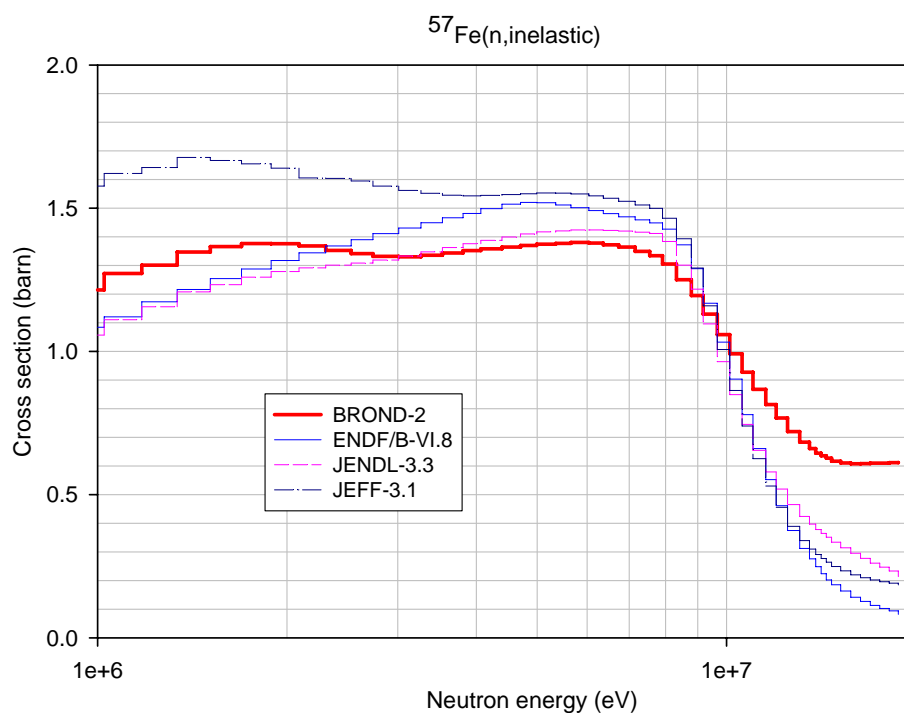


Рис. 11. Сравнение сечения неупругого рассеяния в групповом представлении из разных библиотек.

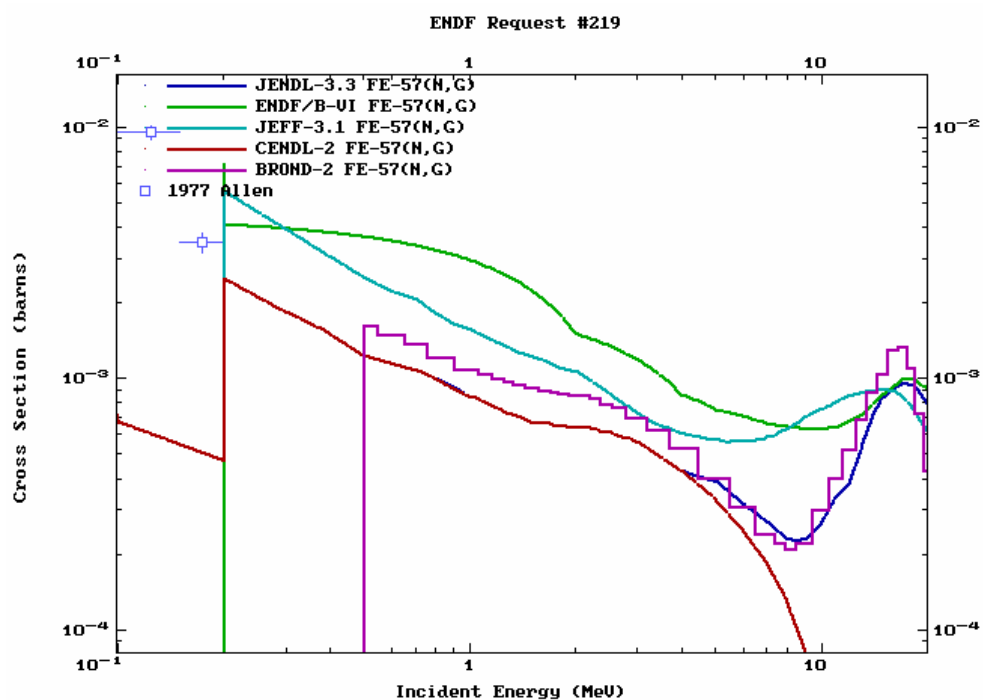


Рис. 12. Сравнение сечения захвата в групповом представлении из разных библиотек.

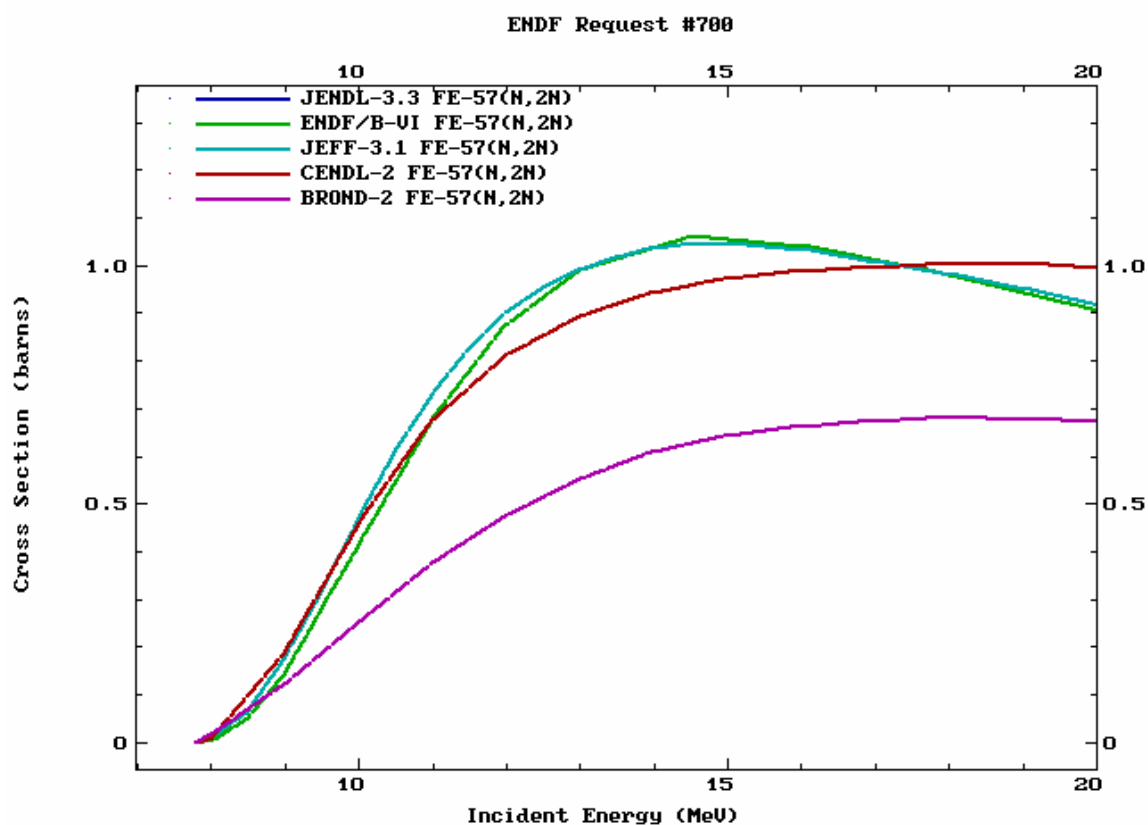


Рис. 13. Сравнение сечения (n,2n) из разных библиотек.

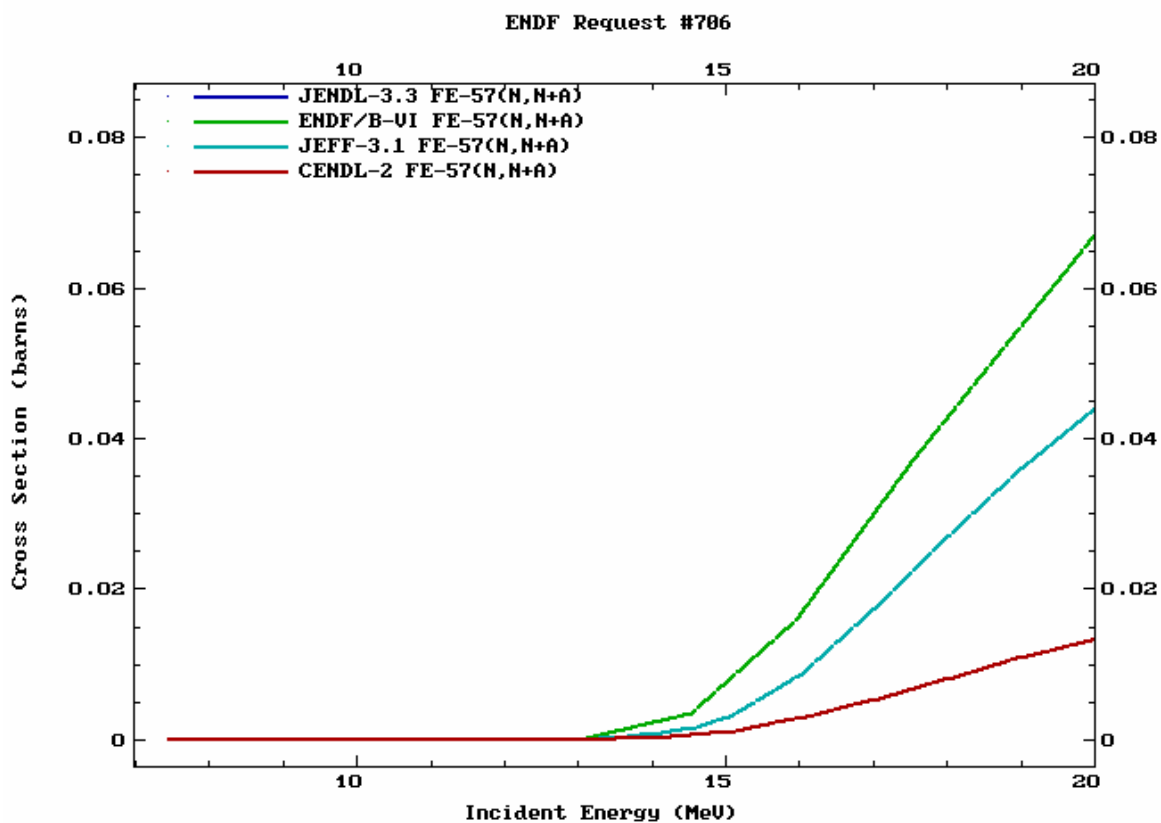


Рис. 14. Сравнение сечения (n,nα) из разных библиотек.

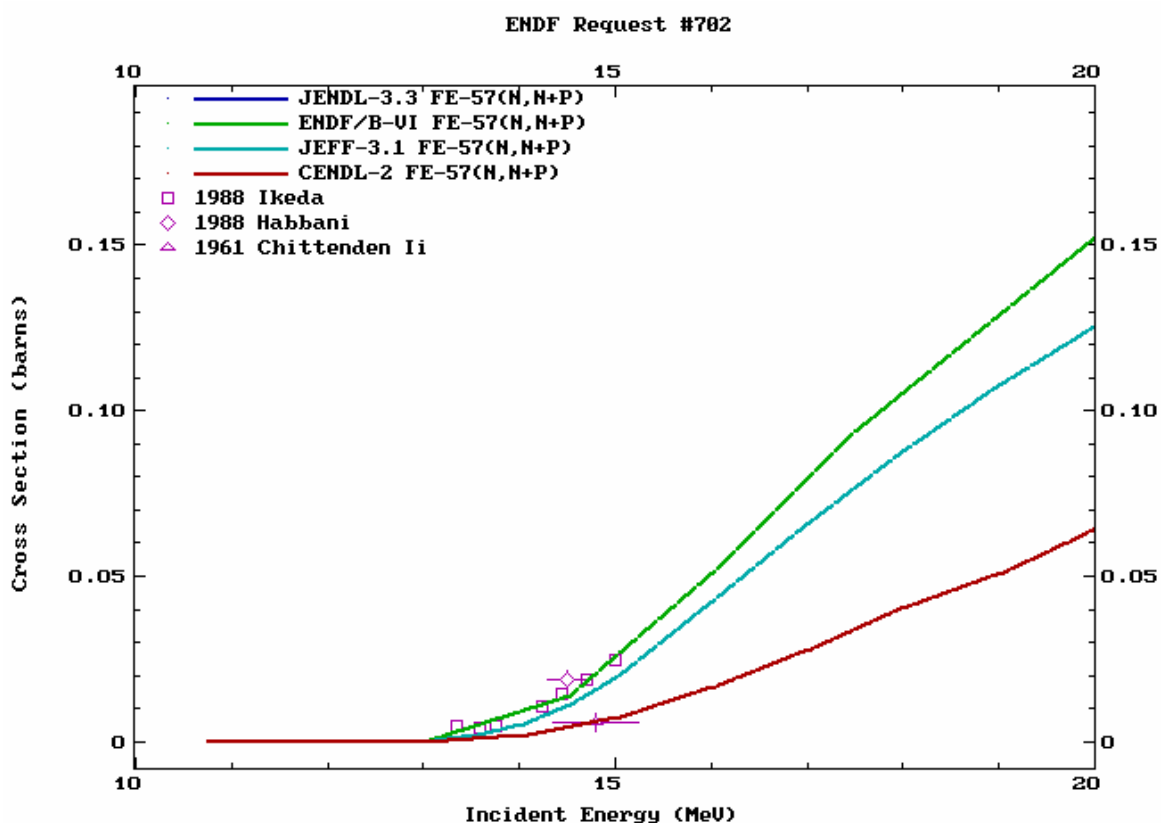


Рис. 15. Сравнение сечения (n,np) из разных библиотек.

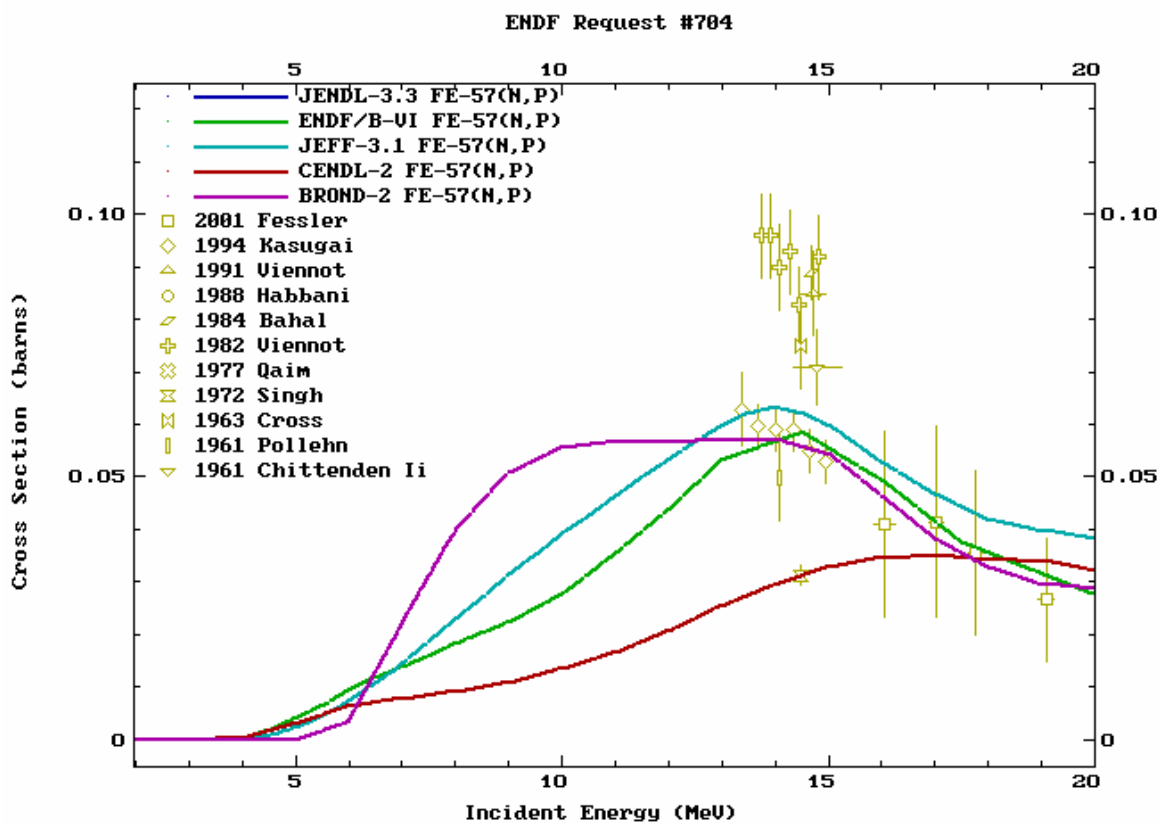


Рис. 16. Сравнение сечения (n,p) из разных библиотек.

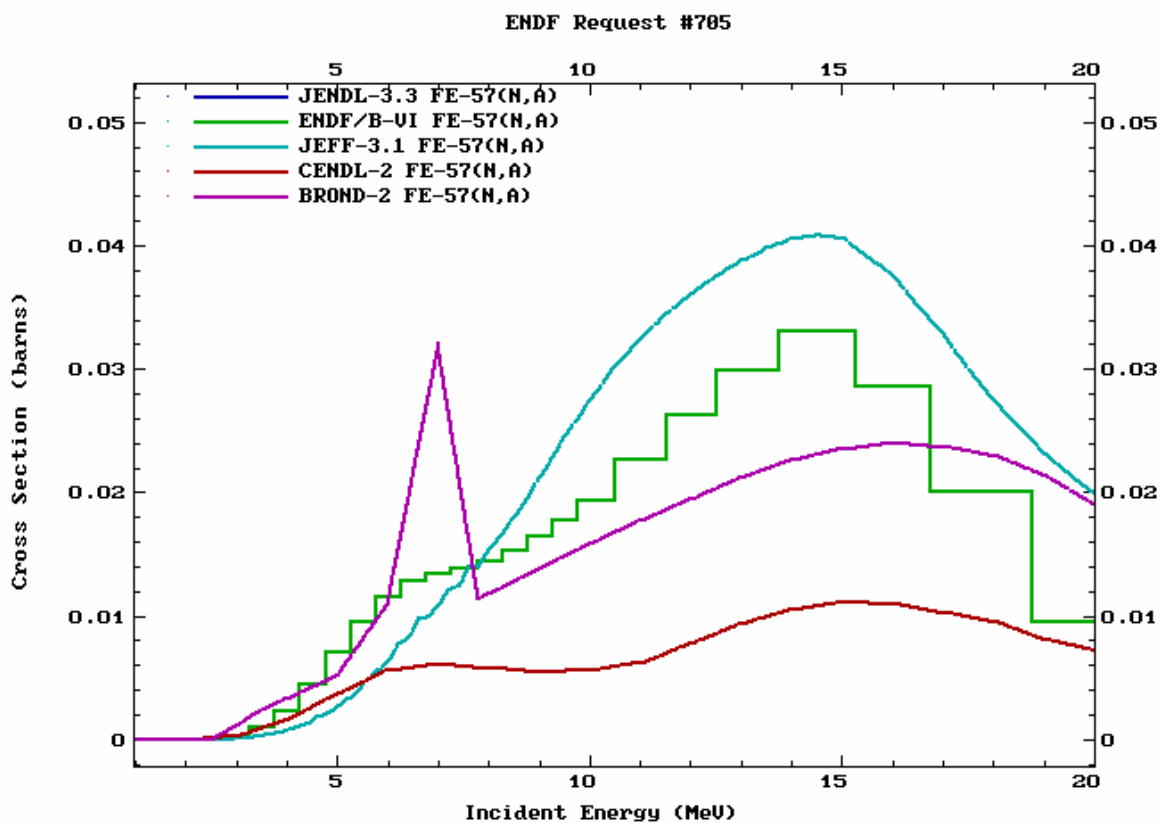


Рис. 17. Сравнение сечения (n,α) из разных библиотек.

4. Энергоугловые распределения вторичных частиц

Оценка энергоугловых распределений вторичных частиц получена во всех библиотеках в рамках модельных расчётах (программы GNASH, TNG, TALLYS). Средние энергосечения вторичных частиц для каналов реакции (n,2n) и неупругого рассеяния близки в библиотеках ENDF/B-6.8, JENDL-3.3 и JEFF-3.1.

Вывод: Любая из оценок (ENDF/B-6.8, JENDL-3.3 или JEFF-3.1) может быть рекомендована для файлов MF=4 и MF=6 библиотеки РОСФОНД.

5. Перечень цитированных работ

1. G. Rohr et al., Conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol., Antwerp (1982) p.139, EXFOR 20159.
2. J.A.Harvey, Private communication (1987), EXFOR 13764.
3. M.S.Pandey, Report ORNL-5025, p.125 (1975), EXFOR 13872.

6. Ковариационные матрицы погрешностей

Ковариационные матрицы погрешностей сечений оценены для ENDF/B-6.8 с использованием программы TNG и взяты такими же в JEFF-3.1.

7. Заключение

7.1 Вывод. Несмотря на отмеченные недостатки, учитывая важность области разрешённых резонансов, полноту представления данных и их непротиворечивость имеющимся экспериментальным данным, файл библиотеки ENDF/B-6.8 может быть рекомендован для библиотеки РОСФОНД.

7.2. Автор отбора файла оцененных данных

В.Г.Проняев

26.5. Железо-58

Содержание в естественной смеси 0.28%.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z=26$ (заряд)
- 1.2. $A=58$ (атомный номер)
- 1.3. $A_w=57.436$ (отношение массы ядра к массе нейтрона)
- 1.4. Содержание в естественной смеси 0.282 ± 0.004 (атомарные проценты)
- 1.5. Спин основного состояния 0^+

Оценка ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1) была выполнена в 1989 году и не подвергалась существенной ревизии за исключением гамма-спектров сечения захвата (2000 год). Оценка JENDL-3.3 представляет собой выполненную в 2000 году существенную ревизию оценки JENDL-3.2 (1987 - 1993 годы). Оценка JEFF-3.1 выполнена в 2004 году и основывается (кроме области разрешённых резонансов) на модельных расчётах (программа TALYS). Максимальная энергия нейтронов в файле – 200 МэВ. Оценка для библиотеки BROND-2 была выполнена в 1985 году и оценка CENDL-2 – ревизию 1991 года оценки JENDL-3.1 для библиотеки термоядерных данных.

2. Область разрешённых резонансов и тепловые сечения

Значения сечений в тепловой точке, резонансных интегралов захвата, радиуса потенциального рассеяния, а также области неразрешённых резонансов приведены в таблице 1. Необходимо отметить существенные различия в упругом (и полном) сечениях при малой энергии нейтронов данные в разных оценках (рисунки 1 и 2). Это объясняется отсутствием и ненадёжностью экспериментальных данных при тепловой и малой энергии нейтронов. Так данные Гарга по полым сечения приведённые на рисунках 1 и 2 являются необработанными результатами измерений на образце содержащем другие изотопы железа. Как видно из рисунка 2, несмотря на высокое разрешение экспериментальные данные не воспроизводят минимумы в сечении обусловленные интерференцией резонансного и потенциального рассеяния для широких s- резонансов. Возникает ощущение, что представленные данные не поправлены даже на фон, потому что примесь в образце других изотопов не может заполнить минимумы в сечении до такой величины.

Таблица 1. Характеристики оценок в тепловой точке и резонансной области.

Библиотека	σ_{el}^{therm} барн	$\sigma_{n,\gamma}^{therm}$ барн	RI барн	RRR формализм	R_0 фм	Подложка в захвате в RRR	Область неразреш. резонансов
ENDF/B-VI.8	3.0989	1.1491	1.4923	R-M	7.2	0 – 1 мб	-
BROND-2	3.191	1.270	1.553	MLBW	5.0	-	200-500 кэВ
JEFF-3.1	7.4763	1.3143	1.2715	R-M	5.226	-	-
JENDL-3.3	6.470	1.300	1.355	R-M	5.9	-	-
CENDL-2	4.4327	1.2718	1.5600	MLBW	5.9	-	-
Mughabghab03		1.3 ± 0.3	1.7 ± 0.1				

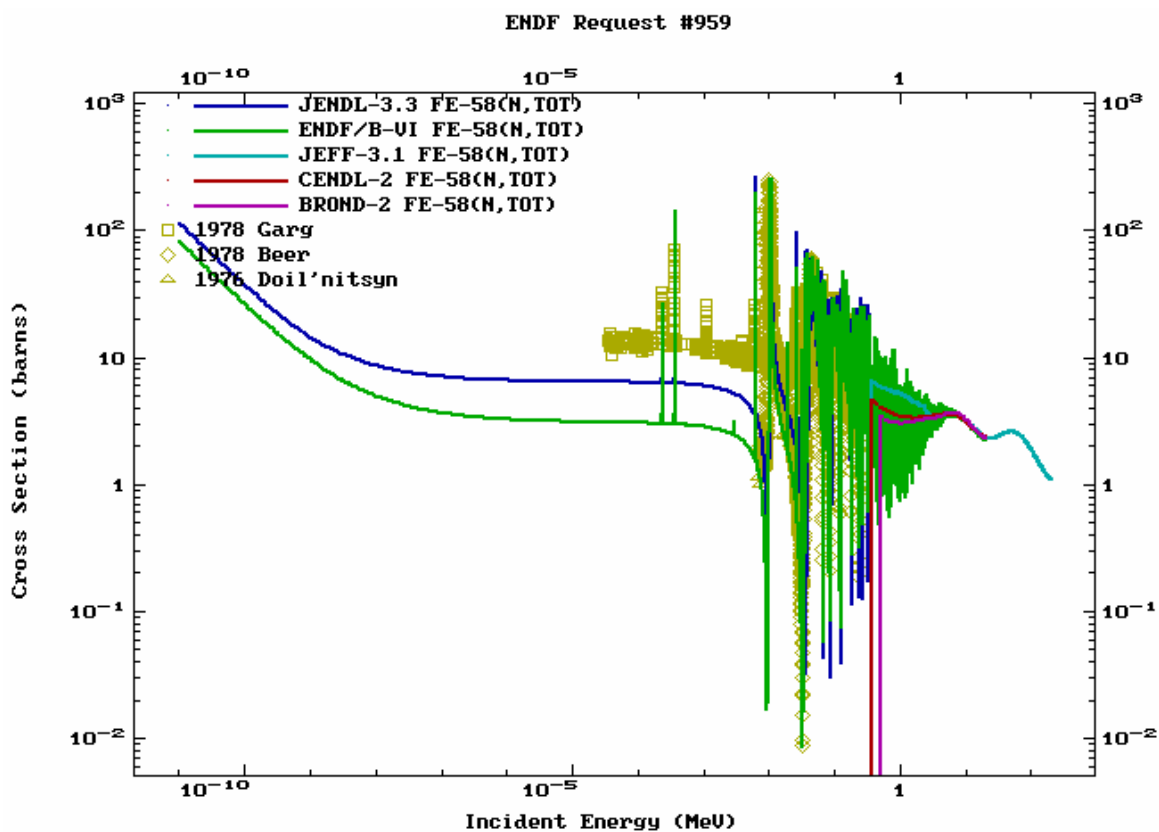


Рис. 1. Сравнение полных сечений из разных библиотек. Сечения для JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.8 восстановлены из резонансных параметров в области разрешённых резонансов.

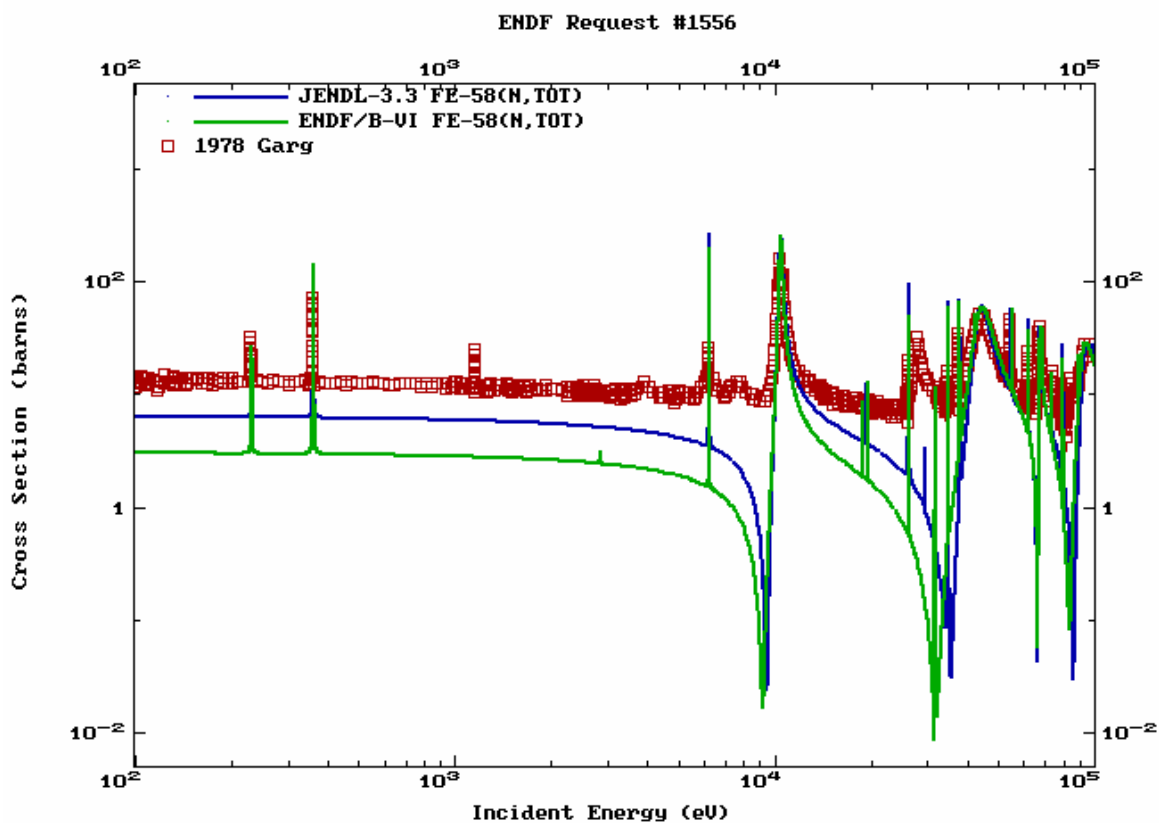


Рис. 2. Сравнение полных сечений из разных библиотек с экспериментальными данными.

3. Сечения вне резонансной области

Наиболее важные сечения в быстрой области энергии нейтронов показаны на рисунках 3-8. Экспериментальные данные малочисленны и результаты расчётов, взятые в качестве оценок в значительной степени зависят от выбранных параметров. В этой ситуации прагматичный подход использованный в ENDF/B-VI.8, при котором как малочисленные экспериментальные данные для ^{58}Fe , так и использование хорошо известных сечений на естественном железе влияли на оценку сечения ^{58}Fe , является предпочтительным.

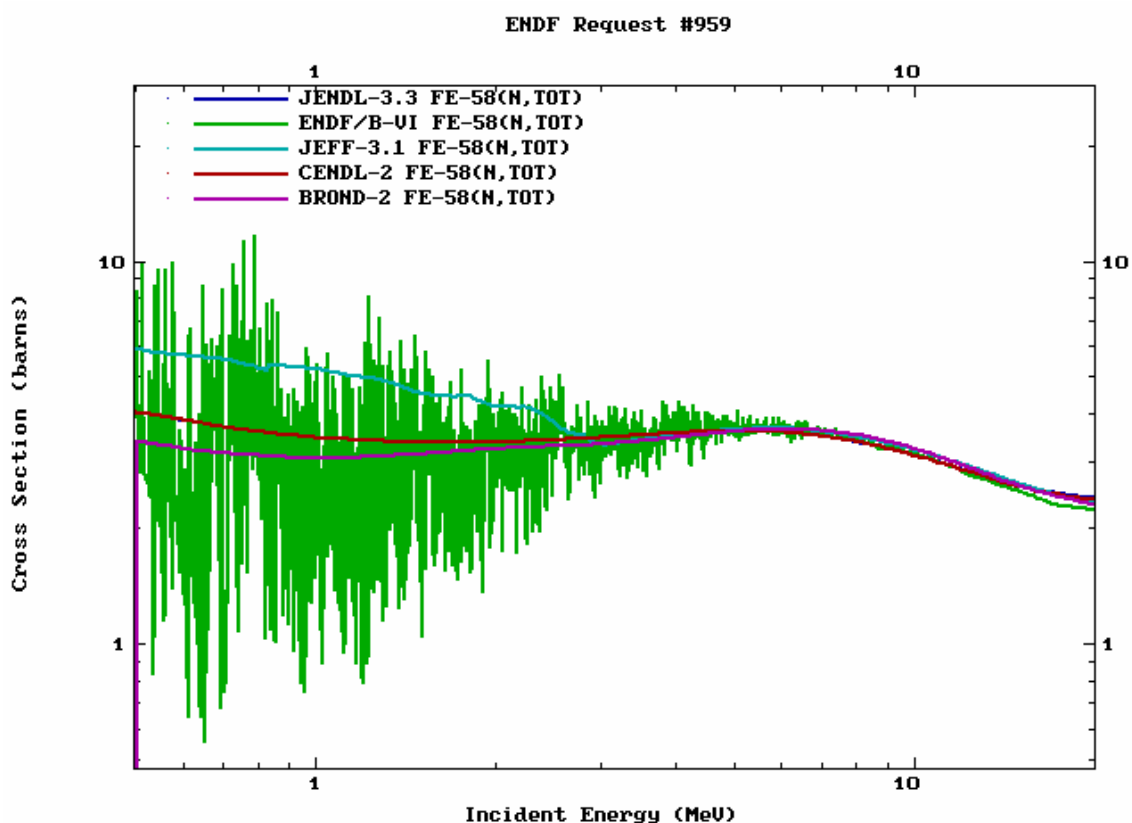


Рис. 3. Сравнение полных сечений из разных библиотек в быстрой области энергии нейтронов.

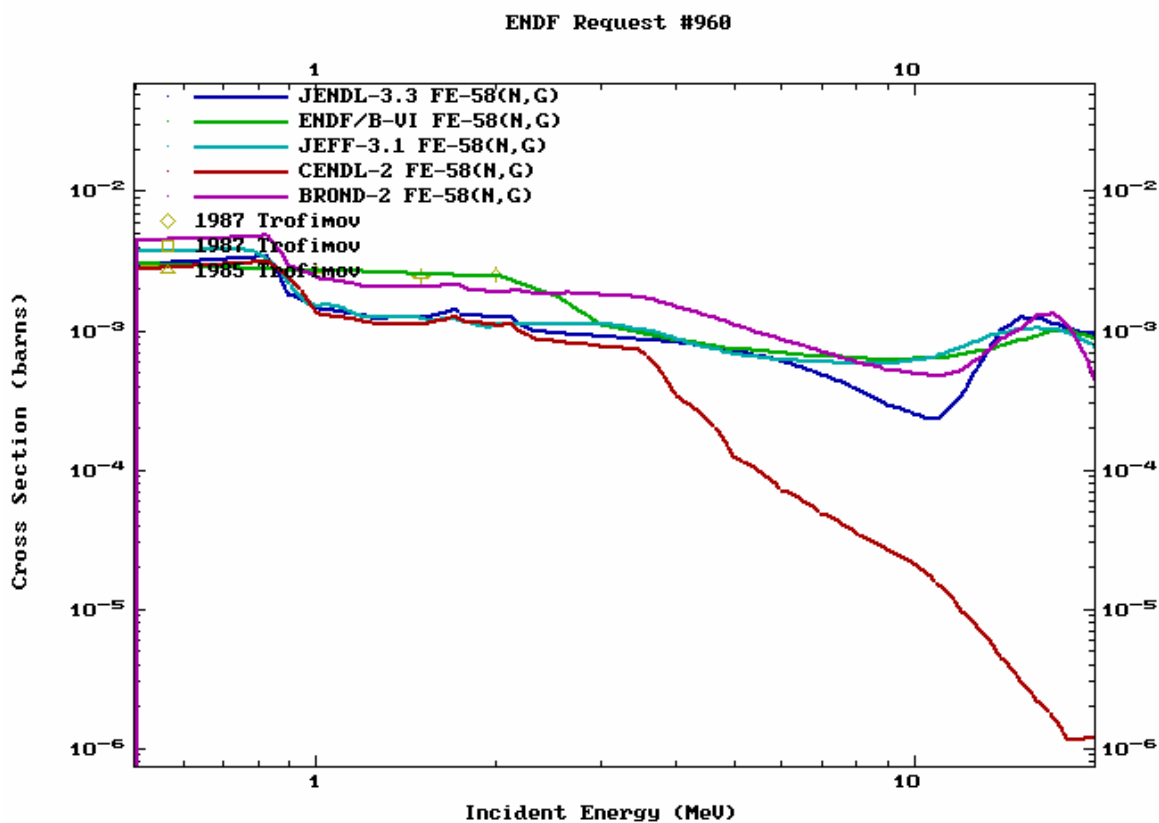


Рис. 4. Сравнение сечения захвата из разных библиотек в быстрой области энергии нейтронов.

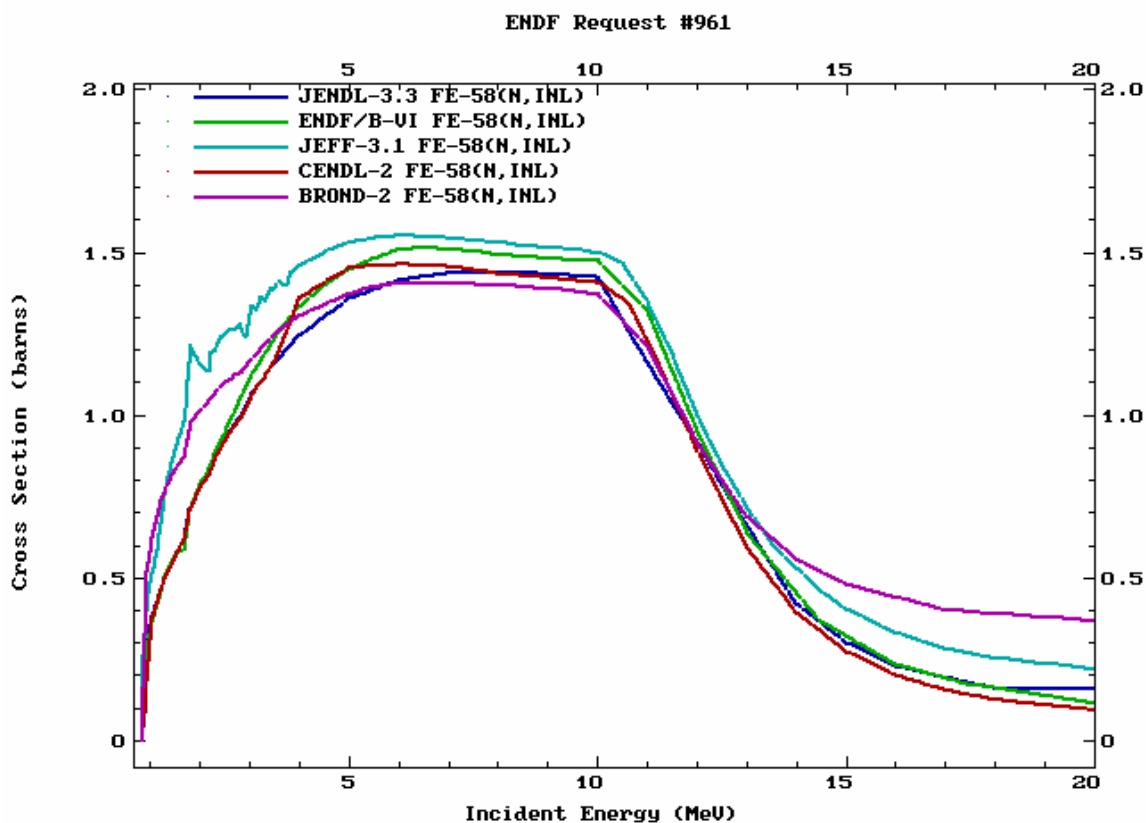


Рис. 5. Сравнение интегрального сечения неупругого рассеяния из разных библиотек.

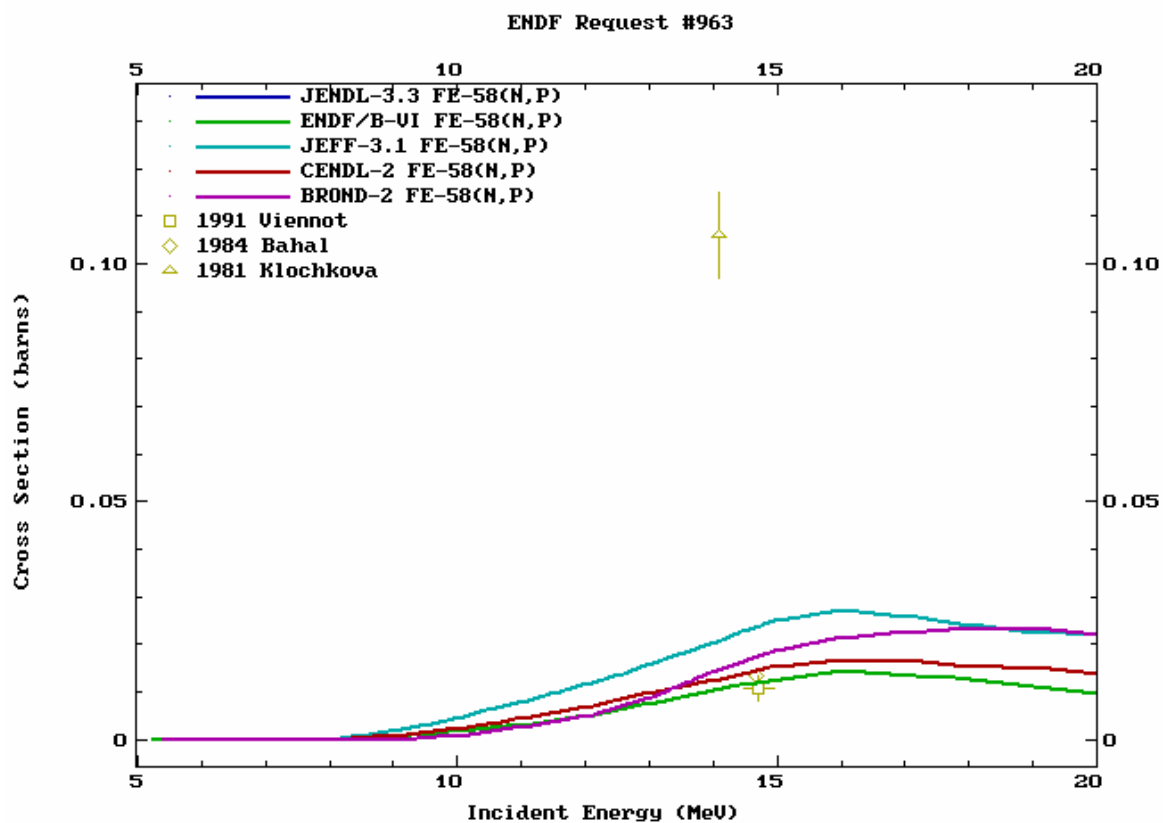


Рис. 6. Сравнение сечения (n,p) из разных библиотек с экспериментальными данными.

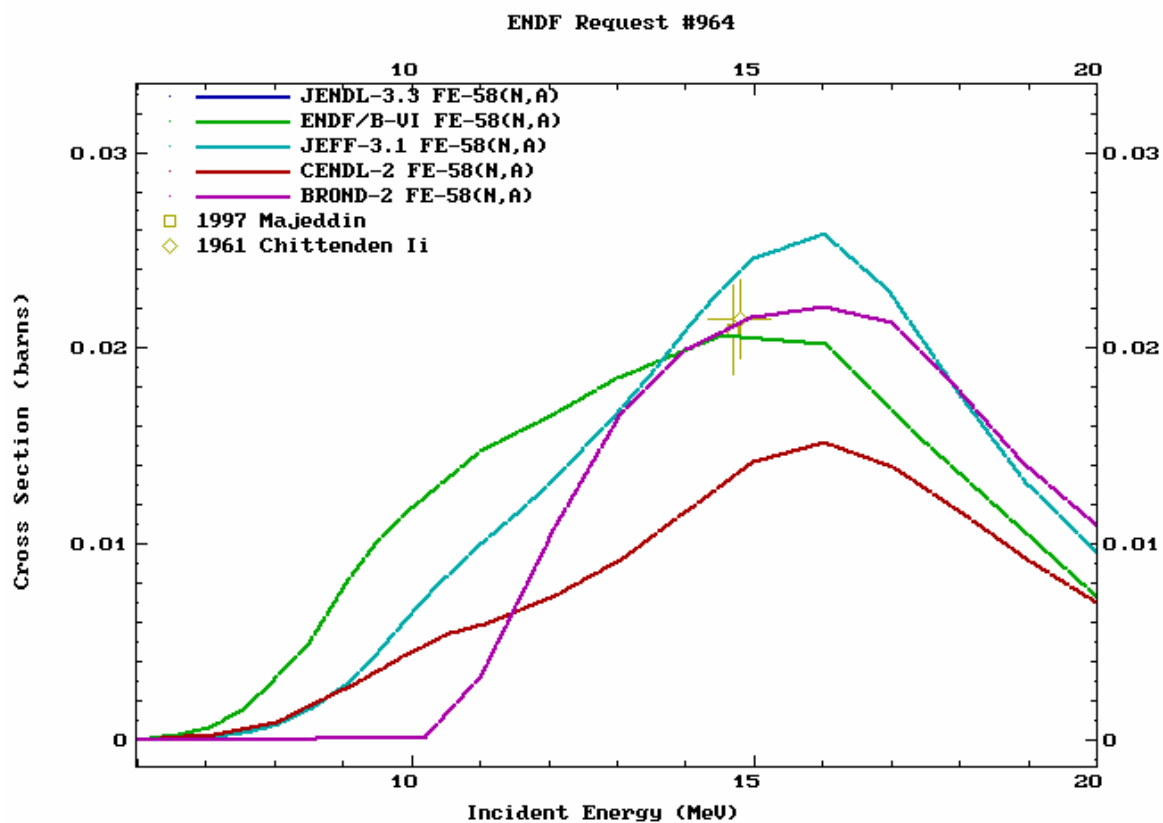


Рис. 7. Сравнение сечения (n,α) из разных библиотек с экспериментальными данными.

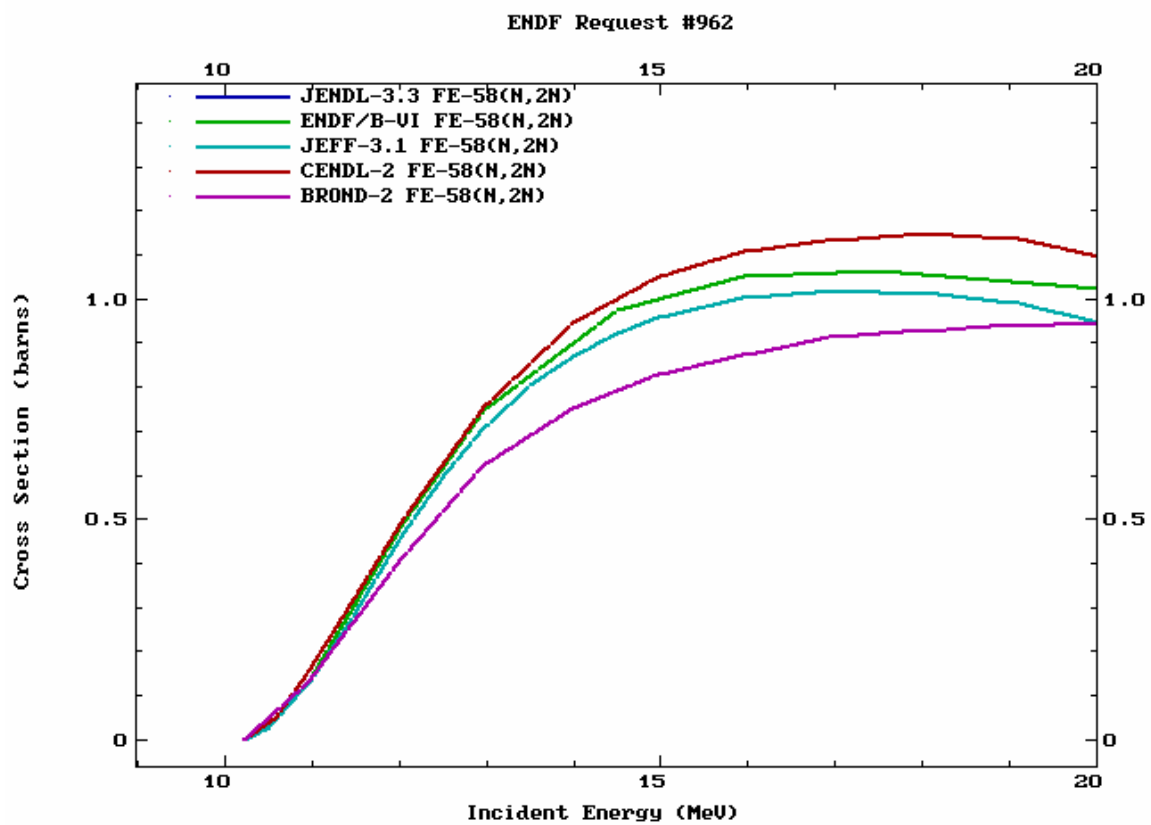


Рис. 8. Сравнение сечения $(n,2n)$ из разных библиотек.

4. Заключение

4.1 Вывод: Файл железа из библиотеки ENDF/B-7.b1 может быть рекомендован для библиотеки РОСФОНД.

4.2. Автор отбора оцененных данных

Проняев В.Г.

26.6. Железо-59

Радиоактивно. ($T_{1/2}=44.53$ дня) распадается β^- распад в кобальт-59.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка из EAF-2003. Поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на железе-59 не образуется, подсекции файла MF=10 просуммировать, суммы записать в соответствующие секции файла MF=3, а файлы MF=8 и MF=10 опустить.

26.7. Железо-60

Радиоактивно. ($T_{1/2}=1.E5$ лет) распадается β^- распад в кобальт-60.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка из EAF-2003. Поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на железе-60 не образуется, подсекции файла MF=10 просуммировать, суммы записать в соответствующие секции файла MF=3, а файлы MF=8 и MF=10 опустить