

42.МОЛИБДЕН

Молибден содержит 7 стабильных и два долгоживущих изотопа.

В ФОНД-2.2 для всех стабильных изотопов молибдена и для природного молибдена содержится оценка К.Косако, S. Chiba. Для Mo93 содержится оценка из EAF-99, для Mo-99 - оценка Манохина 1999 для JENDL-3.3.

В ENDF/B-VII для всех стабильных изотопов содержатся оценки Shenter, Schmittroth, 1979, которые составили файл и для природного молибдена.

В JENDL-3.3 для всех стабильных изотопов приняты оценки К. Kosako, S.Chiba, 1993. Для Mo-99 принята оценка, составленная специальной группой оценщиков данных для продуктов деления.

В JEFF-3.1. приняты те же оценки, что и в JENDL-3.3.

Помимо оценок из названных выше библиотек авторами обоснований данных для молибдена рассматривалась их собственная оценка, выполненная для библиотеки БРОНД-3.

42.1. Молибден-92

Содержание в естественной смеси -14.84%

1. Общие характеристики

1.1. Z=42

1.2. A=92

1.3. Aw=91.11730

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогом ниже 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	Е _{порог.} , МэВ	Ядро-продукт ^{*)}
04	n,n'	-1.5095	1.5260	Mo-92
16	n,2n	-12.6921	12.8314	Mo-91
22	n,nα	-5.6233	5.6851	Sr-88
28	n,np	-7.4656	7.5476	Nb-91
102	n,γ	8.0700		Mo-92
103	n,p	-0.4236	0.4282	Nb-92
104	n,d	-5.1536	5.2102	Nb-91
105	n,t	-11.0275	11.1485	Nb-90
106	n, ³ He	-4.8982	4.9520	Zr-88
107	n,α	3.7067		Zr-89

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

2.1 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время оценка JENDL-3.3 для разрешенных и неразрешенных резонансов включена в оценки JEFF-3.0(=JEFF-3.1), CENDL-3 и последнюю версию ENDF/B-VII. Так как нет экспериментальных данных, указывающих на недостатки этой оценки, то она включена также в оценку БРОНД-3.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи /1/ на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию /2/ и радиационному захвату нейтронов /2, 3, 4/. Эти параметры лишь незначительно отличаются от параметров, рекомендованных на Мугабгхабом и др. /5/. Верхняя граница резонансной области

принята равной 50 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.0$ фм [5] и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближение MLBW.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) равны:

полное = 5.566 б, упругое = 5.545 б, захвата = 0.021 б,
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: = 0.9428 б.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (60 \pm 7)$ кэВ, и для p-резонансов - $D_1 = (24 \pm 3)$ кэВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (2.4 \pm 0.4) 10^{-4}$ и $S_1 = (1.5 \pm 0.3) 10^{-4}$.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов часто привлекают анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 2. Данный анализ показывает, что в наблюдаемом наборе s-резонансов, по-видимому, пропущено 3 резонанса, тогда как в наборе p-резонансов имеется избыток примерно 5 «лишних» слабых резонансов, которые не соответствуют распределению Портера-Томаса в области малых ширин и которые следовало бы отнести к s- или d-резонансам. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они учтены в оценках погрешностей среднего расстояния между резонансами D_1 .

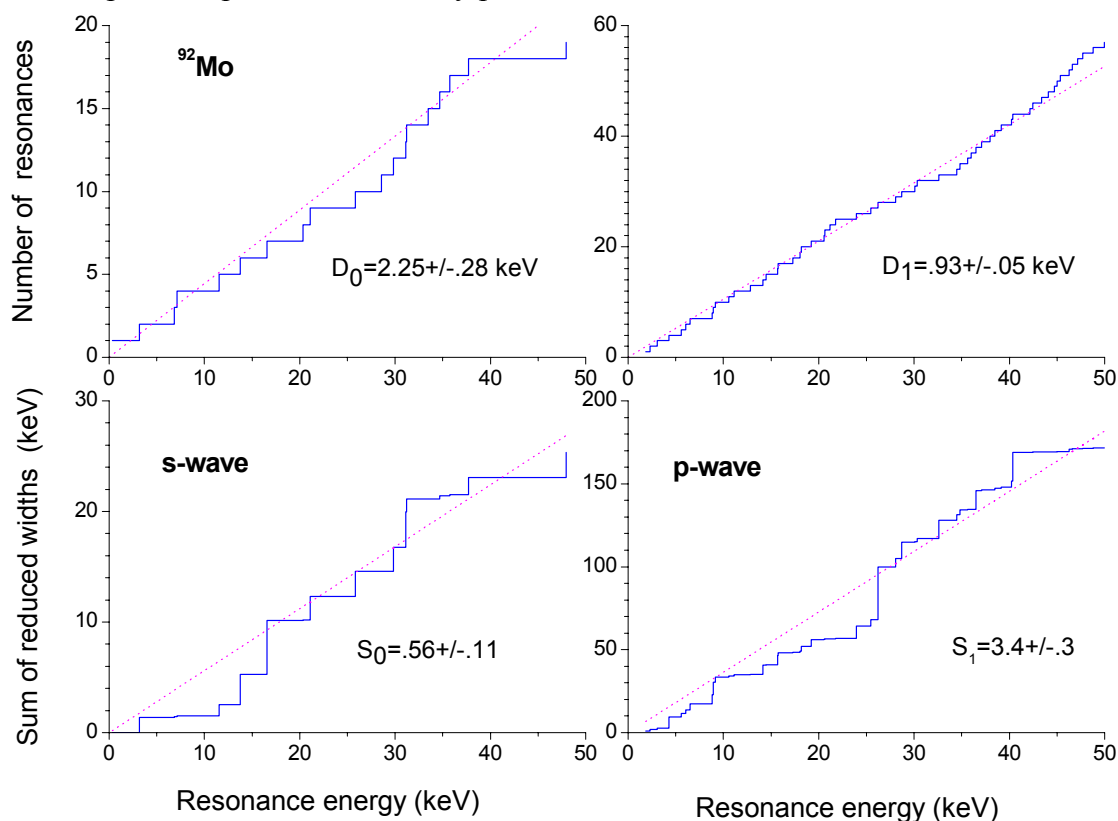


Рис. 1.

Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценке JENDL-3.3

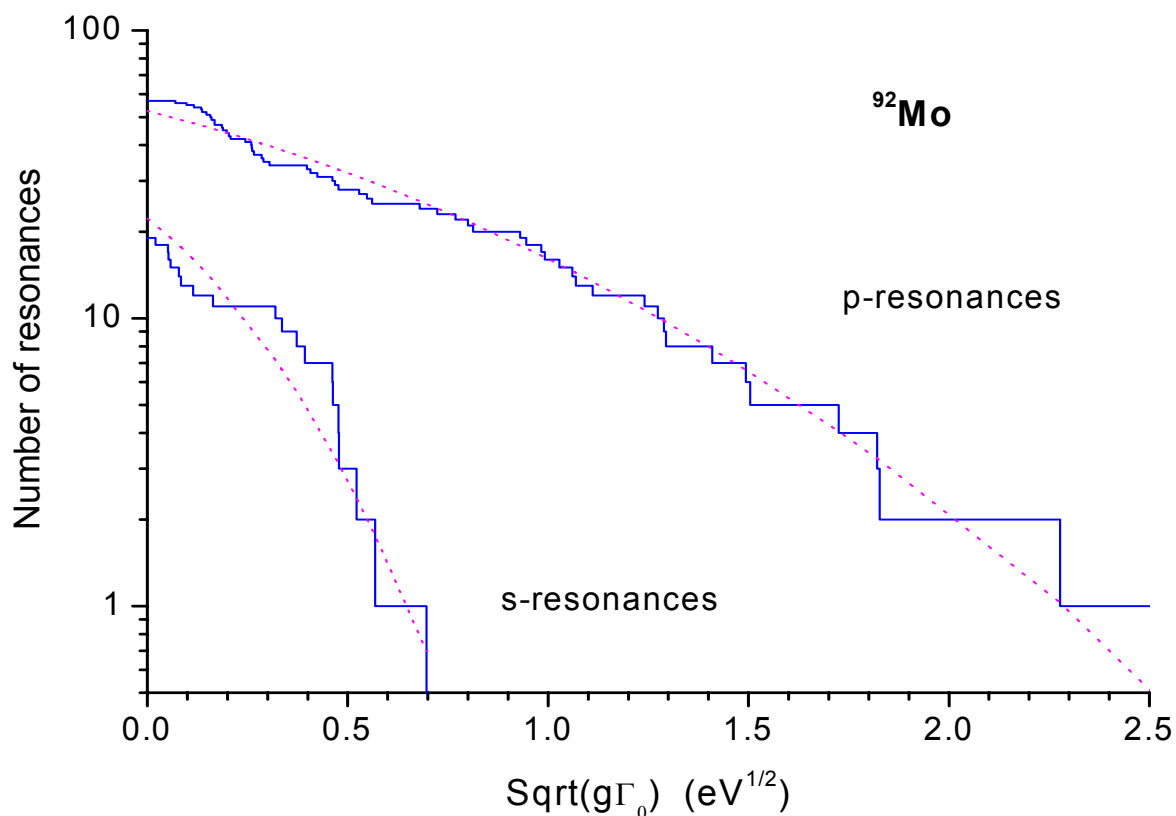


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов

Полные радиационные ширины определены для большинства резонансов, и средние значение ширины равны $\langle \Gamma_\gamma \rangle = 200$ мэВ для s-резонансов и $\langle \Gamma_\gamma \rangle = 425$ мэВ /1/.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B формула одноуровневого Брейта-Вигнера должна быть использована для расчета нейтронных сечений в области неразрешенных резонансов.

Нейтронные силовые функции S0, S1 и S2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ.

Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S0 = 0.369E-4$, $S1 = 5.479E-4$, $S2 = 0.364E-4$, $Gg = 0.226$ эВ, $D0 = 2252$ эВ, $R = 6.746$ фм

На рис. 3 и 4 оценка JENDL-3.3 для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с энергетической зависимостью оценки JENDL-3.3. В диапазоне энергий от 5.7 до 40 кэВ данные по сечениям радиационного захвата нейтронов измерены в работе [4], и оценка воспроизводит эти данные.

Проведенный анализ показал, что для области разрешенных и неразрешенных резонансов оценка JENDL-3.3 является оптимальной, она включена в оценку для БРОНД-3 и рекомендуется для включения в РОСФОНД без каких либо изменений.

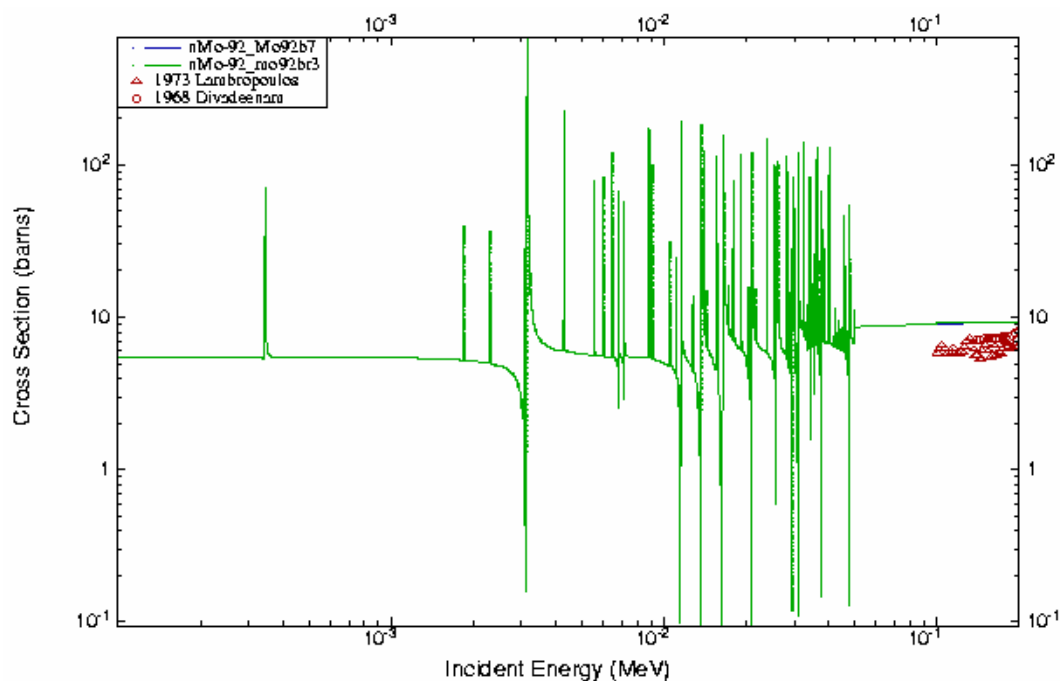


Рис. 3. Оценка полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными вне резонансной области

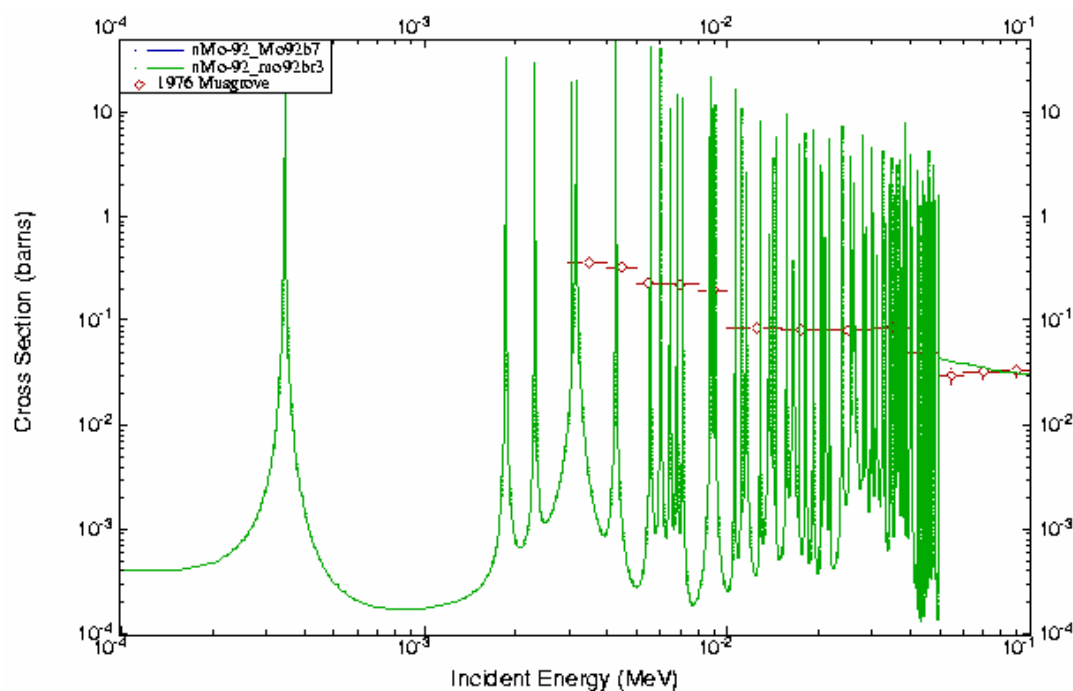


Рис. 4. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

Предварительно авторами оценки БРОНД-3 был исследован и оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния. Поскольку сечение реакции $(n,2n)$ достаточно хорошо известно из экспериментальных данных и основанной на них эмпирической систематики, теоретические расчеты сечений неупругого рассеяния проводились таким образом, чтобы получить согласованное описание функции возбуждения реакции $(n,2n)$ и оцененного вклада прямых процессов в области 20 МэВ. Полученные результаты по функциям возбуждения других пороговых реакций корректировались на основе предсказаний эмпирических систематик.

Оцененные данные функции возбуждения неупругого рассеяния для одного изотопа сравнивались с данными для других изотопов данного элемента и изотопов соседних ядер, чтобы получить согласованное описание сечений для всех изотопов молибдена с учетом эмпирической тенденции изменения максимального сечения реакции неупругого рассеяния в зависимости от атомного номера и атомного веса изотопа.

Полученные результаты сравнивались данными библиотек ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Поскольку в библиотеке JEFF-3.1 для изотопов молибдена приняты данные библиотеки JENDL-3.3, сравнение производилось главным образом с данными библиотеки JENDL-3.3. В библиотеке ENDF-B7 в большинстве случаев также приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Поэтому сравнение с ENDF/B-VII проводилось только тех реакций, данные для которых отличаются от данных JENDL-3.3.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин на основе подхода работы /20/. Нейтронные коэффициенты проницаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней 2+ и 3-. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /21/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /21/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 4 дано полное сечение Mo-92 вне резонансной области энергий нейтронов. В области 0.1-0.4 кэВ оценка БРОНД-3 лежит выше оценок JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, которые в этой области совпадают. Экспериментальные данные в этой области чрезвычайно разбросаны, оцененные данные получены с помощью разных параметров оптического потенциала, поэтому трудно отдать предпочтение какой-либо из упомянутых оценок. В области 2-6 МэВ данные БРОНД-3 и ENDF/B-VII лучше согласуются с экспериментальными данными по сравнению с оценкой библиотеки JENDL-3.3. Во всей области 0.1 – 20 МэВ рекомендуется оценка из БРОНД-3.

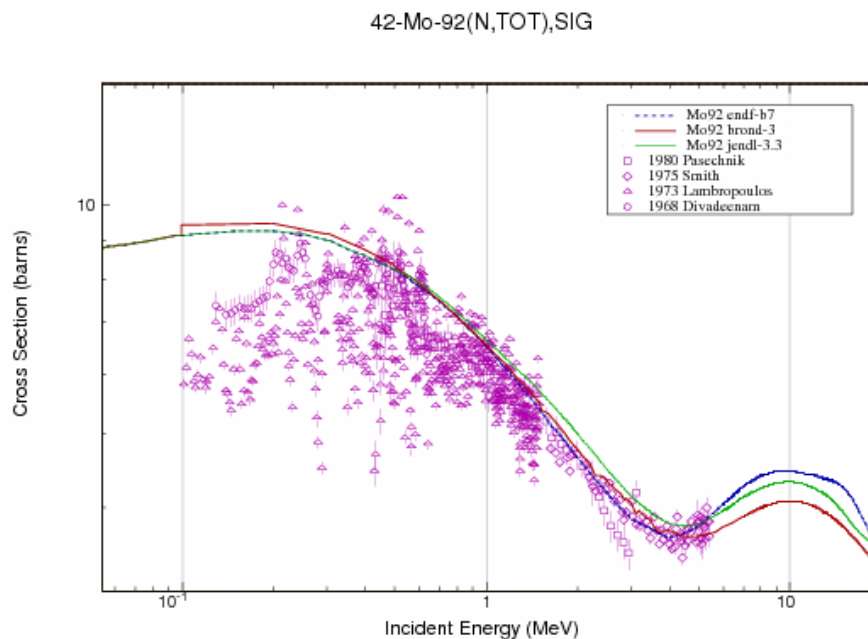


Рис. 4. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 5 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния на изотопе Мо-92 с экспериментальными данными. Как видно, сечение упругого рассеяния в области энергий до 1 МэВ в библиотеках ENDF/B-VII и JENDL-3.3 совпадают. Оценка BROND-3 в области энергий 100-300 кэВ данные BROND-3 лежат несколько выше, что связано с более высоким сечением в этой области полного сечения (см. рис.4). В диапазоне 1-3 МэВ оценки ENDF/B-VII и BROND-3 практически совпадают, оценка JENDL-3.3 лежит заметно выше. При более высокой энергии экспериментальных данных нет, достоверность любой из указанных оценок оценить трудно.

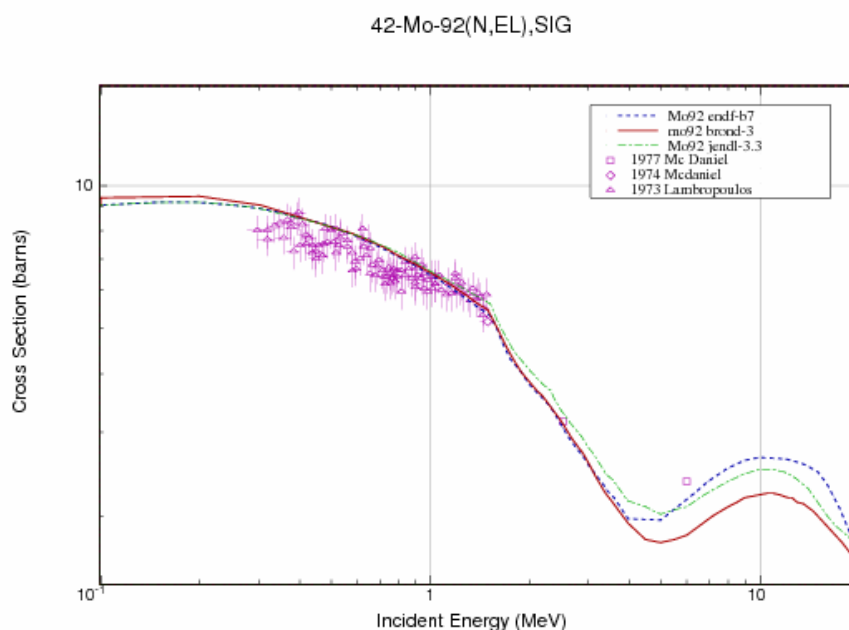


Рис.5. Сечение упругого рассеяния в области 0.1-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-66).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты, и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведены схемы низколежащих уровней Mo-92, используемые в оценках JENDL-3.3 и БРОНД-3.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 1.6666 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.000000				
1	1.50950	2+	1 → 0	1.50949	100
2	2.28260	4+	2 → 1	0.77304	100
3	2.51970	0+	3 → 1	1.01022	100
4	2.52710	5-	4 → 2	0.24442	100
5	2.61240	6+	5 → 2 5 → 4	0.32971 0.0851	87.0 13.0
6	2.76040	8+	6 → 5	0.14780	100
7	2.84970	3-	7 → 1 7 → 2	1.34025 0.56705	84.0 16.0
8	3.00700	5-	8 → 4	0.48008	100
9	3.06410	4-	9 → 4	0.53707	100
10	3.09130	2+	10 → 0 10 → 1	3.0912 1.5819	81.0 19.0
11	3.36910	4+	11 → 2 11 → 4 11 → 8 11 → 9	1.0864 0.8421 0.3623 0.3048	25.0 25.0 25.0 25.0
12	3.54199	2+	12 → 0 12 → 1	3.5414 2.0325	14.0 86.0
13	3.58029	3-	13 → 2 13 → 4	1.2976 1.0534	43.0 57.0
14	3.62120	4+	14 → 1	2.1117	100
15	3.62480	7-	15 → 4	1.0974	100
16	3.68800	4+	16 → 1 16 → 7	2.17848 0.8383	52.0 48.0
17	3.68801				

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния (кроме одной точки при 15 МэВ) нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций и практически совпадают. Данные BROND-3 лежат существенно выше, что объясняется использованием другой программы для расчета (модифицированной программы GNASH) и параметров несферической оптической модели. Учитывая более корректный подход в расчетах по программе GNASH интегральное сечение неупругого рассеяния из библиотеки BROND-3 предпочтительнее.

На рис. 4-5 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первых двух уровнях, где имеются экспериментальные данные. Для первого уровня оцененные функции примерно равнозначны, а для второго уровня функция BROND-3 лежит выше и лучше описывает экспериментальные данные.

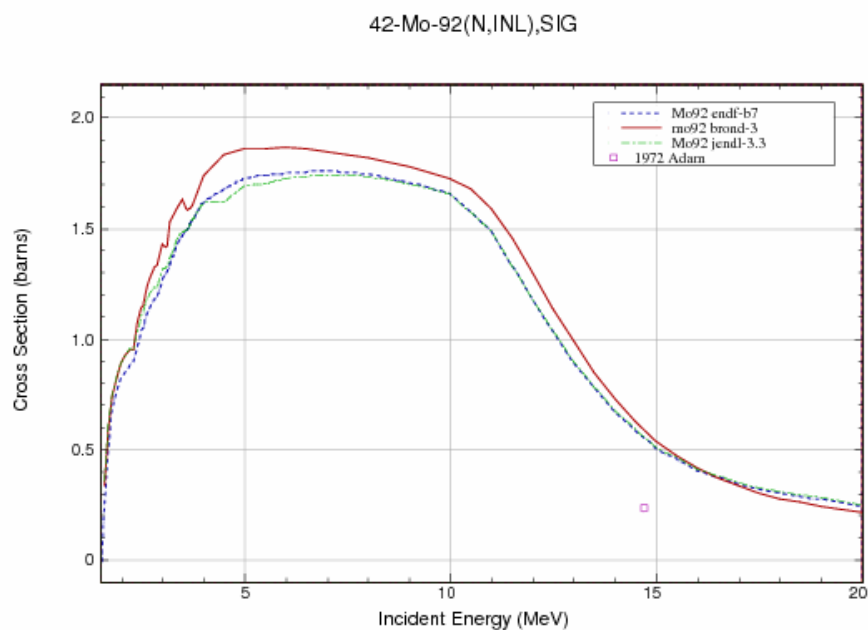


Рис.6. Полное сечение неупругого рассеяния Мо-92.

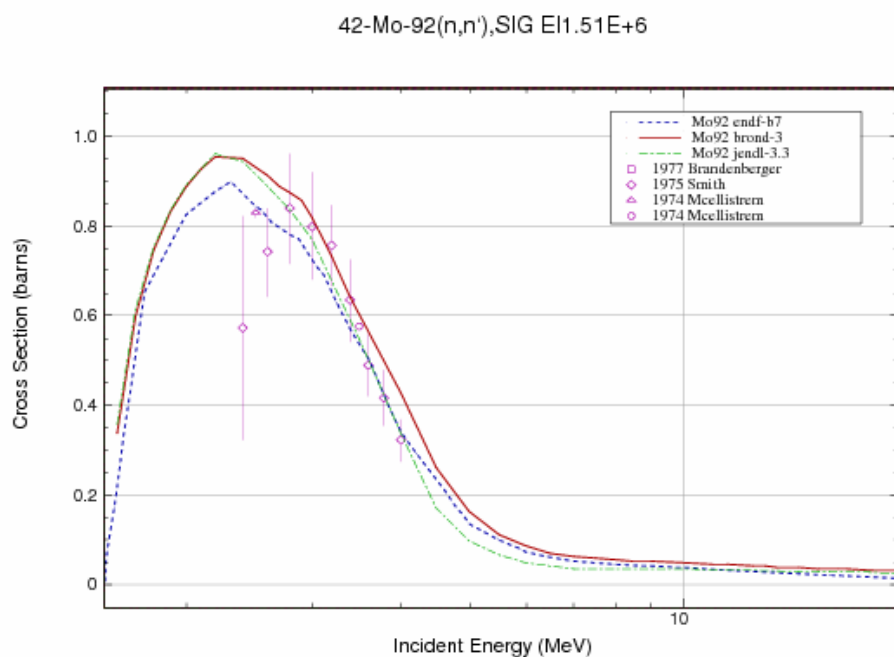


Рис. 7. Функция возбуждения первого уровня Мо-92 с энергией 1.5095 МэВ.

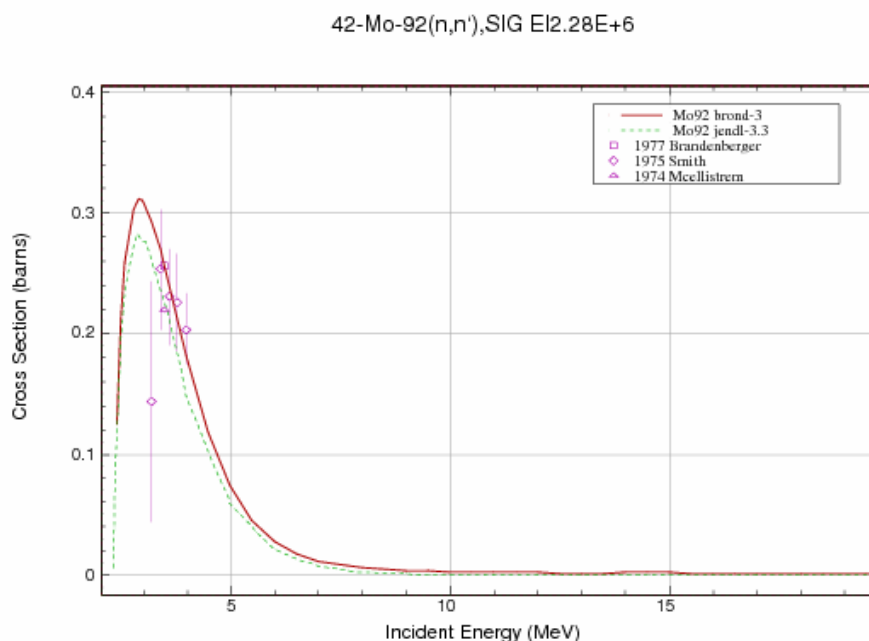


Рис. 8. Функция возбуждения второго уровня Мо-92 с энергией 2.2826 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Мо-92 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. Расчеты согласованы с экспериментальными данными работы /4/. Однако в области выше 0.1 МэВ данные BROND-3 и JENDL-3.3 различаются, и кривая JENDL-3.3 выглядит предпочтительнее. Данные ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3. Желательно провести коррекцию сечения из БРОНД-3 с целью лучшего согласования с экспериментальными точками в области 100-200 кэВ. Однако рекомендуется сечение BROND-3, поскольку оно получено согласованно с рекомендованными выше сечениями для полного, упругого и неупругого рассеяния.

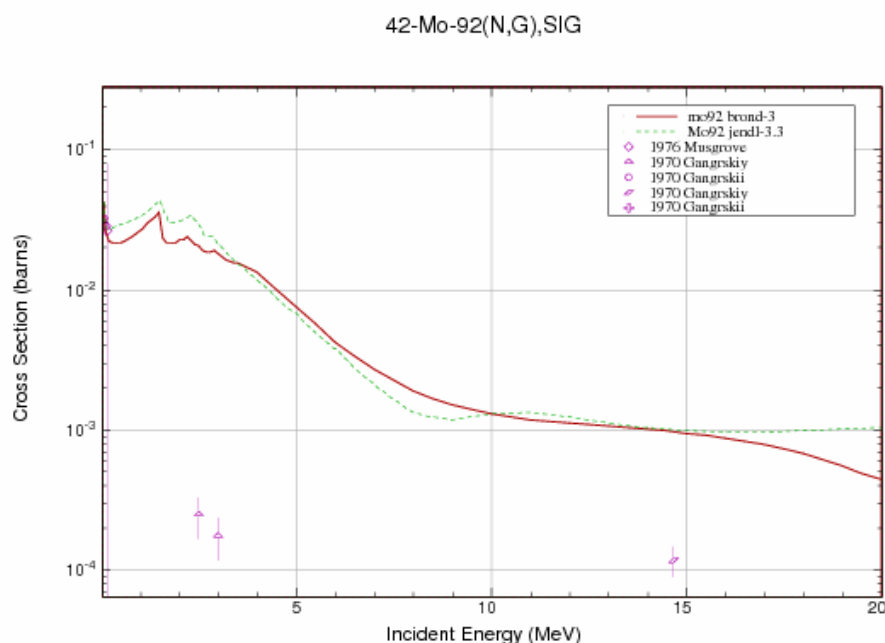


Рис. 9. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 10 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3 в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, обе оценки близки и согласуются с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [15]. Могут быть рекомендованы данные обеих библиотек.

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

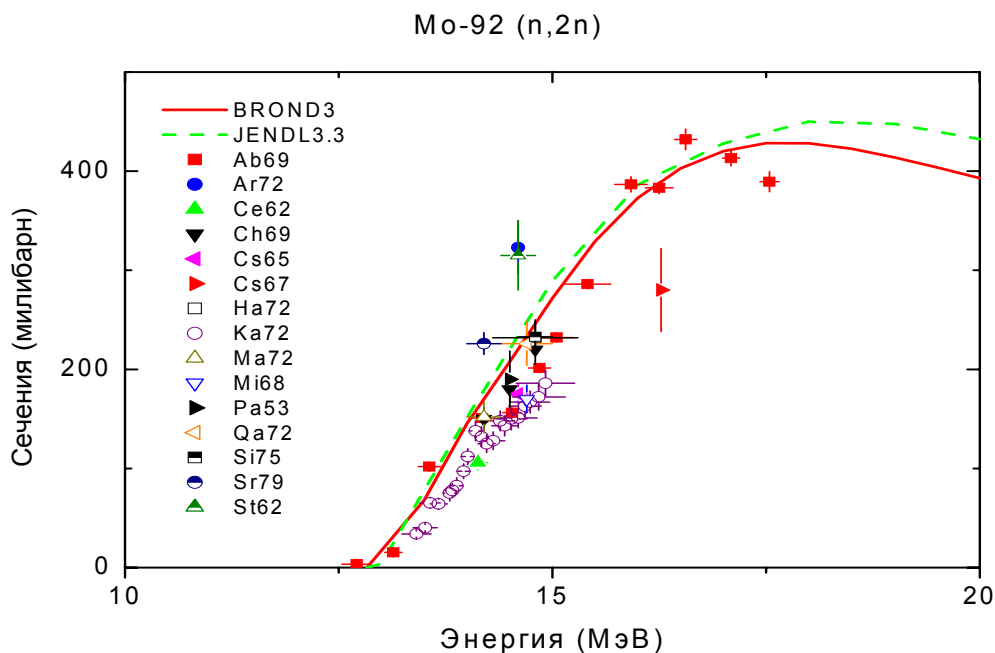


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n). JENDL-3.3

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104, 105 и 107):

На рис. 11 показано сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,p)$. Имеется только один набор противоречивых экспериментальных данных. Оцененные данные библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Форма функции возбуждения не соответствует физическим представлениям и эмпирическим систематикам [15,16]. Оценке функции возбуждения из БРОНД-3 следует отдать предпочтение, она согласуется с систематикой сечений реакции (n,p) [15,16], а ее форма согласована с формой кривой для изомера, где имеется достаточно много экспериментов и форма определена вполне четко.

На рис. 12 дано сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF/B-VII приняты из библиотеки JENDL-3.3. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), полученные расчетным путем, существенно не согласуются с единственной экспериментальной точкой работы Хайта. Это связано с недостаточным учетом вклада прямого процесса. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит ближе к экспериментальной точке.

Сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,t)$ в библиотеках BROND-3 и ENDF/B-VII взято из JENDL-3.3.

На рис.13 представлено сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с экспериментальными данными.

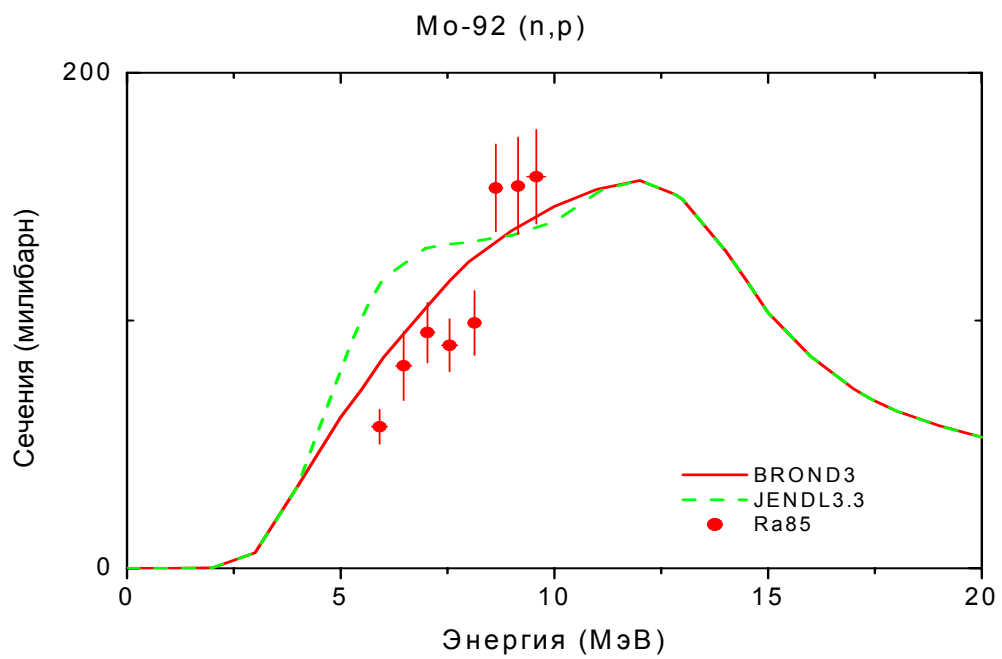


Рис. 11. Сечение реакции (n,p)

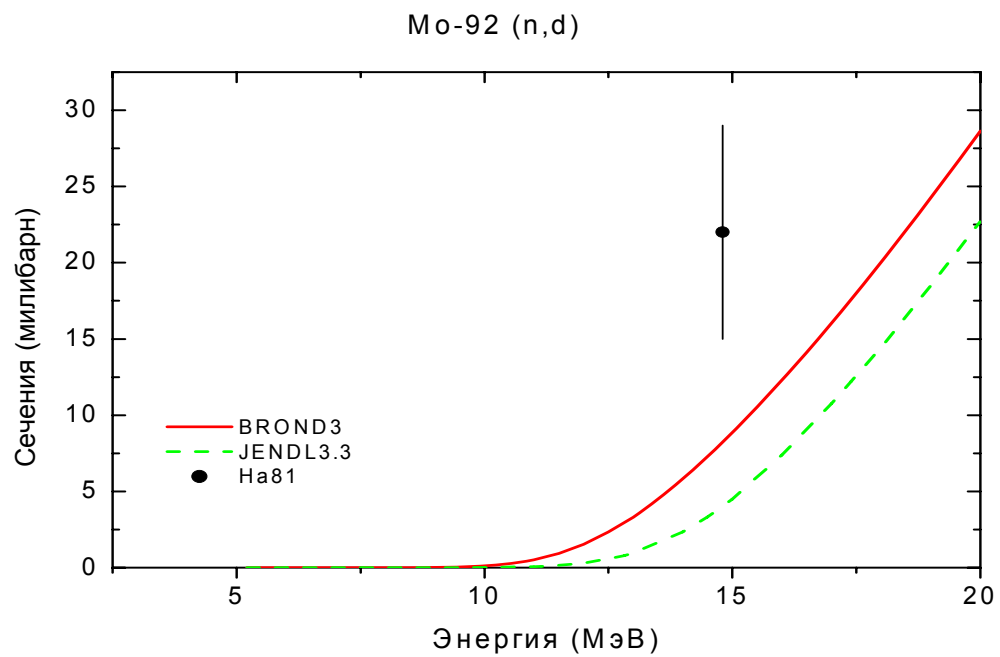


Рис.12. Сечение реакции (n,d).

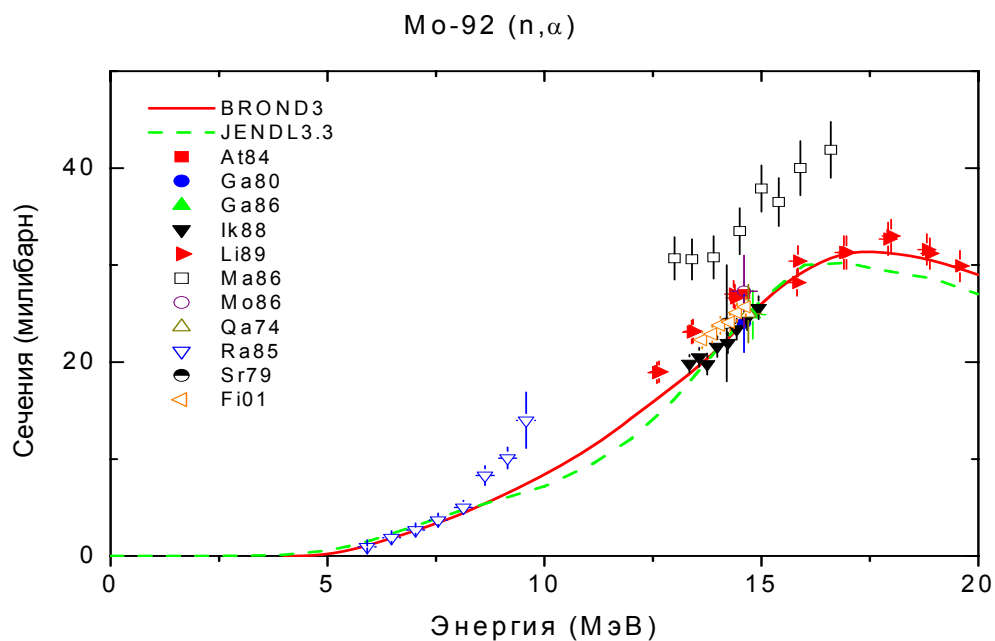


Рис. 13. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

Для этих реакций практически нет экспериментальных данных. Оценки реакций (n,nα) и (n,np) в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Различия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 14 дано сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны, однако зависимость из БРОНД-3 предпочтительнее, она несколько лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции (n,2n).

На рис.15 дано сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,n\alpha)$. В БРОНД-3 принята и рекомендуется функция возбуждения из библиотеки JENDL-3.3, так как она согласуется с сечением реакции (n,α) и с систематикой реакции (n,nα). Приведенные на рисунке экспериментальные точки относятся к реакции (n,xα).

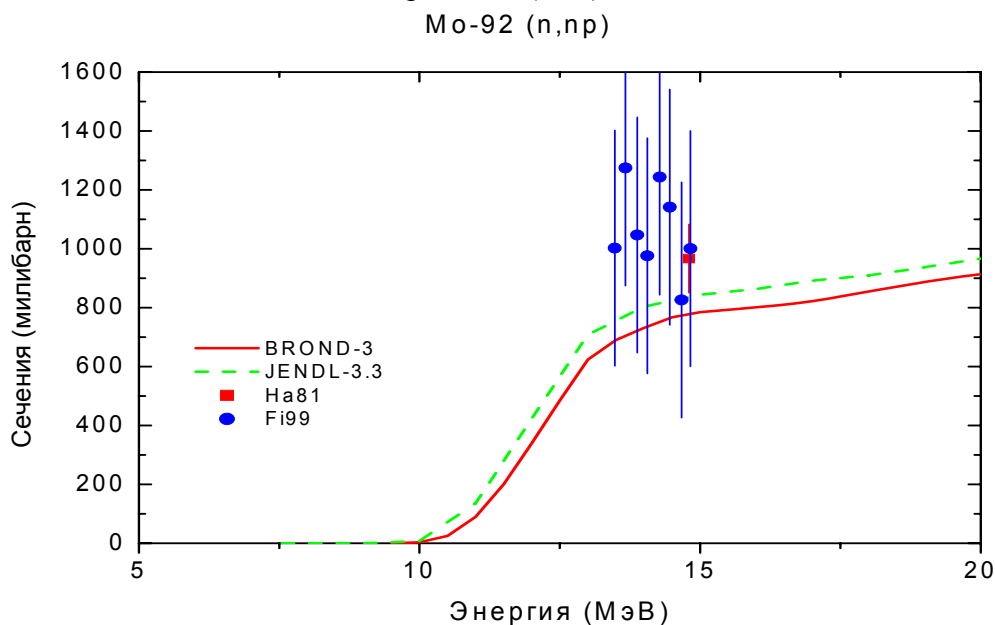


Рис. 14. Сечение реакции (n,np).

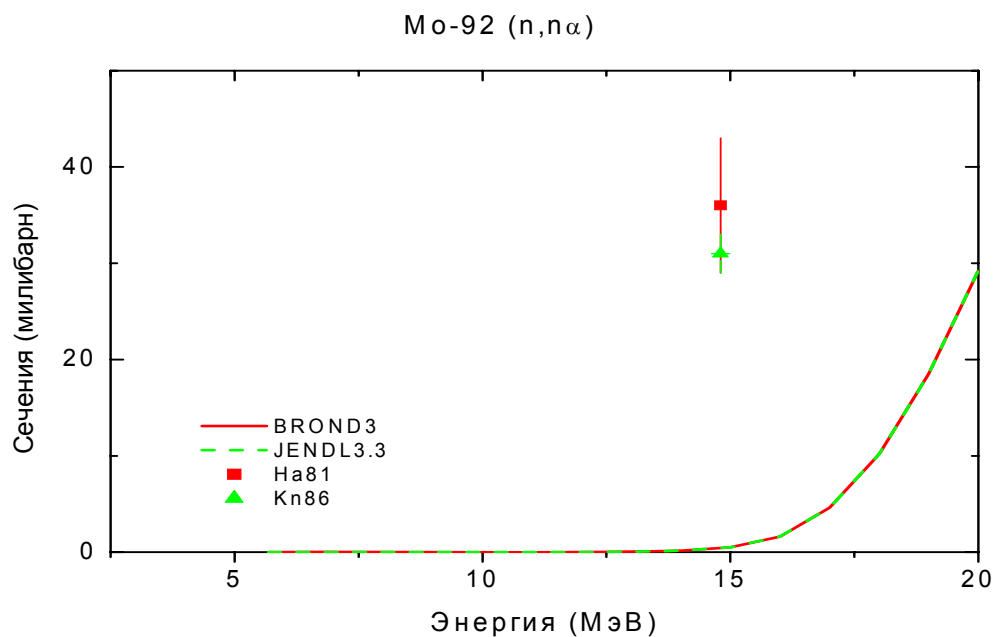


Рис. 15. Сечение реакции $(n,n\alpha)$.

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/ 6/. На рис.16-17 показаны угловые распределения из БРОНД-3 и JENDL-3.3 с экспериментальными данными.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

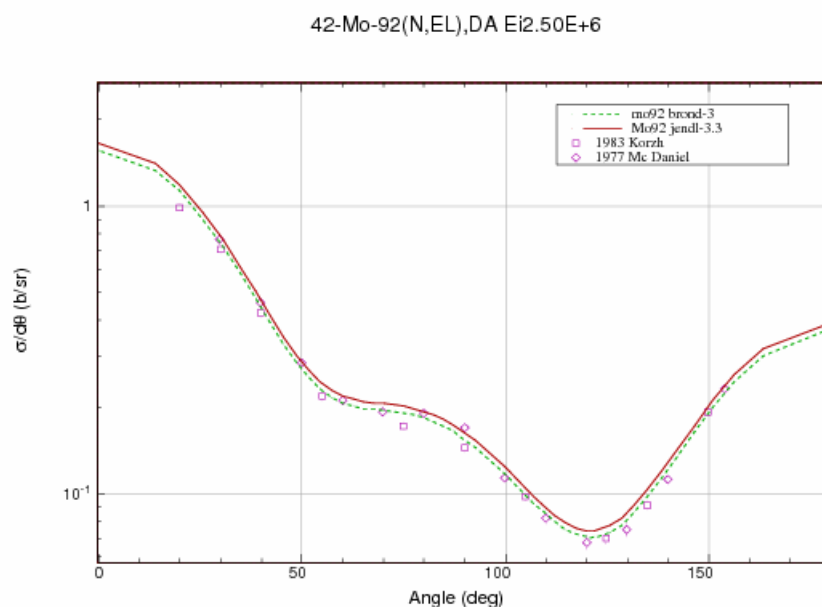


Рис. 17. Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов с энергией 2.5 МэВ

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy /6/ и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6)

MT=16,22,28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов взяты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /17/.

6. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

8. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=3, 102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/6/

Литература:

1. Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).
2. Wasson, O.A. et. al.: Phys. Rev., c7, 1532(1973).
3. Weigmann, H. et. al.: 1971 Knoxville, 749(1971).
4. Musgrove, A.R.De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).
5. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
6. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
7. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
8. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
9. Koning, A.J., Dalaroche, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
10. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
11. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
12. Dietrich. S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1988) 199.
13. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
14. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
15. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
16. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. Kumabe, I. et al. Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
18. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: ucl.Sci.Eng., 32, 178(1968).
19. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).
20. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
21. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.

Перечень использованных экспериментальных работ

Полное сечение

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Pa80	M.V.Pasechnik	C,80Kiev,1,304,1980	40617	4.58+05	3.12+06	54
Sm75	A.B.Smith	J,NP/A,244,213,1975	10524	1.64+06	5.51+06	88
La73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	1.01+05	1.50+06	594
Di68	M.Divadeenam	J,DA/B,28,3834,1968	10523	1.30+05	6.40+05	103

. Сечение радиационного захвата

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
GI89	A.D.Gedeonov	J,IP,25,(7),294,1989	41059	2.53-02		1
Mu76	A.R.Del.Musgrove	J,NP/A,270,108,1976	30357	3.0+03	2.0+05	15
Ga70	Yu.P.Gangrskiy	J,YF,12,1117,1970	41327	2.50+06	3.0+06	2
Ga70	Yu.P.Gangrskii	J,YF,12,1117,1970	88027	2.50+06	3.0+06	2
Ga70	Yu.P.Gangrskiy	J,YF,12,1117,1970	41327	1.47+07		1
Ga70	Yu.P.Gangrskii	J,YF,12,1117,1970	88027	1.47+07		1

. Сечение упругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
McDaniel77	F.D.McDaniel	P,A-KTY-74/77,3,1977	10770 12782	2.52+06 6.00+06		1 1
McDaniel74	F.D.McDaniel	J,PR/C,10,1087,1974	10391	1.50+06		1
La73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	3.0+05	1.5+06	130

Сечение неупругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Ad72	A.Adam	J,NP/A,180,587,1972	10237	1.47+07		1

Сечение реакции (n,2n)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Sr79	R.Srinivasa	C,79Knoxvill,848	30576	1.4+07		1
Bo76	M.Borrmann	J,ZP,277,2(1976)203	20614	1.3+07	1.8+07	10
Si75	R.A.Sigg	J,JIN,37(1975)631	10477	1.5+07		1
Qa72	S.Qaim	J,NP/A,185(1972)614	20536	1.5+07		1
Ha72	S.S.Hasan	J,NP/A,181(1972)101	30041	1.5+07		1
Ma72	Г.Н.Маслов	J,YK-9(1972)50	40136	1.4+07		1
Ka72	Y.Kanda	J,NP/A,185(1972)177	20338	1.3+07	1.5+07	
Ar72	J.Araminowich	R, INR-1464(1972)14	30264	1.5+07		1
Ch69	A.Chatterjee	C,69Roorke,2,117(1969)	30612	1.4+07	1.5+07	3
Ab69	A.Abboud	J,NP,139(1969)42	30028	1.3+07	1.8+07	13
Mi68	B.Minetti	J,NP,118(1968)449	20891	1.5+07		1
Ch67	J.Chikai	J,AHP,23(1967)87	30033	1.6+07		1
Ch65	J.Chikai	C,EANDC-50,102(1965)	30038	1.5+07		1
Ce62	M.Cevolani	J,NC,26(1962)1328	21266	1.4+07		1
St62	F.Strohal	J,NP,30(1962)49	30008	1.4+07		1
Pa53	E.B.Paul	J,CJP,31(1953)267	11274	1.5+07		1

Сечение реакции (n,a)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Fi01	A.A.Filatenkov	J,YK-2(1998)10	41240	1.3+06	1.5+06	7
Li90	H.Liskien	J,ARI,41(1990)83	22125	1.3+07	2.0+07	15
Ik88	Y.Ikeda	R,,JAERI-1312(1988)	22089	1.3+07	1.5+07	7
Mo86	N.I.Molla		30985	1.4+07	1.5+07	5
Ma86	A.Marcinkowski		30940	1.3+07	1.7+07	8
Ga86	I.Garlea	R,INDC(ROM)-17(1986)	30749	1.5+07		1
Ra85	M.Rahman	J,NP/A,435(1985)43	21990	5.9+06	9.6+06	8
Atsumi84	H.Atsumi	R,NEANDC(J)106	21935	1.5+07		1
Garuska80	U.Garuska	R,INR-1871(1980)15	30553	1.5+07		1
Srinivas79	R.Srinivasa	C,79Knoxvill,848	30576	1.4+07		1
Qaim 74	S.Qaim	C,77Geel,327(1977)	20513	1.5+07		1
Kanda72	Y.Kanda	J,NP/A,185(1972)177	20338	1.3+07	1.5+07	

Сечение реакции N,P

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Rahman85	M.Rahman	J,NP/A,435(1985)43	21990	5.9+06	9.6+06	8
Strohal62	F.Strohal	J,NP,30(1962)49	30008	1.4+07		1

Сечение реакции N,NP

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Filat99	A.A.Филатенков	R, RI-252, 1999	41240	1.30+07	1.50+07	8
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.48+07		1

Сечение реакции N,D

	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.48+07		1

10. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности **нейтронных сечений**. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения **неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций.** Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в **БРОНД-3**.

Целесообразно включить файла **БРОНД-3** для **Мо-92** в библиотеку **РОСФОНД**.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.2. Молибден -93

Радиоактивен. ($T_{1/2}=4.0 \cdot 10^3$ лет) Испытывая захват орбитального электрона, распадается в изомер ниобия-93. Тот, в свою очередь испытывает изомерный переход в основное состояние ($T_{1/2}=16.13$ лет)

В библиотеках нейтронных данных для расчета переноса файлов для молибдена-93 не содержится несмотря на то, что этот долгоживущий изотоп может накапливаться в реакторах за счет радиационного захвата в ^{92}Mo (14.84%). Экспериментальная информация о сечениях взаимодействия нейтронов с ^{93}Mo отсутствует. Данные о сечениях, оцененные расчетным путем и на основе полуэмпирических систематик содержатся в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять данные из последней версии библиотеки EAF-2003 (MAT=4228) со следующими изменениями:

1. Присвоить MAT=4293.
2. Файл MF=8 опустить.
3. Данные о нейтронных сечениях реакций с образованием конечного ядра в основном и изомерном состояниях, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы перенести в файл MF=3.
4. Ввести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров ниобия ($^{91}\text{Nb}^m$, $^{92}\text{Nb}^m$ и $^{93}\text{Nb}^m$), получив их на основе информации, содержащейся в файле MF=10.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

42.3. Молибден-94

Содержание в естественной смеси: 9.25 %.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=94$

1.3. $A_w=93.09840$

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогом ниже 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$, МэВ	Ядро-продукт ^{*)}
04	n, n'	-0.8711	0.8805	Mo-94
16	$n, 2n$	-9.6726	9.7765	Mo-93
17	$n, 3n$	-17.7480	17.9255	Mo-92
22	$n, n\alpha$	-2.0722	2.0945	Zr-88
28	n, np	-8.4920	8.5832	Nb-93
102	n, γ	7.3690		Mo-94
103	n, p	-1.2627	1.2763	Nb-94
104	n, d	-6.1868	6.2533	Nb-93
105	n, t	-8.8387	8.9336	Nb-92
106	$n, {}^3\text{He}$	-6.8120	6.8852	Zr-90
107	n, α	5.1344		Zr-91

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

2.2 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время оценка JENDL-3.3 для разрешенных и неразрешенных резонансов включена в оценки JEFF-3.0(=JEFF-3.1), CENDL-3 и последнюю версию ENDF/B-VII. Так как нет экспериментальных данных, указывающих на недостатки этой оценки, то она включена также в оценку БРОНД-3.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи /1/ на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию /2/ и радиационному захвату нейтронов /2, 4/. Эти параметры лишь незначительно отличаются от параметров, рекомендованных Мугабгабом и др. /5/. Верхняя граница резонансной области принята равной 20 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.2$ фм /5/ и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближение MLBW. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин: 135 мэВ для s-резонансов и 175 мэВ для p- резонансов.

В 2004 г. Мугабгаб пересмотрел параметры разрешенных резонансов /17/. Наиболее существенным является уменьшение в 2 раза нейтронных ширины p-резонансов с энергией 4.368 и 10.225 кэВ, а также добавление отрицательного s-резонанса, связанное со значительным увеличением сечения радиационного захвата тепловых нейтронов. Были также несколько уменьшены радиационные ширины всех s-резонансов, и радиус потенциального рассеяния принят равным 6.9 фм. Пересмотренные параметры резонансов были включены в оценку ENDF/B-VII.

Радиационные ширины резонансов, использованные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Хорошо видны небольшие смещения ширин s-резонансов и различие средних ширин p-резонансов, которые приняты для резонансов, не имеющих прямой экспериментальной информации.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

оценка	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	Эксперимент /17/.
полное	6.011 б	6.164 б	
упругое	5.998 б	5.824 б	
захвата	0.0131 б	0.340 б	
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ:	1.400 б	1.730 б	0.82±0.12

Обращает на себя внимание большое различие сечений захвата тепловых нейтронов, и увеличение резонансного интеграла захвата в оценке ENDF/B-VII непосредственно обусловлено увеличением теплового сечения. Расхождение экспериментальных значений интеграла захвата /5/ с результатами измерений параметров разрешенных резонансов известно давно, но ему нет удовлетворительного объяснения. Экспериментальных данных по сечениям захвата тепловых нейтронов нет, и поэтому не ясно, чем руководствовался Мугабгаб при выборе параметров отрицательного резонанса, определяющего тепловые сечения.

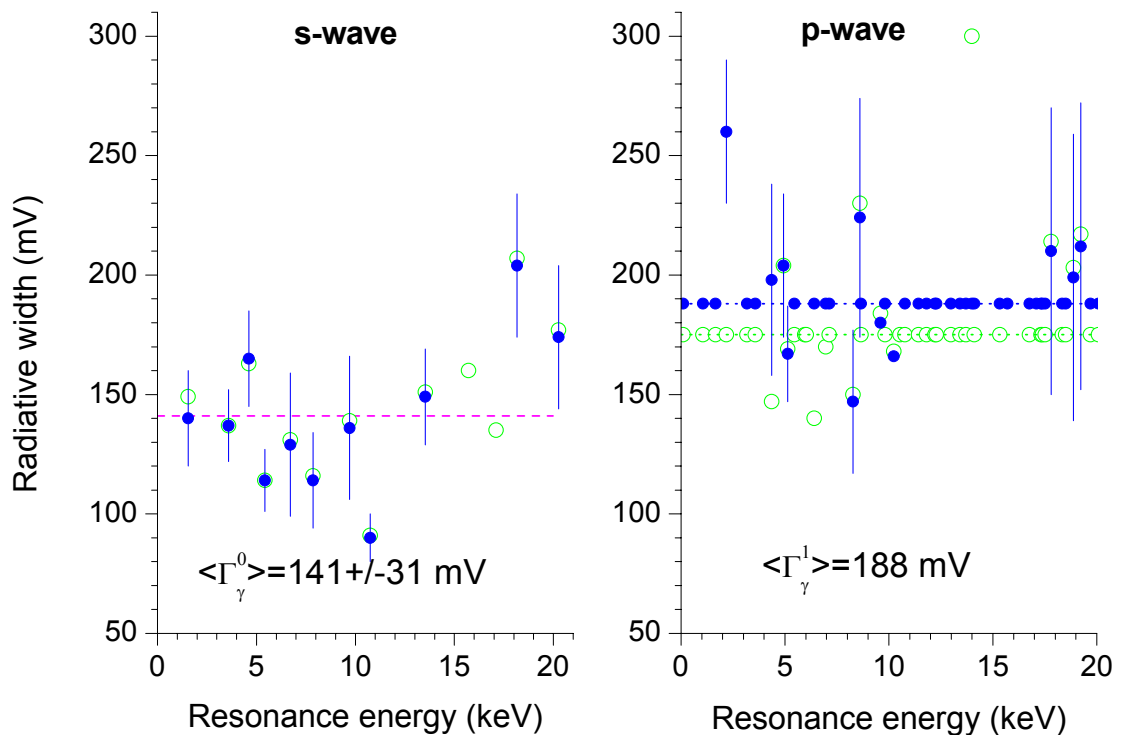


Рис. 1. Нейтронные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки), пунктиром показаны средние значения ширин, которые приняты для р-резонансов с неизвестными ширинами

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и р-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (1.50 \pm .22)$ кэВ, и для р-резонансов – $D_1 = (.52 \pm .03)$ кэВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.45 \pm 0.05) 10^{-4}$ и большое расхождение силовых функций р-резонансов: $S_1 = (9.5 \pm 1.5) 10^{-4}$ для JENDL-3.3 и $S_1 = (6.1 \pm 1.2) 10^{-4}$ для ENDF/B-VII. Как отмечалось выше, это различие обусловлено двукратным изменением нейтронных ширин резонансов с энергией 4.368 и 10.225 кэВ в оценке ENDF/B-VII.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов часто привлекают анализ соответствия параметров резонансов распределению нейтронных ширин Портер-Томаса. Результаты такого анализа представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наблюдаемом наборе s-резонансов, по-видимому, пропущено около 5-6 резонансов и в наборе р-резонансов пропущено более 20 слабых резонансов в обеих оценках. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они заметно изменяют оценки среднего расстояния между резонансами.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов все последние оценки, CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII, заимствуют оценку JENDL-3.3. Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, р- и d-волн. В соответствии

с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

Нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ.

Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.369\text{E-}4$, $S_1 = 5.479\text{E-}4$, $S_2 = 0.365\text{E-}4$, $Gg = 0.230$ эВ, $D_0 = 2252$ эВ, $R = 6.999$ фм

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с экстраполяцией энергетической зависимости оценки JENDL-3.3. В диапазоне энергий от 4 до 100 кэВ данные по сечениям радиационного захвата нейтронов измерены в работе [4], и при соответствующем усреднении резонансов оценка воспроизводит эти данные.

На основе проведенного анализа было принято решение, что, несмотря на отмеченный выше пропуск слабых резонансов, для области разрешенных резонансов целесообразно включить в БРОНД-3 оценку ENDF/B-VII, а для неразрешенных резонансов оценку JENDL-3.3. При отсутствии новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений в области резонансных нейтронов.

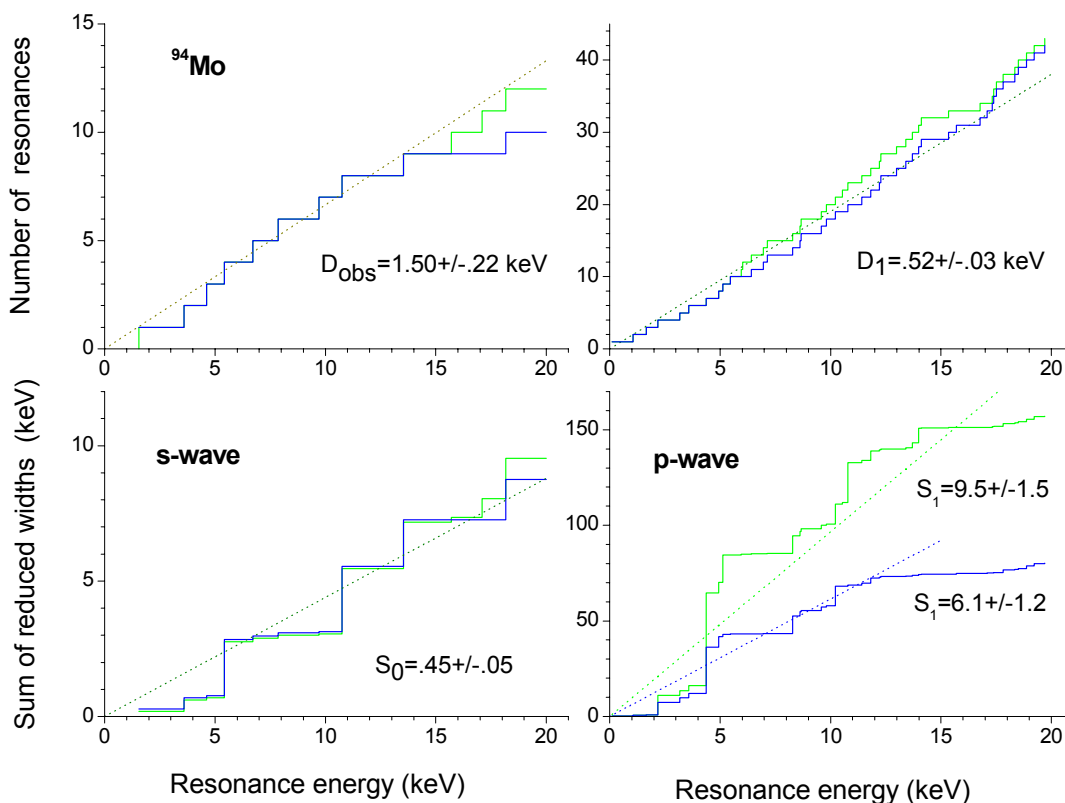


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

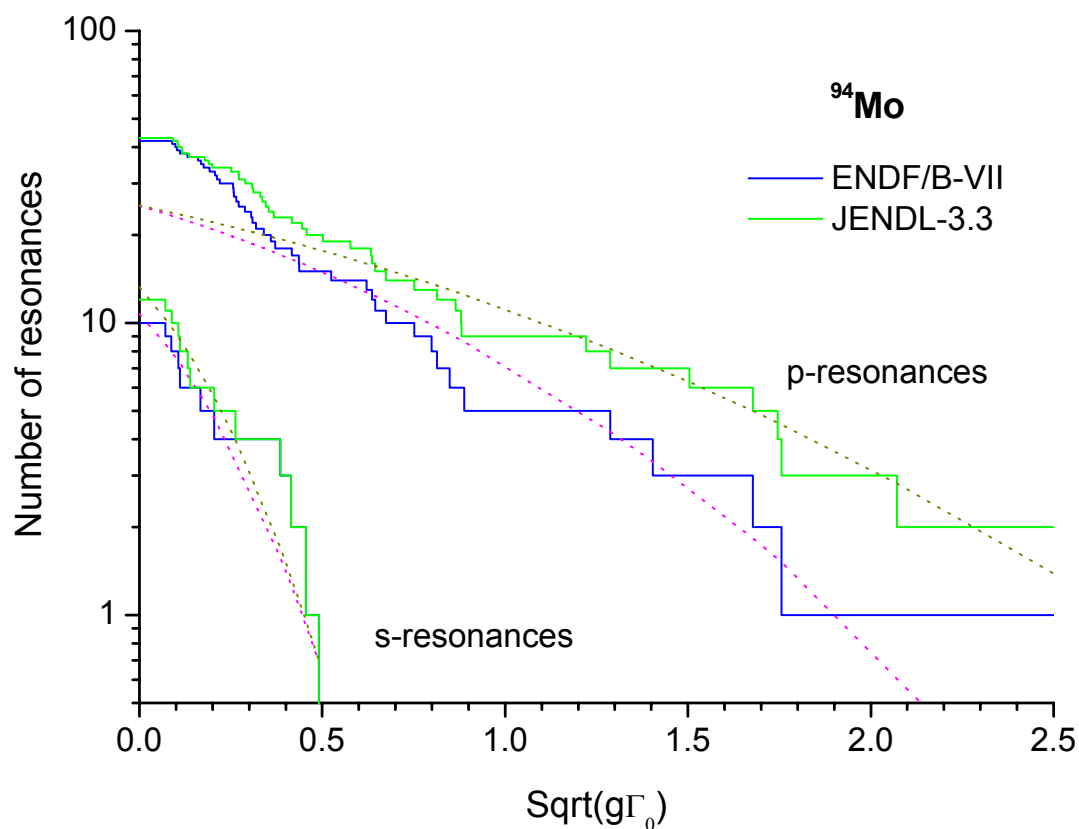


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

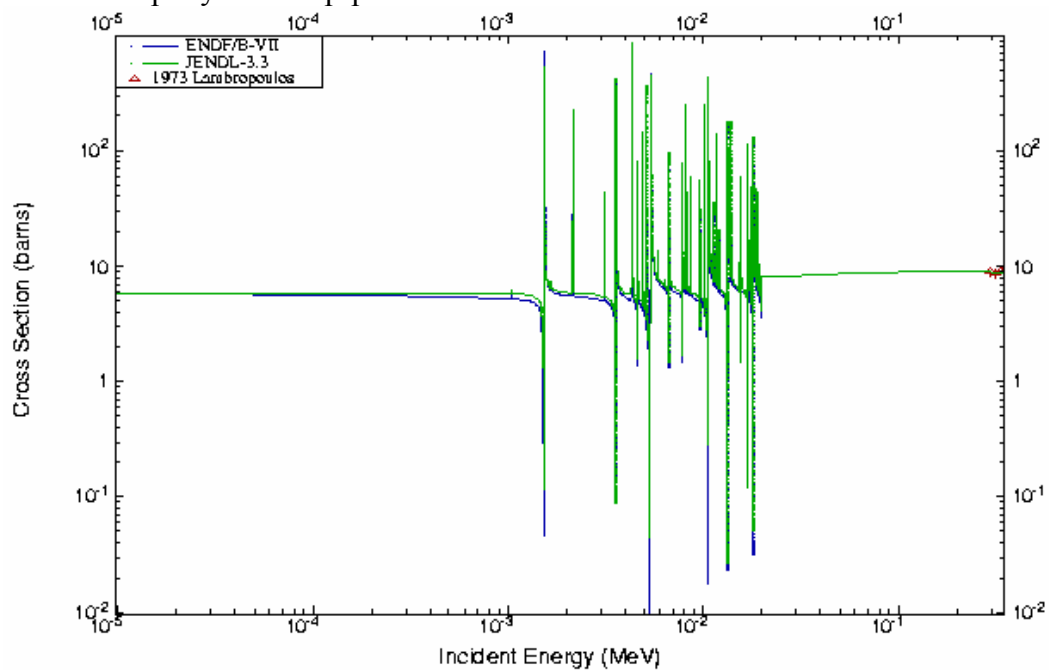


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными вне резонансной области

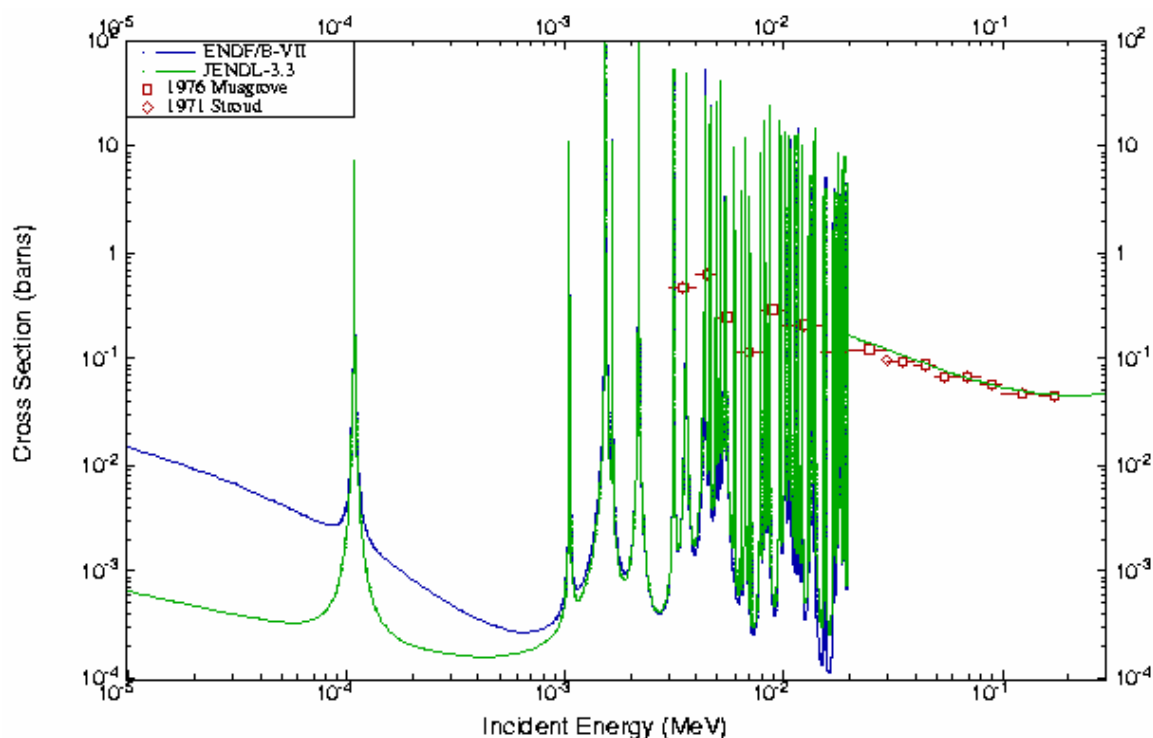


Рис. 5. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

Нейтронные сечения в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH [7], модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин на основе подхода работы [21]. Нейтронные коэффициенты проникаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS [8]) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней 2+ и 3-. Параметры оптического потенциала были взяты из работы [9], но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ [9], [10] и [11], соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 [22]. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц [13] и рекомендаций RIPL-2 [22].

3.1. Полные нейтронные сечения (MT=1).

На рис. 6 представлено полное сечение Mo-94 в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, разброс экспериментальных данных очень велик, и они не могут быть критерием для надежного выбора той или иной оценки. В области энергий нейтронов до 1 МэВ оцененные данные библиотек BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII мало различаются, однако при более высокой энергии это различие становится существенным, но отсутствие экспериментальных не позволяет дать преимущество одной из оценок.

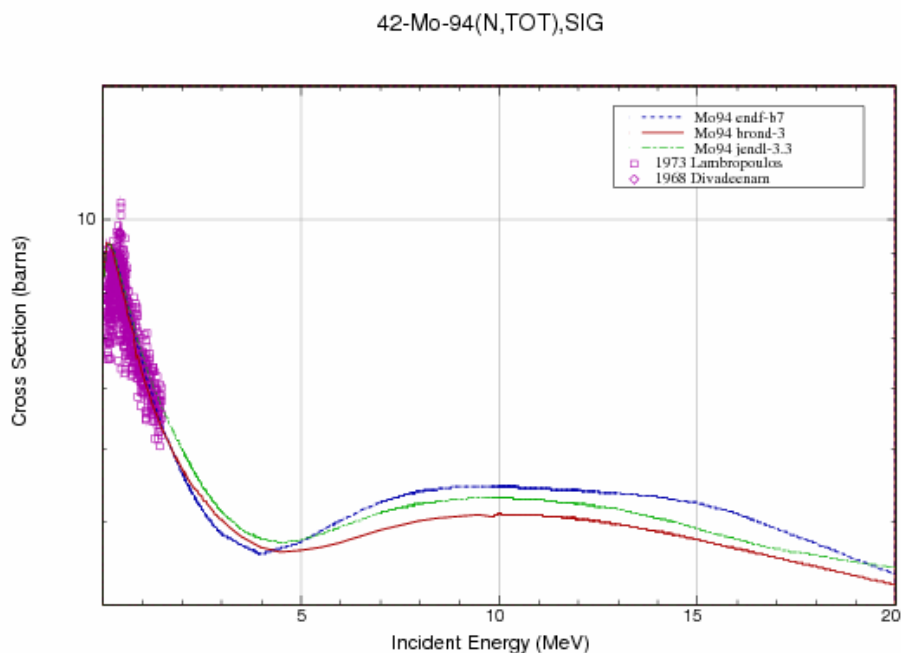


Рис. 6. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках интегральное сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 6 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния с экспериментальными данными. В целом, совокупность экспериментальных данных согласуется с оценками, но разброс экспериментальных данных столь значителен, что нет основания предпочесть какую-либо из оценок.

На рис. 7 и 8 показана часть имеющихся экспериментальных данных для наиболее характерных энергий налетающих нейтронов. Отобраны энергии, для которых имеются результаты нескольких независимых измерений. Оценки достаточно хорошо воспроизводят основные закономерности изменения угловых распределений при увеличении энергии нейтронов, и расхождения оценок с экспериментом оказываются примерно такими же, как разногласия экспериментальных данных.

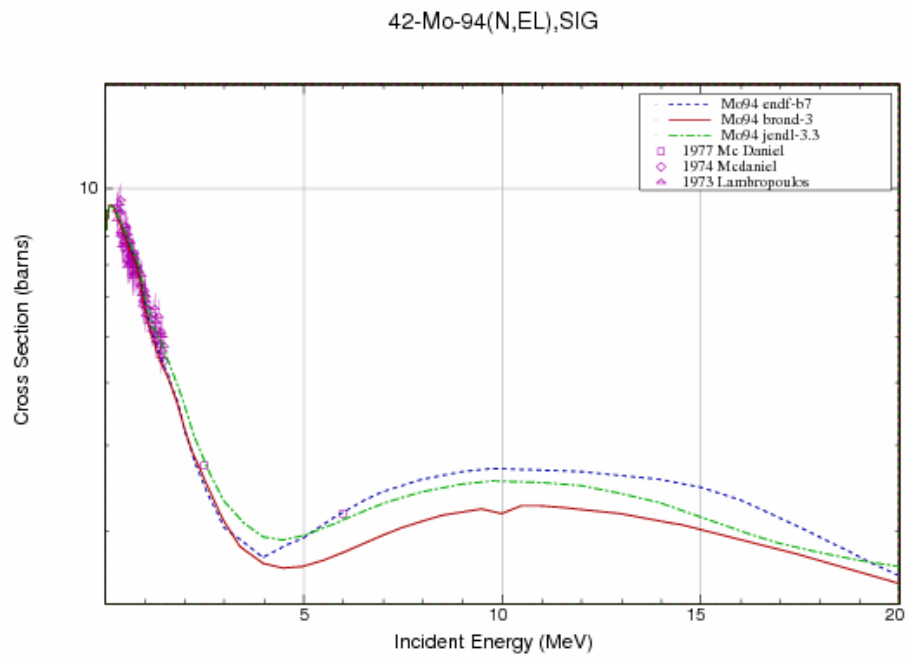


Рис. 6. Сечение упругого рассеяния в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

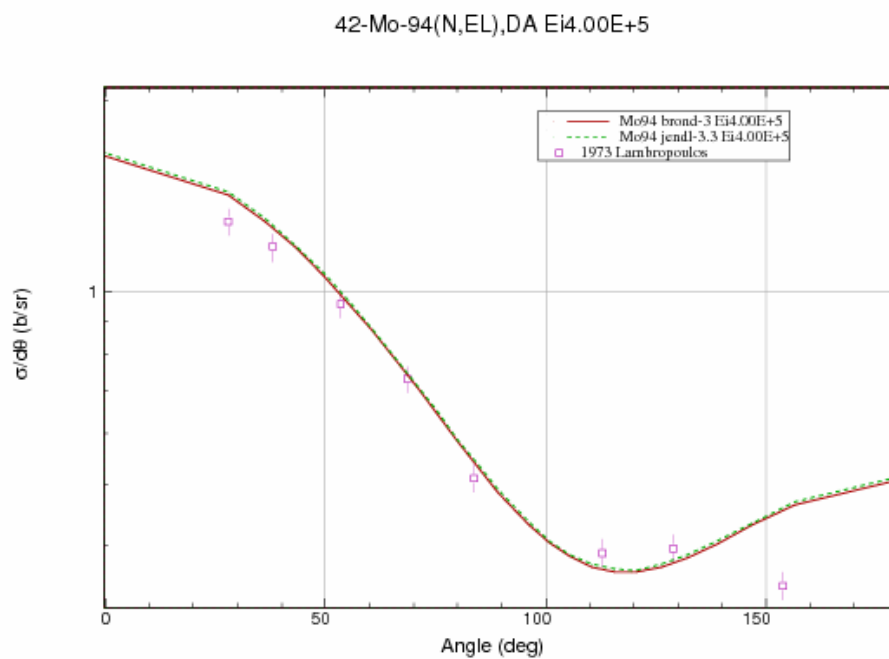


Рис. 7. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов с энергией 400 кэВ.

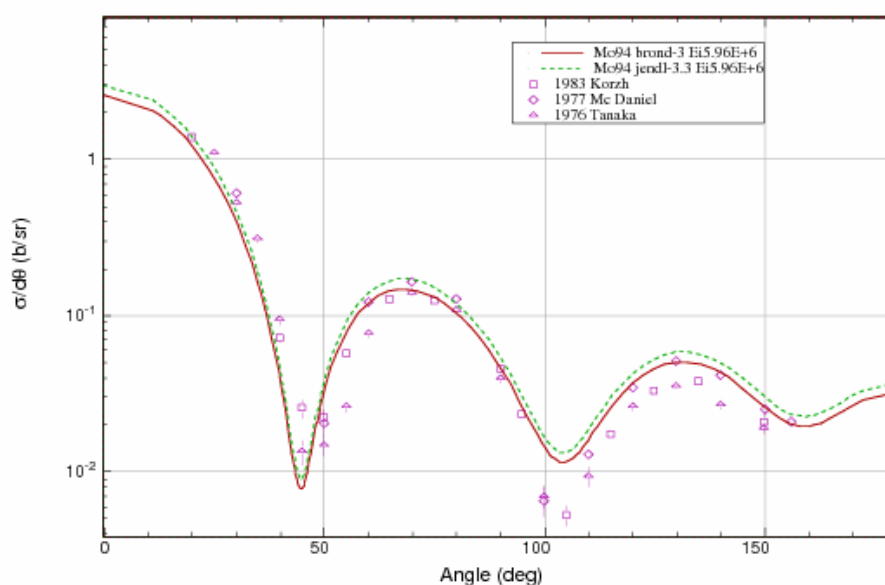


Рис. 8. Экспериментальные данные об угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с энергией 5.96 МэВ в сравнении оценками.

3.3. Сечение радиационного захвата(MT=102).

Экспериментальные данные по сечению радиационного захвата нейтронов вне резонансной области измерены только в одной работе [4], и все оценки ориентируются на эти данные. Эти оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия в области энергий выше 3 МэВ обусловлено различными приближениями в описании конкуренции радиационных и нейтронных ширин на начальных этапах каскада гамма-переходов.

В оценке БРОНД-3 вероятности гамма-переходов рассчитывались с учетом E1, M2 и E2 – мультипольностей и параметрами гигантских резонансов, рекомендованными в работе [18]. Полная силовая функция гамма-переходов была нормирована к имеющимся экспериментальным данным по средним радиационным ширинам и плотности нейтронных резонансов.

Сравнение оценок сечений радиационного захвата нейтронов с экспериментальными данными показано на рис. 9. В области энергий выше 8-10 МэВ во всех оценках рассматривается механизм прямого коллективного захвата нейтронов, но приближения, привлекаемые для его описания, различаются весьма значительно. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 1 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не оказывает сколько-либо заметного влияния на расчеты характеристик ядерных реакторов.

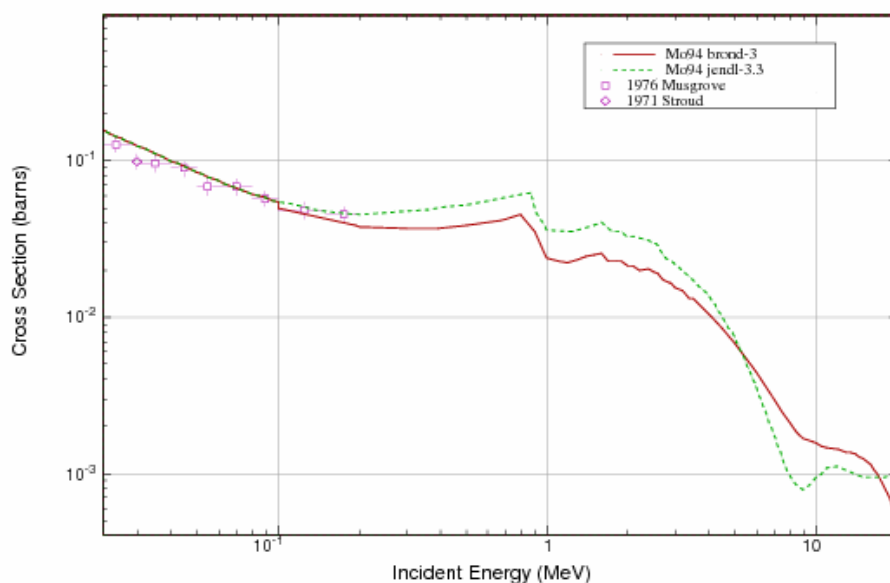


Рис. 9. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов на Мо-94 вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

3.4. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-69).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.9652 МэВ моделируются непрерывным спектром..

Схема уровней:

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма-кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	0.871100	2+	1 → 0	0.87108	100
2	1.57370	4+	2 → 1	0.70263	100
3	1.74250	0+	3 → 1	0.8714	100
4	1.86430	2+	4 → 1 4 → 0	0.99318 1.8641	0.92 0.08
5	2.06740	2+	5 → 1 5 → 0	1.19646 2.0674	90 10
6	2.29520	4+	6 → 2	0.7215	100
7	2.39320	2+	7 → 0 7 → 1	2.3932 1.5221	9 91
8	2.42350	6+	8 → 2	0.84974	100
9	2.53390	3-	9 → 5 9 → 4 9 → 2 9 → 1	0.4666 0.6690 0.9600 1.6626	16 15 20 49
10	2.56680	4+	10 → 2	0.9931	100

11	2.61150	5-	11 → 2	1.0378	100
12	2.73980	1+	12 → 1 12 → 0	1.8687 2.7400	62 38
13	2.76810	4+	13 → 1	1.8970	100
14	2.80580	2+	14 → 2 14 → 1	1.2324 1.9343	50 50
15	2.83590	3+	15 → 2	1.2622	100
16	2.87020	2+	16 → 4	1.00593	100
17	2.87240	6+	17 → 11 17 → 8	0.2617 0.4492	4 96
18	2.95580	8+	18 → 17 18 → 8	0.0836 0.5321	8 92
19	2.96510	2+	19 → 4 19 → 2	1.1003 1.3914	60 40
20	2.96520				

Экспериментальные данные по интегральному сечению неупругого рассеяния имеются только вблизи порога. Оцененные данные библиотеки ENDF/B-VII приняты из библиотеки JENDL-3.3. Оценка BROND-3 лежит выше. Это различие в оценках связано с различием в параметрах оптической модели. В расчетах БРОНД-3 была использована модель несферической оптики. Более высокое интегральное сечения неупругого рассеяния нейтронов для Мо-92 поддерживается анализом сечений интегрального неупругого рассеяния на других изотопах молибдена и на соседних ядрах. Этот анализ показывает плавную зависимость указанного сечения от атомного веса. Оценки китайской библиотеки CENDL-3 на других изотопах молибдена практически совпадает с оценками БРОНД-3.

На рис. 11 показана зависимость сечения неупругого рассеяния для первого уровня. Имеется значительный разброс экспериментальных данных, оценки JENDL-3.3 и BROND-3 практически совпадают. На рис. 12 представлены угловые распределения не упруго рассеянных нейтронов 6 МэВ из JENDL-3.3 и BROND-3. Как видно, форма зависимости идентична и в основном следует экспериментальной зависимости.

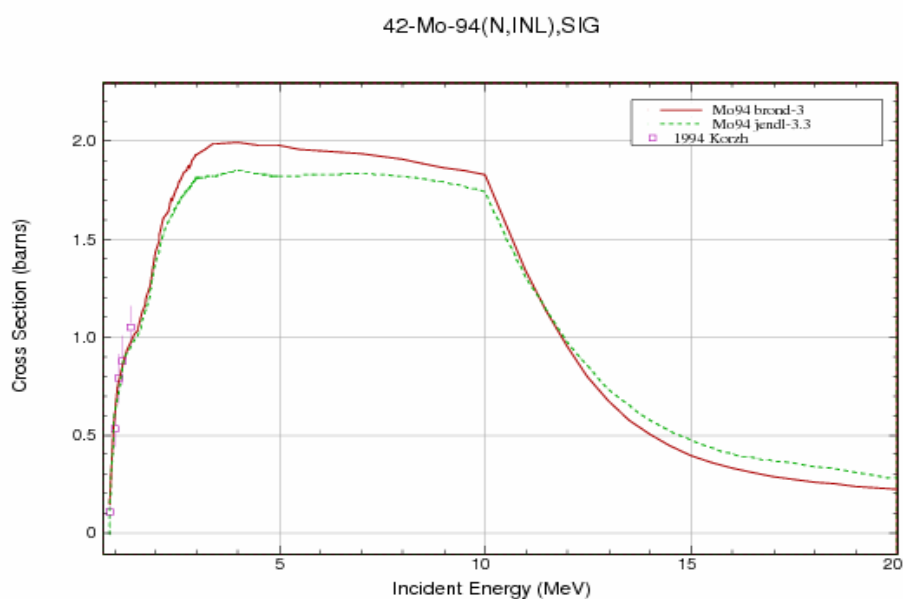


Рис. 10. Полное сечение неупругого рассеяния.

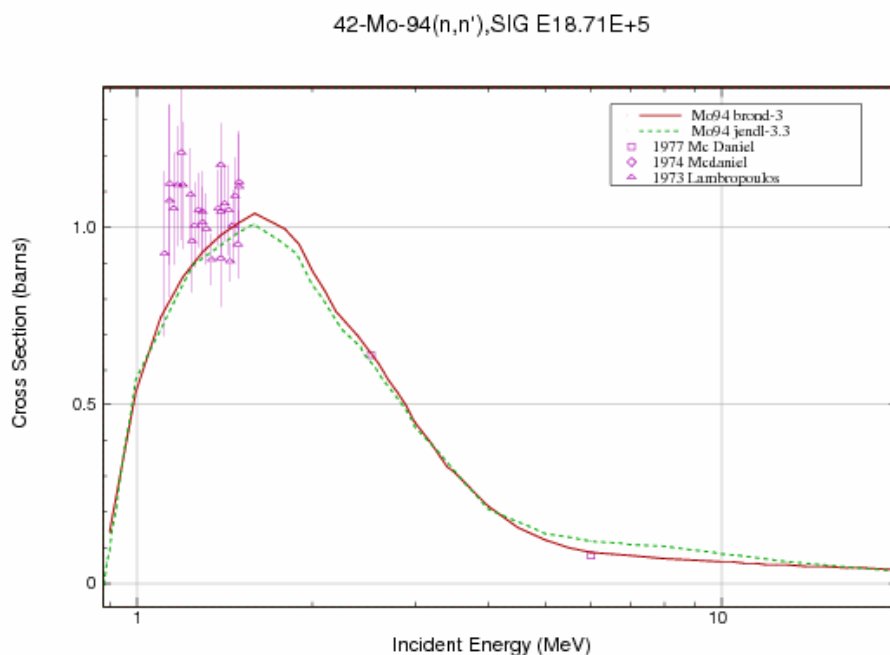


Рис. 11. Сечение неупругого рассеяния на первом уровне Мо-94 с энергией 0.871 МэВ.

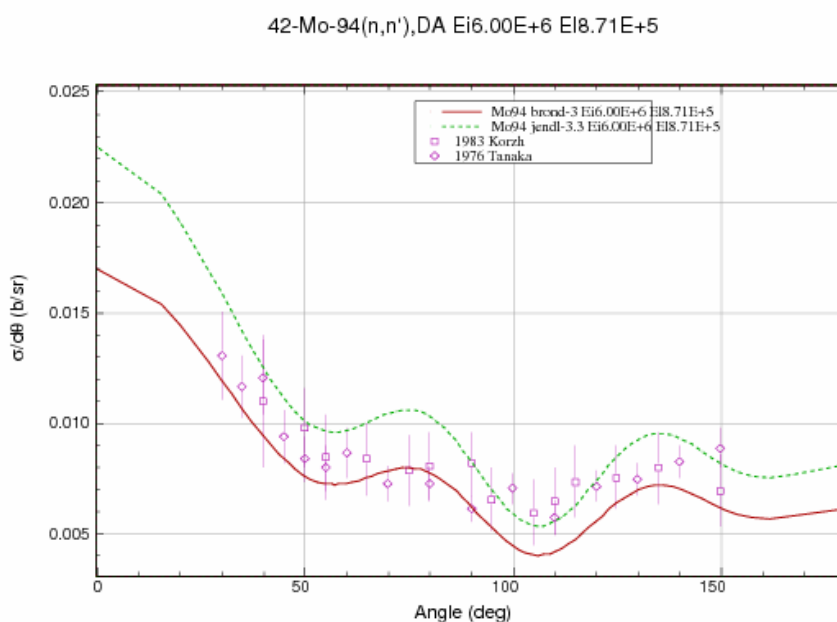


Рис. 12. Угловые распределения нейтронов с энергией 6 МэВ, неупруго рассеянных на уровне 0.871 МэВ.

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

На рис.13 показаны сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,2n)$. Экспериментальные данные отсутствуют. Оцененные сечения библиотек BROND-3 JENDL-3.3 примерно равноценны, однако оценка БРОНД-3 несколько лучше согласуется с эмпирической систематикой сечений реакции (n,2n) /15/ и согласована с интегральным сечением неупругого рассеяния БРОНД-3. Оценка JENDL-3.3 совпадает с оценкой ENDF-B7. На рис. 14 показаны сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,3n)$. Оценки сечения реакции (n,3n) из библиотек BROND-3 и JENDL-3.3 практически совпадают. Данные ENDF/B-VII приняты из JENDL-3.3. Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

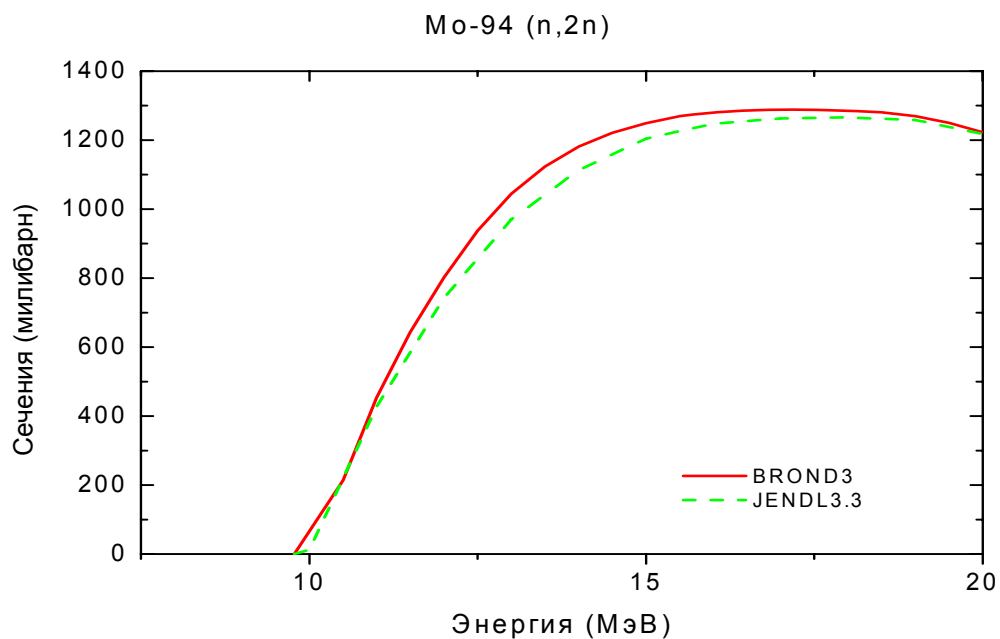


Рис. 13. Сечение реакции (n,2n).

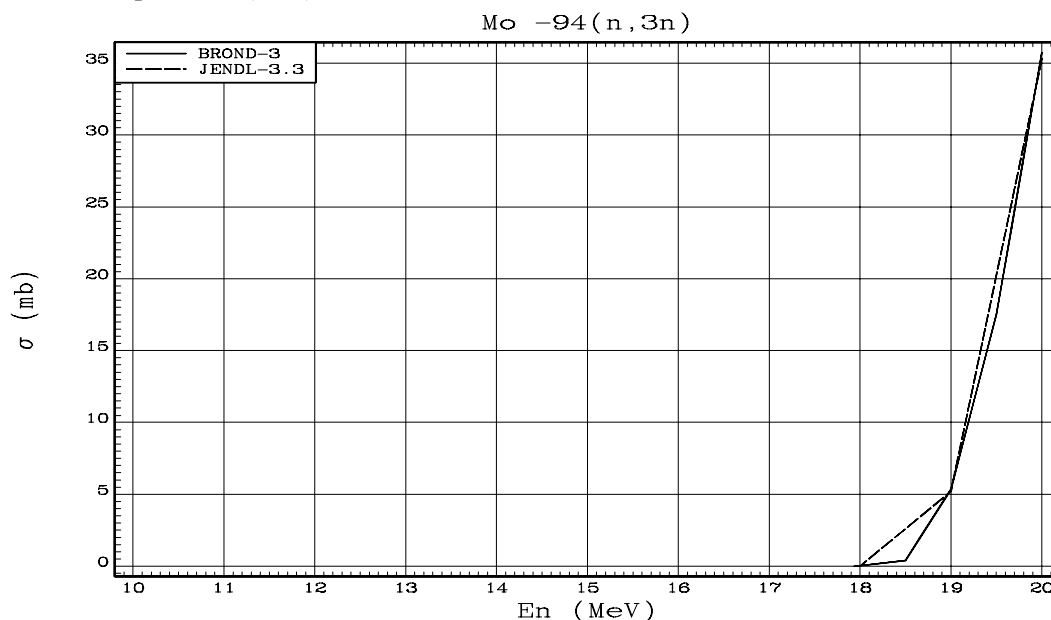


Рис. 14. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Сечение реакции (n,p),(n,d), (n,t),(n,α) (MT=103,104,105,107).

На рис. 15 показаны сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,p)$. Функции возбуждения реакции (n,p) из BROND-3, JENDL-3.3 близки, однако оценка БРОНД-3 предпочтительнее, она согласована с оценкой сечений реакции (n,np) (см. рис. 20) из библиотеки BROND-3 и сумма сечений обеих реакций лучше соответствует эмпирической систематике [15].

На рис.16 показаны сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF-B7 приняты из библиотеки JENDL-3.3. Все известные функции возбуждения реакции (n,d), полученные расчетным путем, существенно не согласуются с экспериментальной точкой работы Хайта. Это связано с недостаточным учетом вклада прямого процесса. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит ближе к экспериментальным данным (n,d).

Сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,t)$ в библиотеках BROND-3 и ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3.

На рис. 17 показаны сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,\alpha)$. Экспериментальных данных нет. Оценка BROND-3 лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции (n,α) [15] по форме функции и по максимальной величине сечения в максимуме функции возбуждения.

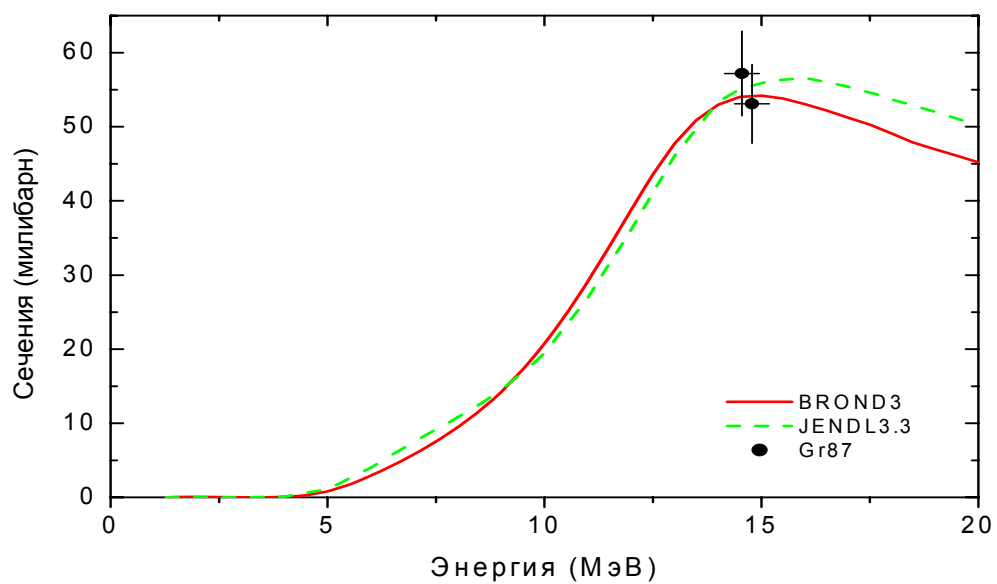


Рис. 15. Сечение реакции (n,p).

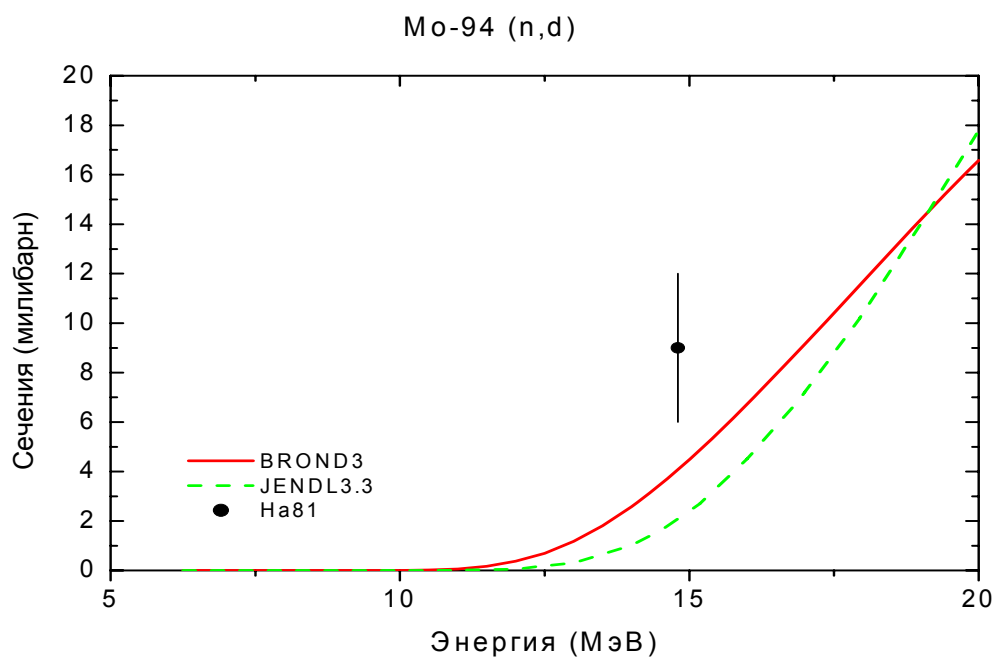


Рис. 16. Сечение реакции (n,d).

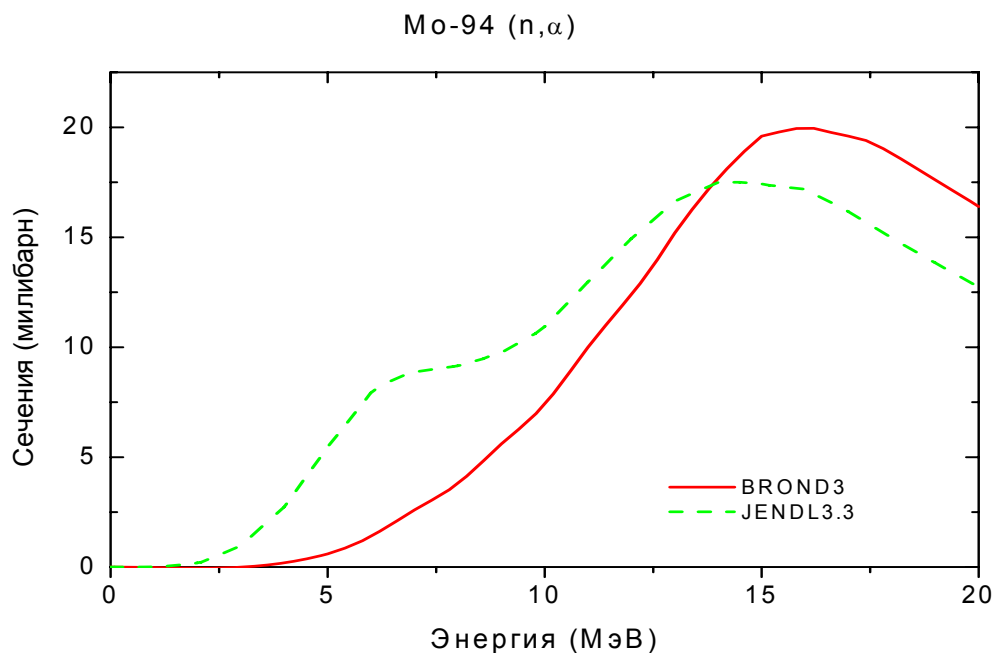


Рис. 17. Сечение реакции (n,α) .

3.7. Сечения реакций (n,np) , $(n,n\alpha)$ (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет надежных экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. В БРОНД-3 оценка основана на расчетах по программе GNASH [7], и разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис.18 дано сечение реакции $^{94}\text{Mo}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 JENDL-3.3 примерно равноценны, однако зависимость из БРОНД-3 несколько лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции $(n,2n)$ [15] и не противоречит экспериментальной величине сечения реакции (n,xp) .

На рис. 19 дано сечение реакции $^{94}\text{Mo}(n,n\alpha)$. Экспериментальных данных по реакции $(n,n\alpha)$ нет. На рис. 20 приведены экспериментальные точки только для суммы реакций (n,α) и $(n,n\alpha)$. Рекомендуется оценка БРОНД-3, она согласована с функцией возбуждения реакции (n,α) .

Спектры и угловые распределения нейтронов для рассматриваемых реакций представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

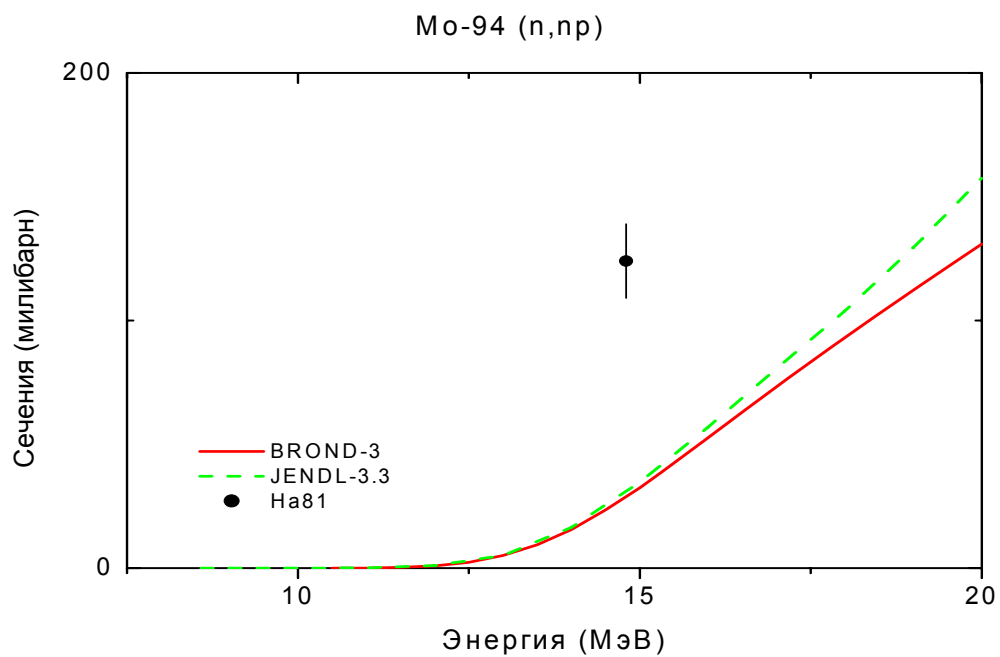


Рис. 18. Сечение реакции (n,np).

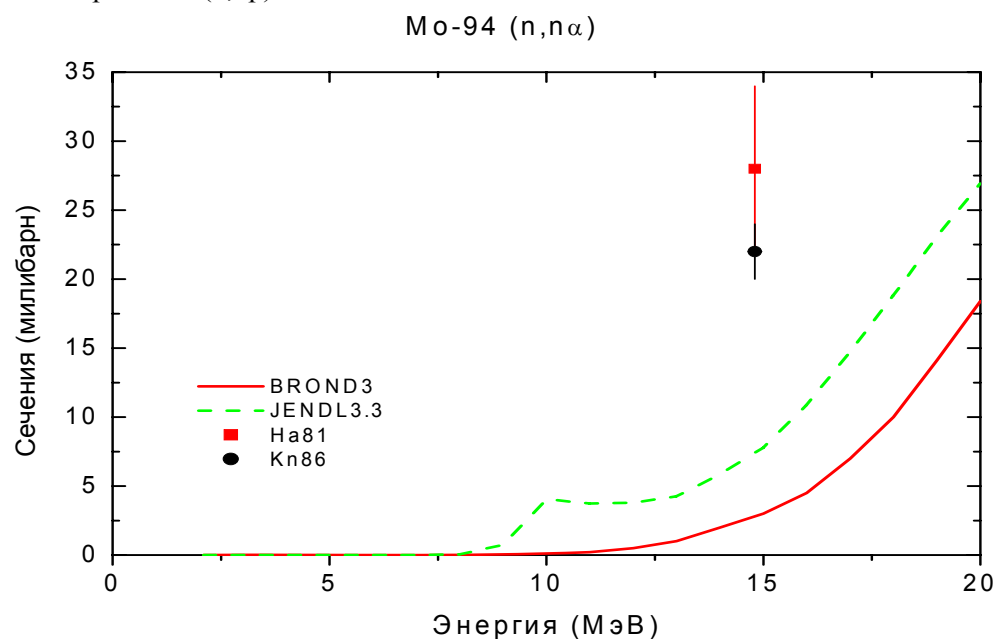


Рис.19. Сечение реакции (n,nα).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/6/

MT=51-69 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy /6/ и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /18/

6. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

8. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=3,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy /6/.

Литература:

1. Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).
2. Wasson, O.A. et. al.: Phys. Rev., c7, 1532(1973).
3. Weigmann, H. et. al.: 1971 Konoxville, 749(1971).
4. Musgrove, A.R.De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).
5. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
6. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
7. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
8. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
9. Konig, A.J., Dalaroche, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
10. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
11. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
12. Dietrich, S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1988) 199.
13. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
14. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
15. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
16. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. S.F.Mughabghab: Atlas of Neutron Resonances, to published by Academic Press, 2005 (5-th edition of BNL-325).
18. Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
19. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
20. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).
21. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
22. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.

8. Перечень использованных экспериментальных работ

1. Полное сечение

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Lambropoulos73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	1.01+05	1.50+06	594
Divadeenam68	M.Divadeenam	J,DA/B,28,3834,1968	10523	1.30+05	6.40+05	103

2. Сечение радиационного захвата

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Musgrove76	A.R.Del.Musgrove	J,NP/A,270,108,1976	30357	3.0+03	2.0+05	15
Stroud71	D.B.Stroud	P, AAEC/PR-34P,9, 1971	30506	3.0+04		1

3. Сечение упругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Mc Daniel77	F.D.Mc. Daniel	P,A-KTY-74/77,3,1977	10770 12782	2.52+06 6.00+06		1 1
Mcdaniel74	F.D.Mcdaniel	J,PR/C,10,1087,1974	10391	1.50+06		1
Lambropoulos73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	3.0+05	1.5+06	130

3. Сечение неупругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Mc Daniel77	F.D.Mc. Daniel	P,A-KTY-74/77,3,1977	10770 12782	2.52+06 6.00+06		1 1
Mcdaniel74	F.D.Mcdaniel	J,PR/C,10,1087,1974	10391	1.50+06		1
Lambropoulos73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	3.0+05	1.5+06	130
Korzh94	I.A.Korzh	J, UFZ,39, 785, 1994	32201	9.07+05	1.40+06	5

6. Сечение реакции N,P

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Greenwo087	L.R.Greenwood	J, PR/C, 35, 76, 1987	12976	1.46+07	1.48+07	2

7. Сечение реакции N,XP

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.49+07		1

8. Сечение реакции N,XA

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.49+07		1
Kneff86	D.W.Kneff	J,NSE, 92, 491, 1986	10933	1.48+07		1

9. Сечение реакции N,D

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.49+07		1

9. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка ENDF/B-VII, а для неразрешенных резонансов оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить файл БРОНД-3 для Мо-94 в библиотеку РОСФОНД.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.4. Молибден-95

Содержание в естественной смеси 15.92 %

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=95$

1.3. $A_w=94.09050$

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогом ниже 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$, МэВ	Ядро-продукт ^{*)}
04	n,n'	-0.2041	0.2062	Мо-95
16	n,2n	-7.3751	7.4535	Мо-94
17	n,3n	-17.0470	17.2175	Мо-93
22	n,n α	-2.2447	2.2686	Zr-91
28	n,np	-8.6382	8.7300	Nb-94
102	n, γ	9.1542	0	Мо-96
103	n,p	-0.1431	0.1446	Nb-95
104	n,d	-0.3285	6.3948	Nb-94
105	n,t	-7.3776	7.4560	Nb-93
106	n,He3			
107	n, α	6.3982		Zr-92

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

2.3 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи [1] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию [2] и радиационному захвату нейтронов [3]. Эти параметры для большинства резонансов близки к параметрам, рекомендованных Мугабгом и др. [5], но для s-резонансов с энергиями 1495 и 1766 эВ, а также p-резонанса с энергией 1371 эВ приняты столь большие значения нейтронных ширин, что площади резонансов примерно в два раза превышает экспериментальные

значения [5]. Создается впечатление, что для указанных резонансов в файле JENDL-3.3 допущена опечатка порядка нейтронных ширин, которая приводит к их завышению в 10 раз. Верхняя граница резонансной области принята равной 2 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.0$ фм [5] и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин: 150 мэВ для s-резонансов и 180 мэВ для p- резонансов. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3 и с небольшими изменениями p-резонансов также в JEFF-3.0. В 2000 г. Мугабгаб и др. [17] пересмотрели параметры разрешенных резонансов. Наиболее существенными являются корректировка нейтронных ширины для указанных выше резонансов, а также некоторое уменьшение радиационных ширин некоторых s-резонансов. Верхняя граница области разрешенных резонансов была увеличена до 2.1412 кэВ. Пересмотренные параметры резонансов были включены в оценку ENDF/B-VI.7 и без изменений в ENDF/B-VII. Оценка ENDF/B-VII была включена в JEFF-3.1 вместо предыдущей оценки, основанной на JENDL-3.3.

Радиационные ширины резонансов, использованные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Хорошо видны небольшие различия ширин s-резонансов и первых p-резонансов. Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

оценка	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	Эксперимент [5]
полное	19.56 б	19.99 б	
упругое	5.57 б	6.38 б	
захвата	13.99 б	13.61 б	14.0±0.5
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ:	119 б	111 б	

В пределах погрешности обе оценки согласуются с измеренным сечением захвата тепловых нейтронов, но нет экспериментальных данных по другим типам сечений, а также резонансному интегралу захвата.

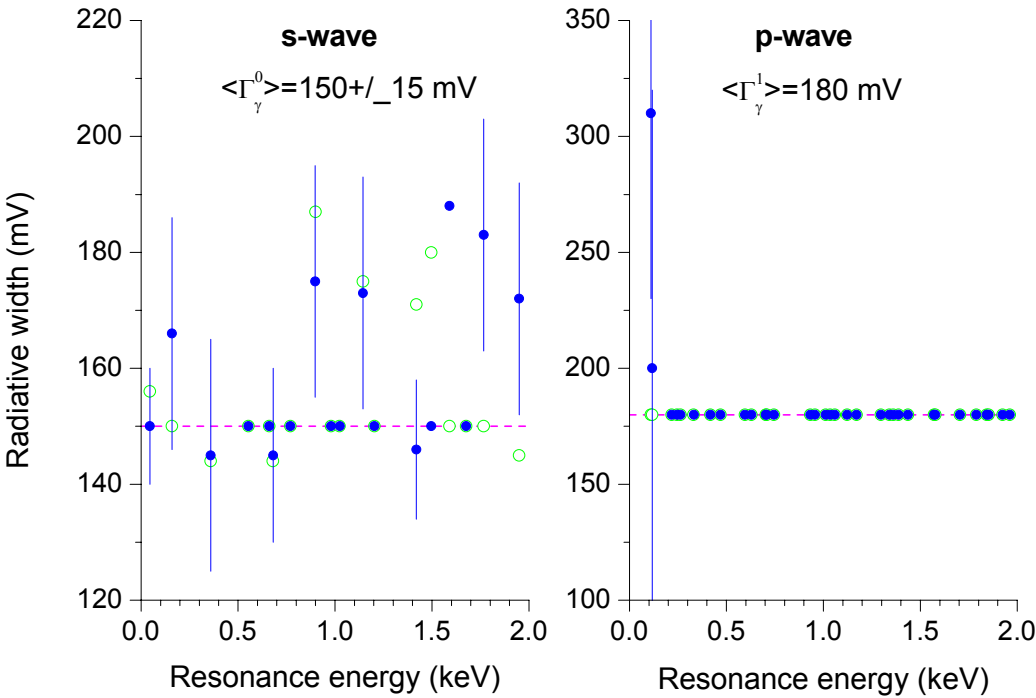


Рис. 1. Нейтронные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки), пунктиром показаны средние значения ширин, которые приняты для p-резонансов с неизвестными ширинами

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (110 \pm 10)$ эВ, и для p-резонансов – $D_1 = (61 \pm 5)$ эВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.45 \pm 0.10) 10^{-4}$ и $S_1 = (5.2 \pm 0.6) 10^{-4}$ для ENDF/B-VII. Для JENDL-3.3 силовые функции оказываются несколько большими, но как отмечалось выше, это различие обусловлено существенно завышенными значениями нейтронных ширин ряда резонансов в оценке JENDL-3.3.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов, по-видимому, пропущено около 6-7 резонансов и в наборе p-резонансов пропущено около 20 слабых резонансов в обеих оценках. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они заметно изменяют оценки среднего расстояния между резонансами.

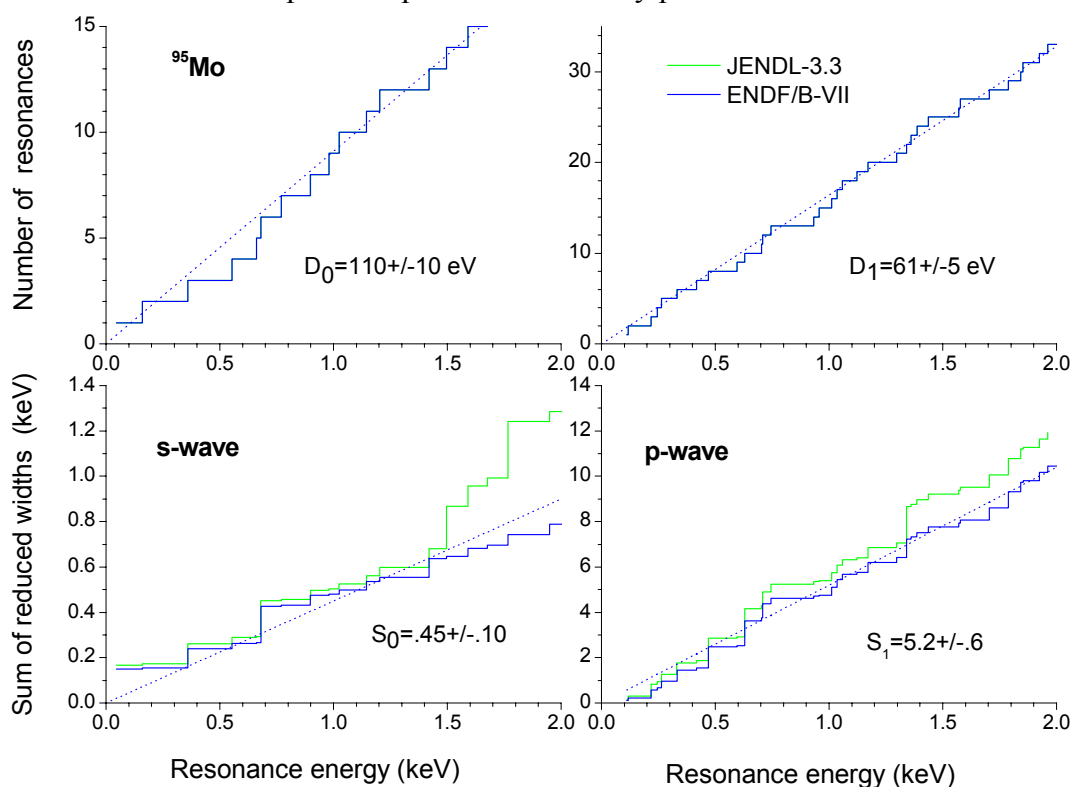


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

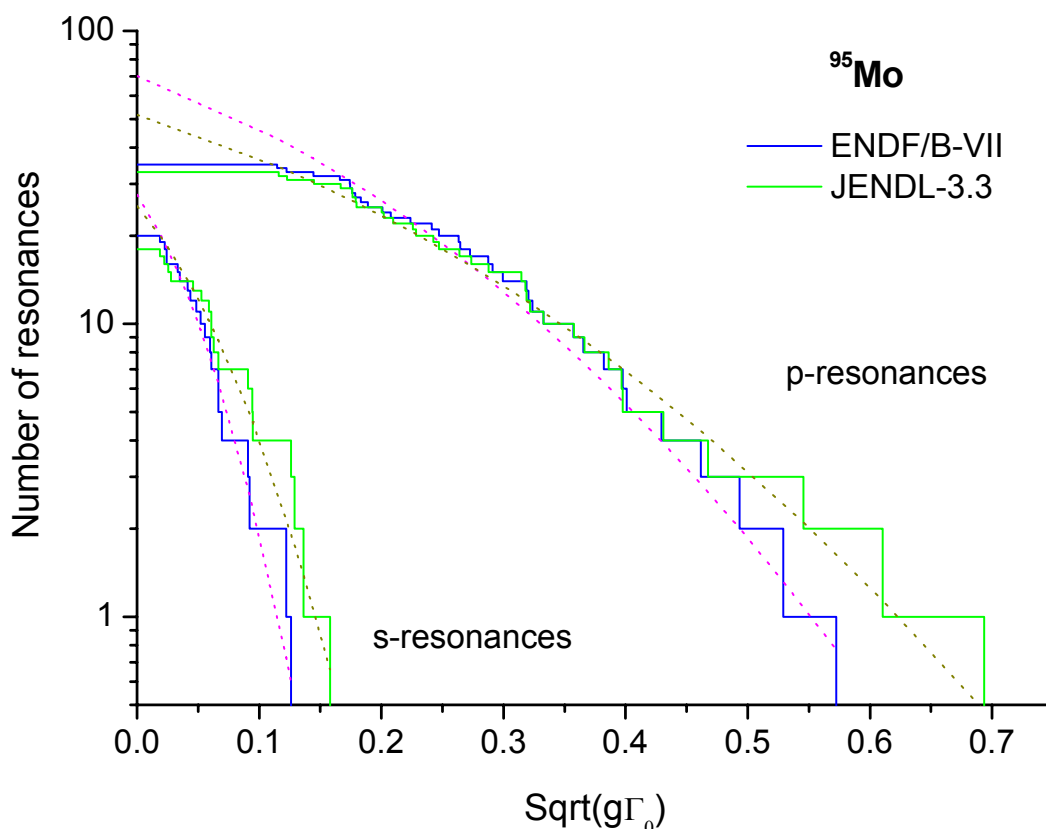


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, для набора ENDF/B-VII равны $D_0 = (78 \pm 8)$ эВ и $D_1 = (29.3 \pm 2.7)$ эВ. Отношение $D_0/D_1 = 2.66 \pm 0.53$ значительно лучше согласуется с общей статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, чем отношение расстояний между резонансами, определенных по наклону кумулятивного числа резонансов (рис. 2).

В анализе, выполненном Мугабгаб и др. [25], с учетом пропуска резонансов были получены средние расстояния $D_0 = (80.73 \pm 13.1)$ эВ и $D_1 = (34.7 \pm 4.3)$ эВ, которые достаточно близки к результатам нашего анализа.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII принята равной 100 кэВ и 206 кэВ, соответственно, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [20, 4]. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.369\text{E-}4$, $S_1 = 5.479\text{E-}4$, $S_2 = 0.365\text{E-}4$, $Gg = 0.232$ эВ, $D_0 = 76.12$ эВ, $R = 6.680$ фм.

В ENDF/B-VII было использовано аналогичное приближение, но нейтронные силовые функции, средние радиационные ширины и средние расстояния между резонансами были приняты на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов [24].

При этом для d-волны радиационная ширина взята такой же как для s-волны, силовая функция S2 определена на основе расчетов по оптической модели и среднее расстояние между d-резонансами принято равным $D2 = D0/5$ в соответствии со статистическим законом зависимости плотности резонансов от углового момента. Сечение захвата вычисленное при таком выборе параметров оказалось на 10-15 % выше экспериментального во всем диапазоне энергий. Чтобы устранить расхождение с экспериментом, значение D0 было выбрано из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов [20, 4]. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров: $S0 = 0.453E-4$, $S1 = 6.543E-4$, $S2 = 1.700E-4$, $Gg = 0.150$ эВ для s-, p-волн и 180 для d-волны, $D0 = 64.36$ эВ, $R = 7.00$ фм.

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с экстраполяцией энергетической зависимостью обеих оценок. При соответствующем усреднении резонансов оценки также хорошо согласуются с экспериментальными данными по сечениям радиационного захвата [20, 4]. Различия в выборе средних параметров нейтронных резонансов взаимно компенсируются при подгонки к одним и тем же экспериментальным данным.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что несмотря на достаточно хорошее согласие нейтронных сечений, вычисленных для обеих оценок параметров нейтронных резонансов, оценка **ENDF/B-VII является предпочтительной**, так как в ней устранен ряд противоречий JENDL-3.3 в параметрах разрешенных резонансов и параметры разрешенных и неразрешенных резонансов выбраны согласованным образом.

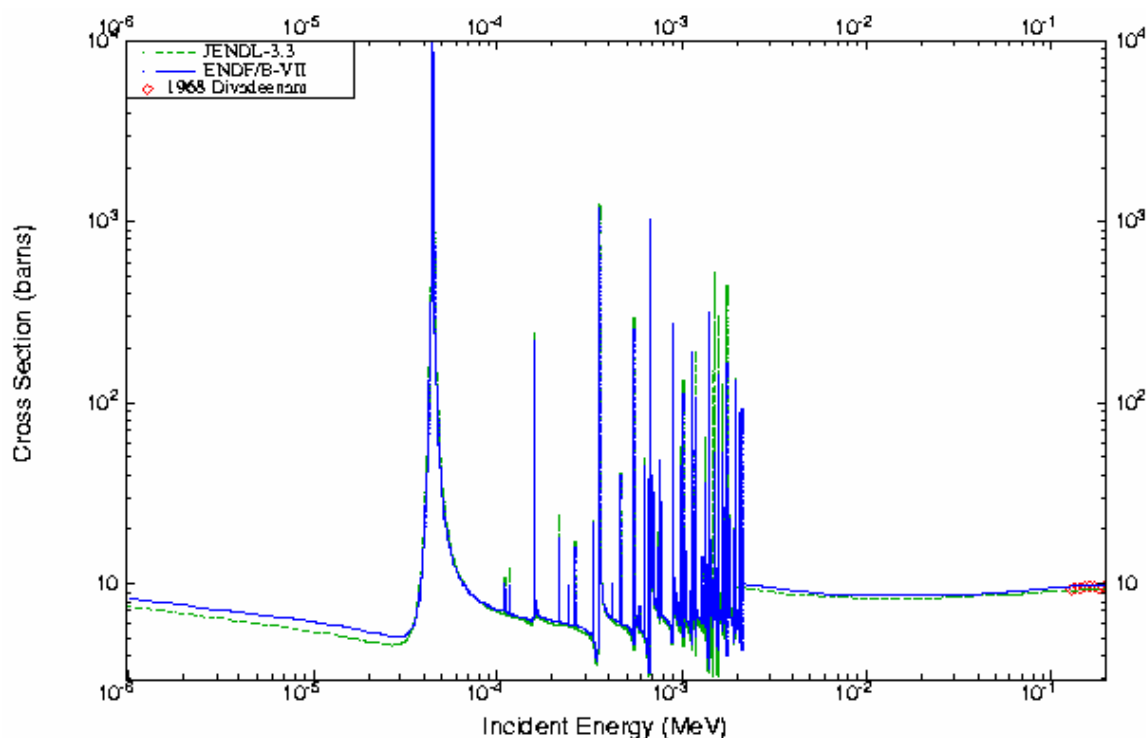


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными вне резонансной области

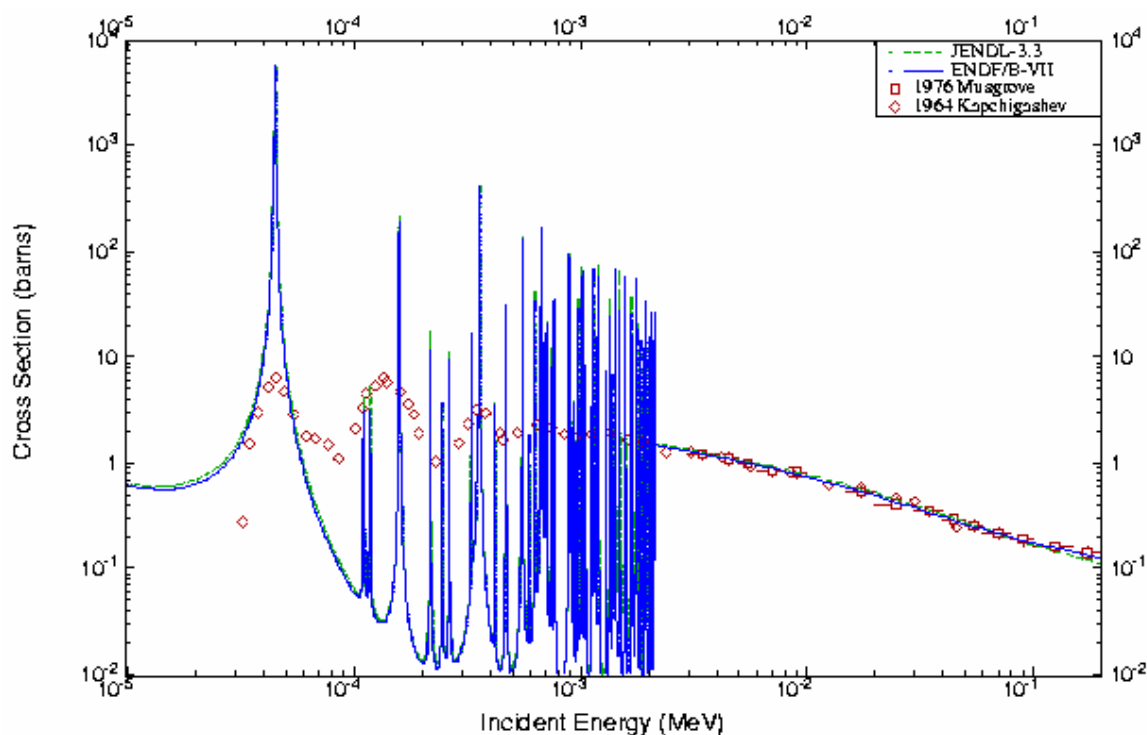


Рис. 5. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными. При отсутствии новых экспериментальных данных нет возможности улучшить оценку ENDF/B-VII, и она включена в БРОНД-3 без каких-либо изменений резонансных параметров.

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин работы /26/. Нейтронные коэффициенты проникаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней, соответствующих мультиплетам $(3/2+\otimes 2+)$ и $(3/2+\otimes 3-)$. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /27/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширинеи плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /27/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

В области энергий выше 100 кэВ полные нейтронные сечения были получены расчетом с параметрами несферической оптической модели. Нерегулярное поведение экспериментальных данных делает затруднительным выбор наилучшей оценки.

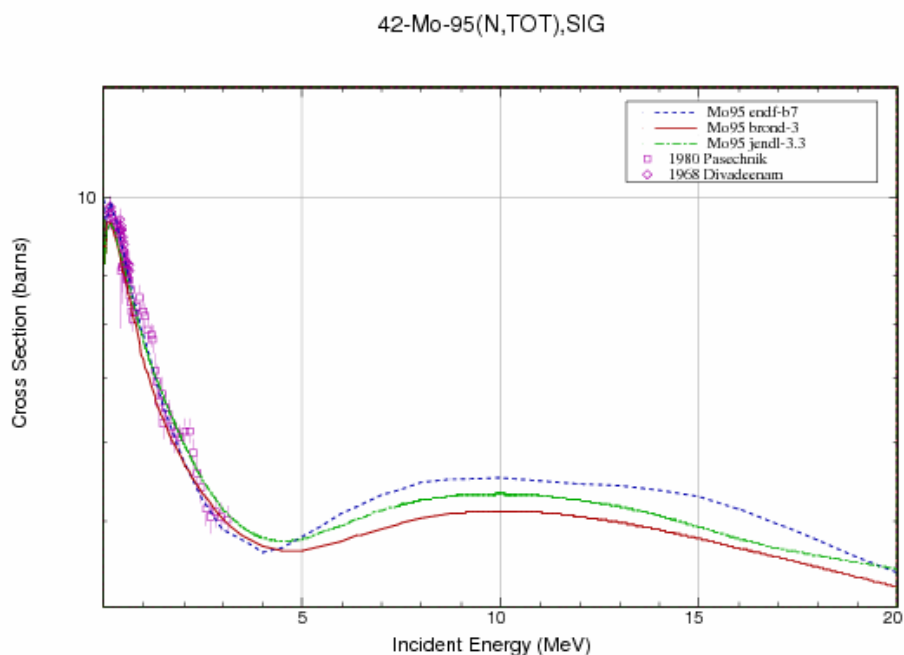


Рис. 6. Оценки полного нейтронного сечения в области нейтронов 0.1-20 МэВ..

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 7 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния. В области выше 3 МэВ оценки библиотек БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF-B7 заметно расходятся, но отсутствие экспериментальных данных не позволяет судить уверенно, какая оценка лучшая.

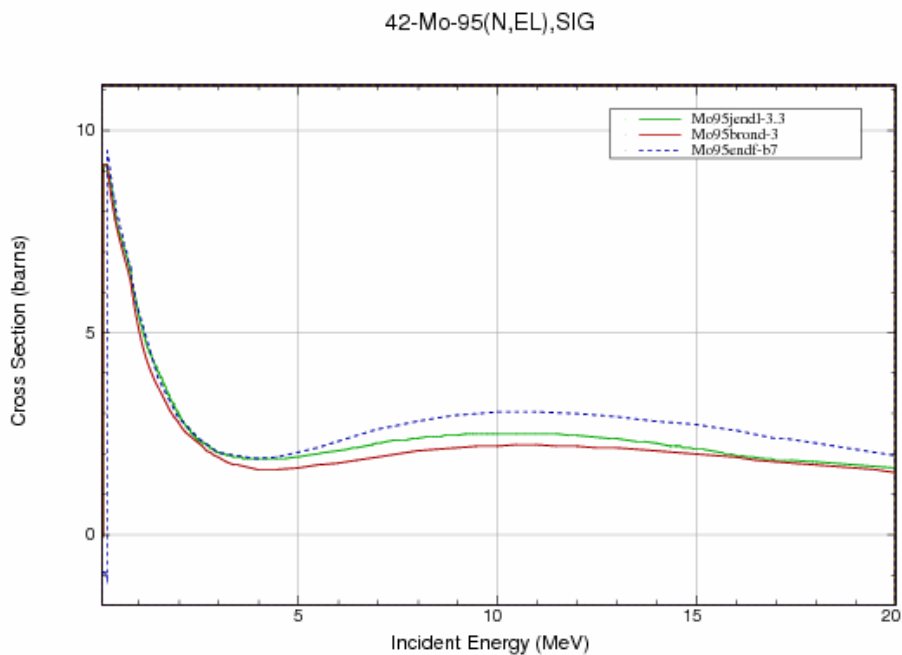


Рис. 7. Сечение упругого рассеяния на Мо-95.

3.3. Сечение неупругого рассеяния(МТ=4, 51-65).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция МТ=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 1.6666 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	0.20410	3/2+	1 → 0	0.204117	100
2	0.76580	7/2+	2 → 1	0.765794	100
3	0.78620	1/2+	3 → 1 3 → 0	0.58208 0.78620	77.6 22.4
4	0.82060	3/2+	4 → 1 4 → 0	0.61649 0.82062	21.4 78.6
5	0.94770	9/2+	5 → 0 5 → 2	0.94767 0.18188	99.9 0.1
6	1.03920	1/2+	6 → 4 6 → 3 6 → 1 6 → 0	0.21866 0.253068 0.835149 1.03926	0.1 2 88.7 9.2
7	1.05670	5/2+	7 → 1 7 → 0	0.8526 1.0568	70 30
8	1.07370	7/2+	8 → 5 8 → 2 8 → 1 8 → 0	0.1258 0.3079 0.8696 1.0737	1.0 0.8 7.7 90.5
9	1.30230	1/2+	9 → 7 9 → 3	0.2458 0.5156	84.7 15.3
10	1.36970	3/2+	10 → 1 10 → 0	1.1655 1.36975	41.5 58.5
11	1.42570	5/2+	11 → 1 11 → 0	1.2220 1.46261	99.7 0.3
12	1.54080	11/2+	12 → 8 12 → 5 12 → 3	0.4673 0.5932 0.7750	2.7 54.7 42.6
13	1.55170	9/2+	13 → 11 13 → 8 13 → 5 13 → 2 13 → 0	0.1260 0.4777 0.6040 0.7859 1.5517	2.1 2.6 61.4 29.4 4.5
14	1.62020	3/2+	14 → 7 14 → 14 → 4 14 → 1	0.56348 0.79960 1.41609 1.62020	18 3 4 73

15	1.64510	7/2+	15 → 1 15 → 0	1.4410 1.6450	54 46
16	1.66660				

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния нейтронов нет. Имеющиеся оценки интегрального сечения неупругого рассеяния показаны на рис. 8. Все оценки хорошо согласуются в области ниже 2МэВ, но имеются существенные различия при более высоких энергиях. В диапазоне от 2 до 10 МэВ оценка БРОНД-3 близка к оценке CENDL-3. Обе эти оценки кажутся предпочтительными.

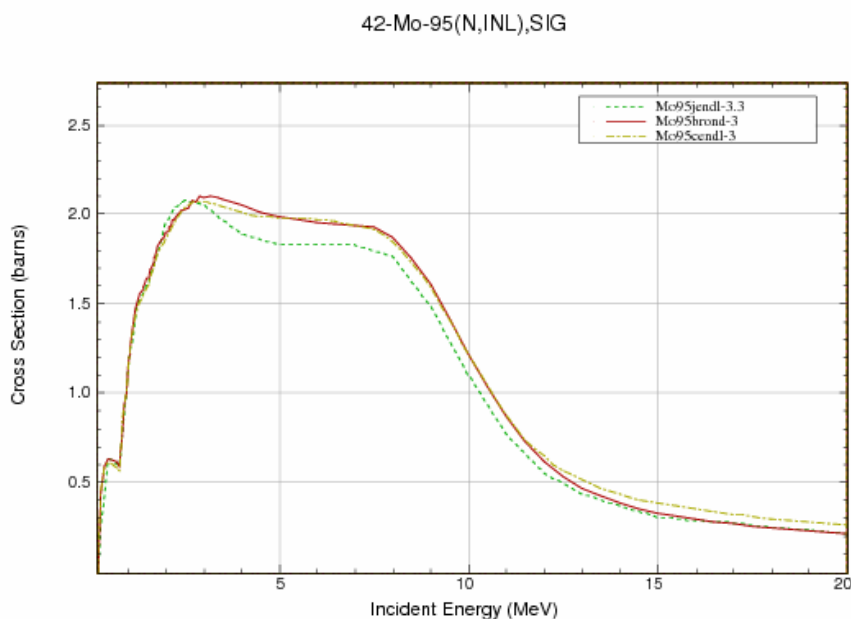


Рис.8. Полное сечение неупругого рассеяния на Мо-95.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

На рис. 9 представлено сечение радиационного захвата в области выше 100 кэВ. В области 2-100 кэВ оценки библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и BROND-3 совпадают.

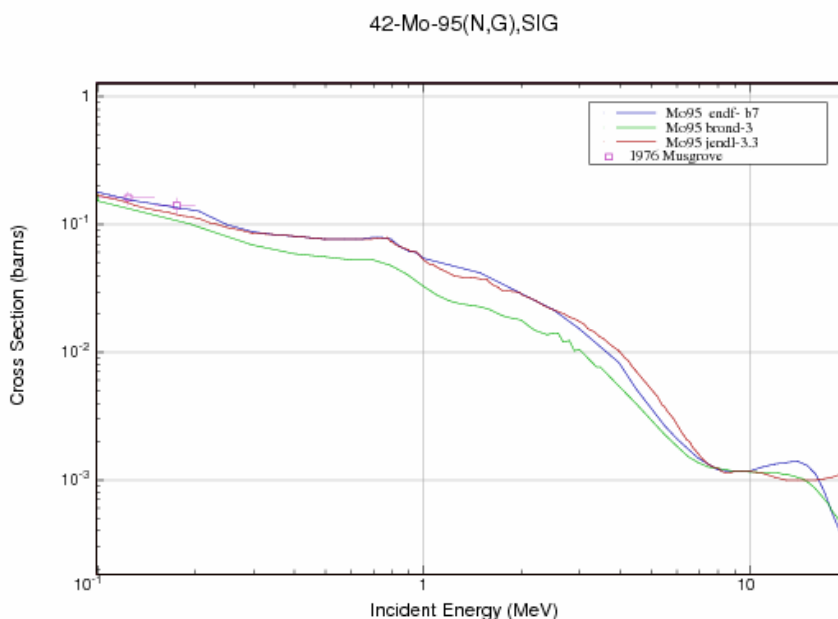


Рис. 9. Сечение радиационного захвата в области энергий 0.1-20 МэВ.

При энергиях нейтронов выше 100 кэВ данные библиотек ENDF-B7 и JENDL-3.3 близки, но оценка БРОНД-3 лежит заметно ниже. В области энергий выше 200 кэВ экспериментальных данных нет. Нет серьезных аргументов, чтобы отдать предпочтение какой-либо одной оценке.

3.5. Сечение реакции $(n,2n)$, $(n,3n)$ (MT=16, 17).

Оценки сечений реакции $(n,2n)$ BROND-3 и JENDL-3.3 (рис. 10) различаются незначительно. Однако оценка БРОНД-3 предпочтительнее с точки зрения систематических тенденций в поведении функций возбуждения реакции $(n,2n)$ /15/. Оценка ENDF-B7 противоречит систематике максимальных сечений указанной реакции и является ошибочной.

Сечение реакции $(n,3n)$ показано на рис. 11. Оценка BROND-3 предпочтительнее, потому что она согласована с оценкой реакции $(n,2n)$ из BROND-3. Сечение из ENDF-B7 лежит слишком низко.

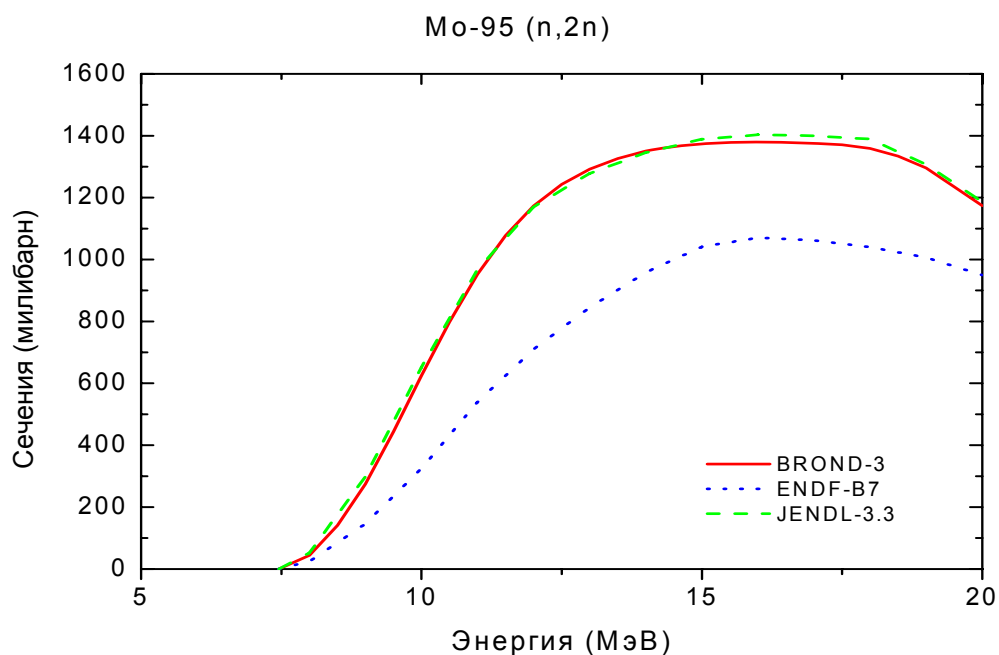


Рис. 10. Сечение реакции $(n,2n)$.

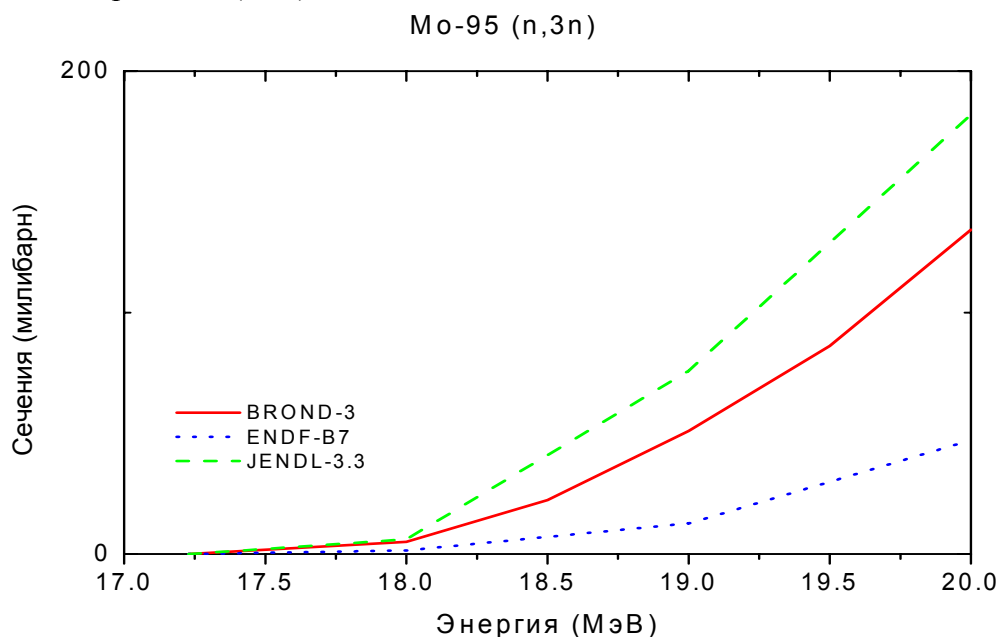


Рис. 11. Сечение реакции $(n,3n)$.

3.6. Сечение реакций (n,p),(n,d), (n,t), (n, α) (MT=103, 104,105,107).

На рис.12 представлены оценки сечений реакции $^{95}\text{Mo}(n,p)$ из БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII. Оценка BROND-3. лучше согласуется с экспериментальными данными и предсказаниями эмпирической систематики функций возбуждения указанной реакции. На рис. 13 представлено сечение реакции $^{95}\text{Mo}(n,d)$. Различия оценок сечений реакции (n,d) библиотек BROND-3 и JENDL-3.3 представляются не существенными. Оценка ENDF-B7 взята из библиотеки JENDL-3.3. Сечение реакции $^{95}\text{Mo}(n,t)$ в BROND-3 и ENDF-B7 взято из JENDL-3.3. По сечению реакции (n, α) (рис.14) экспериментальных данных нет. Однако с точки зрения эмпирической систематики функций возбуждения реакции (n, α) оценка BROND-3 предпочтительнее. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII не могут быть приняты из-за формы, противоречащей имеющимся теоретическим и эмпирическим представлениям.

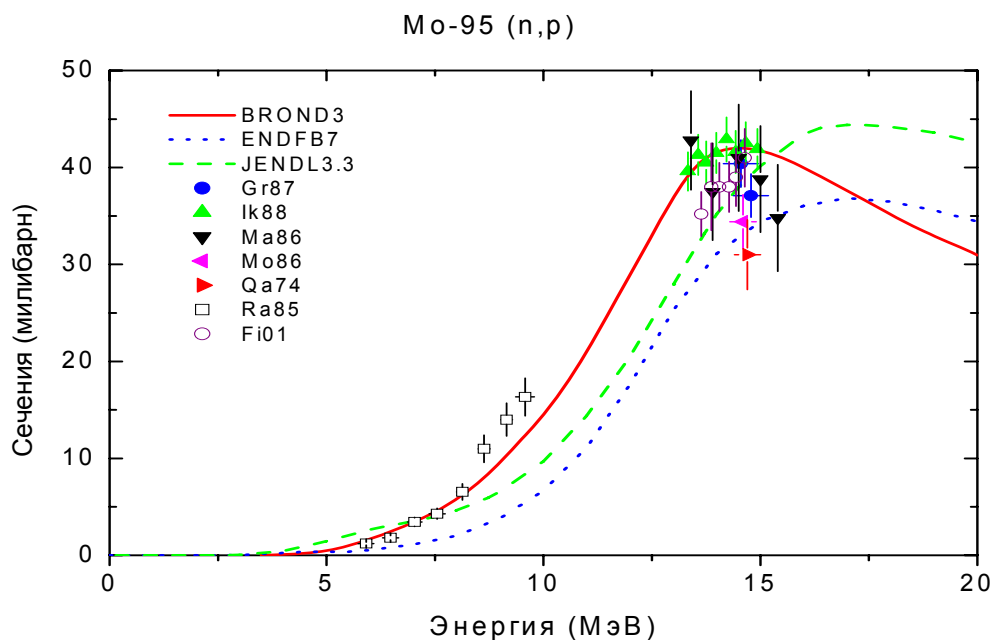


Рис. 12. Сечение реакции (n,p).

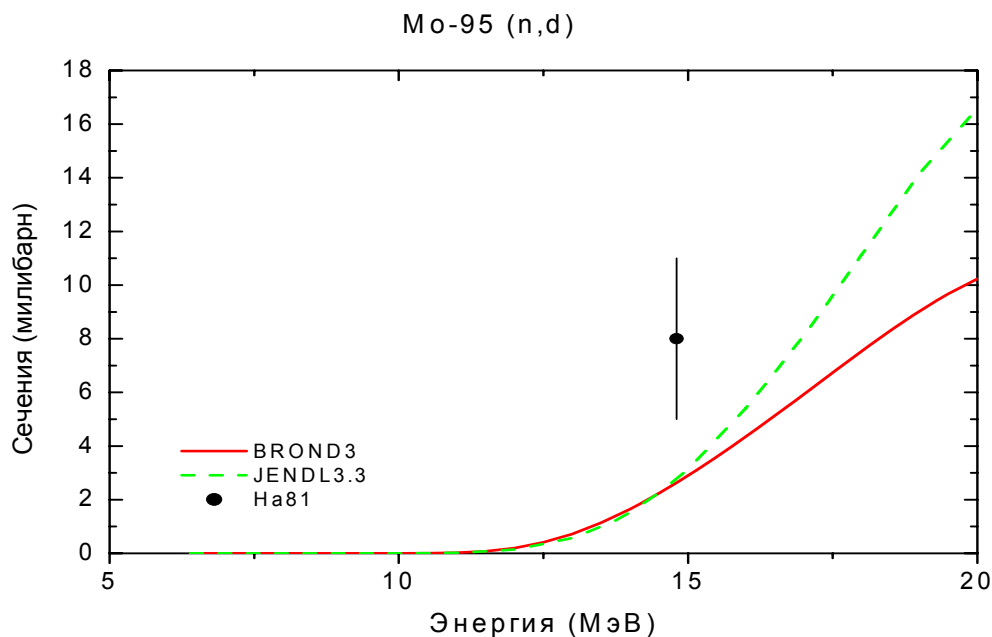


Рис. 13. Сечение реакции (n,d).

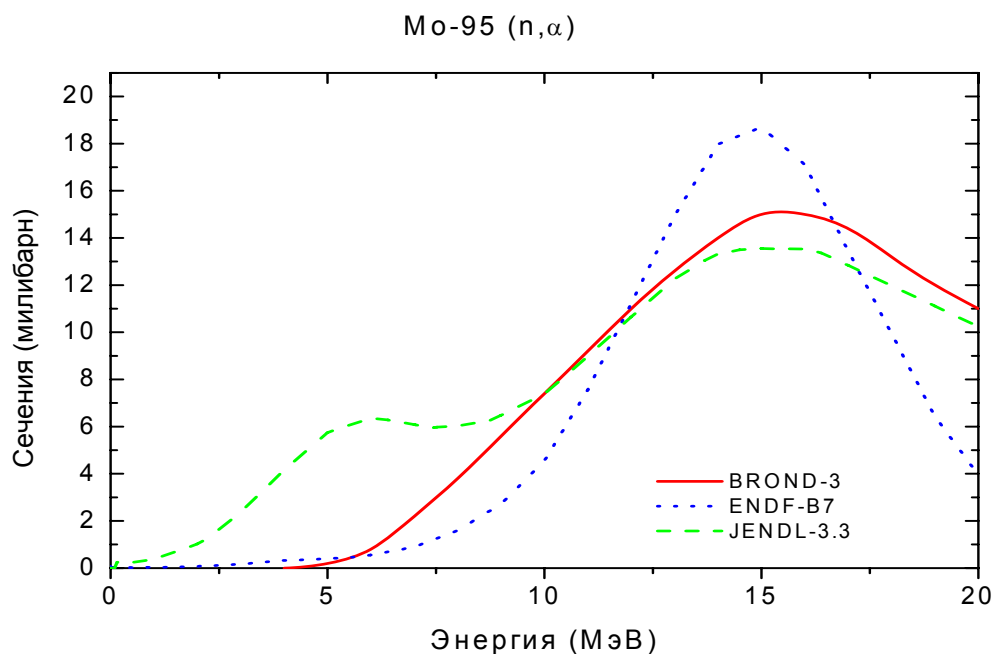


Рис. 14. Сечение реакции (n, α).

3.7. Сечение реакции (n,np), (n, $n\alpha$) (MT=28, 22).

На рис. 15 представлено сечение реакции $^{95}\text{Mo}(n,np)$. Зависимость из библиотеки BROND-3 лучше согласуется с эмпирической систематикой и с оценкой реакции (n,p) БРОНД-3. На рис. 16 представлено сечение реакции $^{95}\text{Mo}(n,n\alpha)$. Экспериментальных данных по реакции (n, $n\alpha$) нет. На рис. 8 приведены экспериментальные данные для реакции (n, $x\alpha$), которые являются суммой сечений реакций (n, α) и (n, $n\alpha$). Однако с точки зрения эмпирической систематики функций возбуждения реакции (n, $n\alpha$) лучше данные библиотеки BROND-3. Различия с оценкой JENDL-3.3 не являются существенными, но оценка ENDF-B7 лежит слишком высоко и не согласуется с оценкой реакции (n, α) из BROND-3, которая более предпочтительна (см. рис. 14).

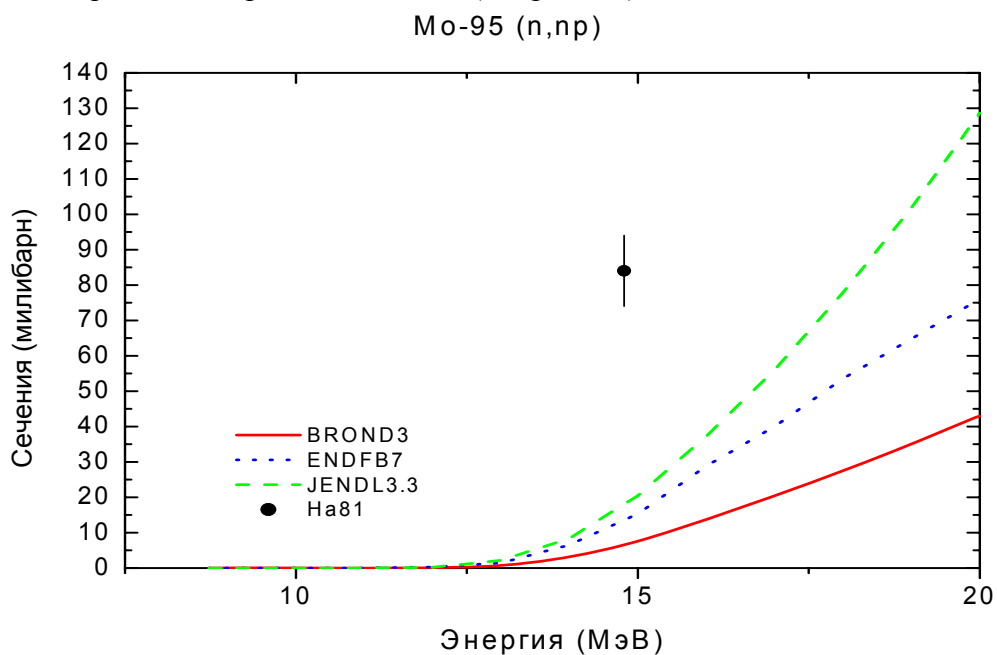


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

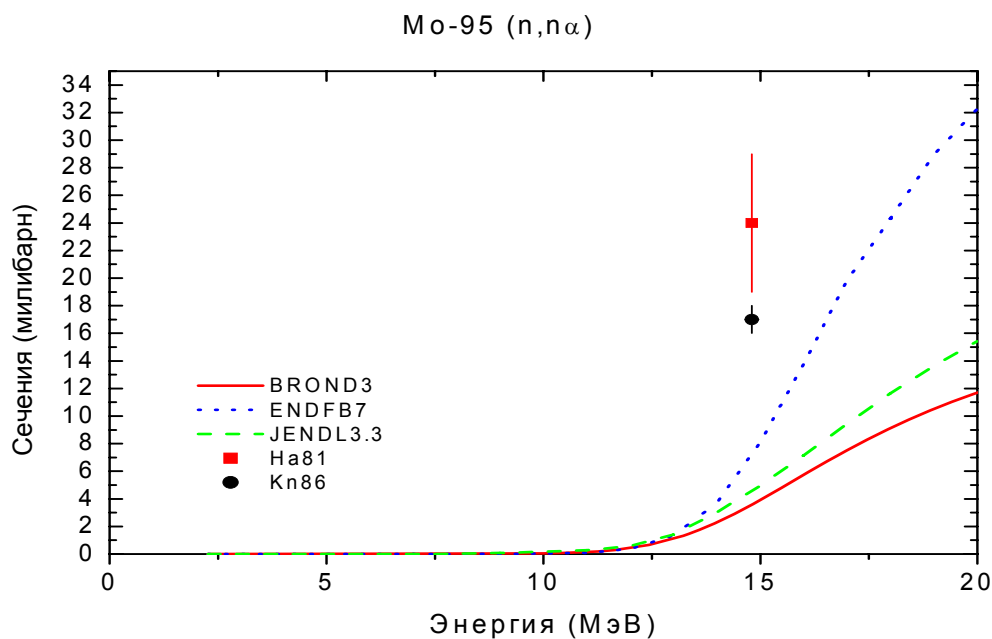


Рис. 16. Сечение реакции (n,n α).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MF=4, MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/6/.

MT=51-65 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy /6/ и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

6.

MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /18/.

7. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

8.

MT=51, 102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

8. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=3,51,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /19/ экспериментальных данных работы /28/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/6/.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).
2. Shwe, H. and Cote, R.E. Phys. Rev., **179** (1969) 1148.
3. Weigmann, H. et. al.: Nuclear Data for Science and Technology (1971 Knoxville), 749(1971).
4. Musgrove, A.R. De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).
5. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
6. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
7. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds. A. Gordini, G. Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
8. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
9. Konig, A.J., Dalaroché, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
10. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
11. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
12. Dietrich, S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables. 538 (1988) 199.
13. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
14. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
15. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
16. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. S.F. Mughabghab: Atlas of Neutron Resonances, to published by Academic Press, 2005 (5-th edition of BNL-325).
18. Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
19. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
20. Kapchigashev, S.P. 64Dubna, 104, 1964.
21. A. Smith, A. J. Phys., G26 (2000) 1467.
22. Allen, B.J. et al. Nucl. Sci. Eng., 82, 230 (1982).
23. Wynchank, S. et al., Phys. Rev., **166** (1968) 1234
24. Soo-Youl Oh, J. Chang, S. Mughabghab, Report ENDF-362, 2000.
25. Mughabghab, S.F., Dunford, C.L., Proc. Int. Conf. on Nucl. Sci. and Techn., p.784, Long Island, (1998),
26. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
27. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
28. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).

8. Перечень использованных экспериментальных работ

Полное сечение

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Pa80	M.V. Pasechnik	C, 80Kiev, 1,304, 1980	40617	4.58+05	3.12+06	54
Di68	M. Divadeenam	J, DA/B, 28, 3834, 1968	10523	1.30+05	6.40+05	103

Сечение радиационного захвата

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Mu76	A.R. Del Musgrove	J, NP/A, 270, 108, 1976	30357	3.0+03	2.0+05	15
Ka64	S.P. Kapchigashev	C, 64Dubna, 104, 1964	41233	3.25+01	4.60+04	47

Сечение реакции (n,p)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Filat01	A.A.Filatenkov	J,YK-2(1998)10	41240	1.3+06	1.5+06	7
Ikeda88	Y.Ikeda	R,JAERI-1312(1988)	22089	1.3+07	1.5+07	7
Gr87	Greenwood	J, PR/A, 35, 76,1987	12976	1.46+07	1.48+07	2
Molla86	N.I.Molla		30825	1.4+07	1.5+07	5
Marcinko86	A.Marcinkowski	J, ZP/A, 223, 91, 1986	30809	1.3+07	1.7+07	8
Rahman85	M.Rahman	J,NP/A,435(1985)43	21990	5.9+06	9.6+06	8
Qaim 74	S.Qaim	C,77Geel,327(1977)	20513	1.5+07		1

Сечение реакции (n,np).

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.48+07		1

Сечение реакции (n,n α).

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.48+07		1
Kneff86	D.W.Kneff	J, NSE, 92, 491, 1986	10933	1.48+07		1

Сечение реакции (n,d).

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.48+07		1

9. Заключение

7.1 Вывод На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка ENDF/B-VI. Оценка JENDL-3.3 принята для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в **БРОНД-3**.

Целесообразно включить файла **БРОНД-3** для **Mo-95** в библиотеку **Росфонд-2005**.

7.2. Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.5 Молибден-96

Содержание в естественной смеси 16.68%

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=96$

1.3. $A_w=95.08080$

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогами ниже 20 МэВ:

МТ	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$, МэВ	Ядро-продукт
04	n, n'	-0.7782	0.7864	Mo-96
16	$n, 2n$	-9.1543	9.2506	Mo-95
17	$n, 3n$	-16.5233	16.6883	Mo-94
22	$n, n\alpha$	-2.7639	2.7830	Zr-92
28	n, np	-9.2966	9.3944	Nb-95
102	n, γ	6.8210		Mo-96
103	n, p	-2.4044	2.4297	Nb-96
104	n, d	-6.9919	7.0655	Nb-95
105	n, t	-9.3023	9.4001	Nb-94
107	n, α	3.9760		Zr-93

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

2.4 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время оценка JENDL-3.3 для разрешенных и неразрешенных резонансов включена в оценки JEFF-3.0(=JEFF-3.1), CENDL-3 и последнюю версию ENDF/B-VII. Так как нет экспериментальных данных, указывающих на недостатки этой оценки, то она включена также в оценку БРОНД-3.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи /1/ на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию /2/ и радиационному захвату нейтронов /3, 4/. Эти параметры лишь незначительно отличаются от параметров, рекомендованных на Мугабгхабом и др. /5/. Были приняты средние радиационные ширины 0.114 эВ для s-резонансов и 0.136 для p-резонансов. Верхняя граница резонансной области принята равной 19 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.0$ фм /5/ и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) равны:

полное = 5.322 б, упругое = 4.727 б, захвата = 0.595 б,
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: = 17.3 б.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценку JENDL-3.3, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_{\text{OBS}} = (1.01 \pm .12)$ кэВ, и для p-резонансов - $D_1 = (.36 \pm .03)$ кэВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.53 \pm 0.08) 10^{-4}$ и $S_1 = (7.1 \pm 1.0) 10^{-4}$.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов часто привлекают анализ соответствия параметров резонансов распределению нейтронных ширин Портер-Томаса. Результаты такого анализа представлены на рис. 2. Данный анализ показывает, что в наблюдаемом наборе s-резонансов, по-видимому, пропущено около 3-4 резонанса и в наборе p-резонансов содержится 17-20 слабых резонансов, которые следовало бы отнести к d-волне. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но их учет существенен для оценки среднего расстояния между резонансами.

2.3. Область неразрешенных резонансов.

Для области неразрешенных резонансов все последние оценки, CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII, заимствуют оценку JENDL-3.3. Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

Нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [91I]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ.

Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.370\text{E-}4$, $S_1 = 5.480\text{E-}4$, $S_2 = 0.364\text{E-}4$, $G_g = 0.162$ эВ, $D_0 = 93.33$ эВ, $R = 6.698$ фм.

На рис. 3 и 4 оценки JENDL-3.3 для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с экстраполяцией энергетической зависимостью оценки JENDL-3.3. В диапазоне энергий от 100 эВ до 30 кэВ данные по сечениям радиационного захвата нейтронов измерены в работе [64K], а в диапазоне энергий от 4 до 100 кэВ также в работе [76M], и при соответствующем усреднении резонансов оценка воспроизводит эти данные.

На основе проведенного анализа было принято решение, что, несмотря на отмеченные выше погрешности анализа резонансов, **для области разрешенных и неразрешенных резонансов целесообразно включить в БРОНД-3 оценку JENDL-3.3.** При отсутствии новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений в области резонансных нейтронов.

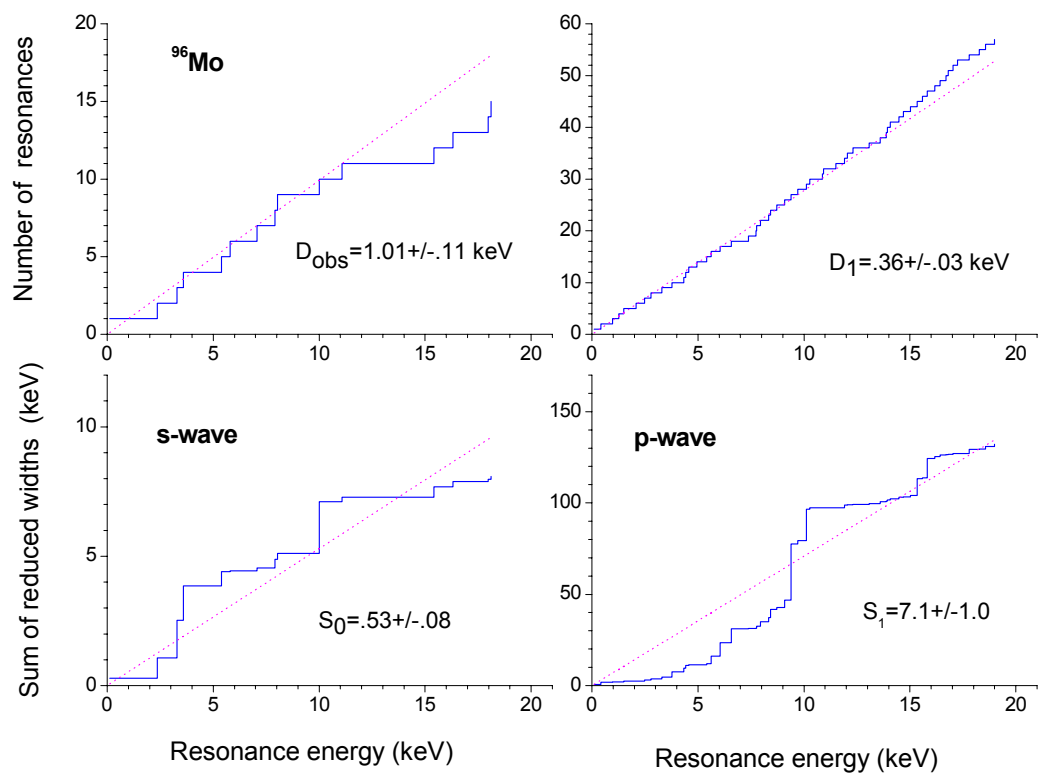


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин s- и p-резонансов

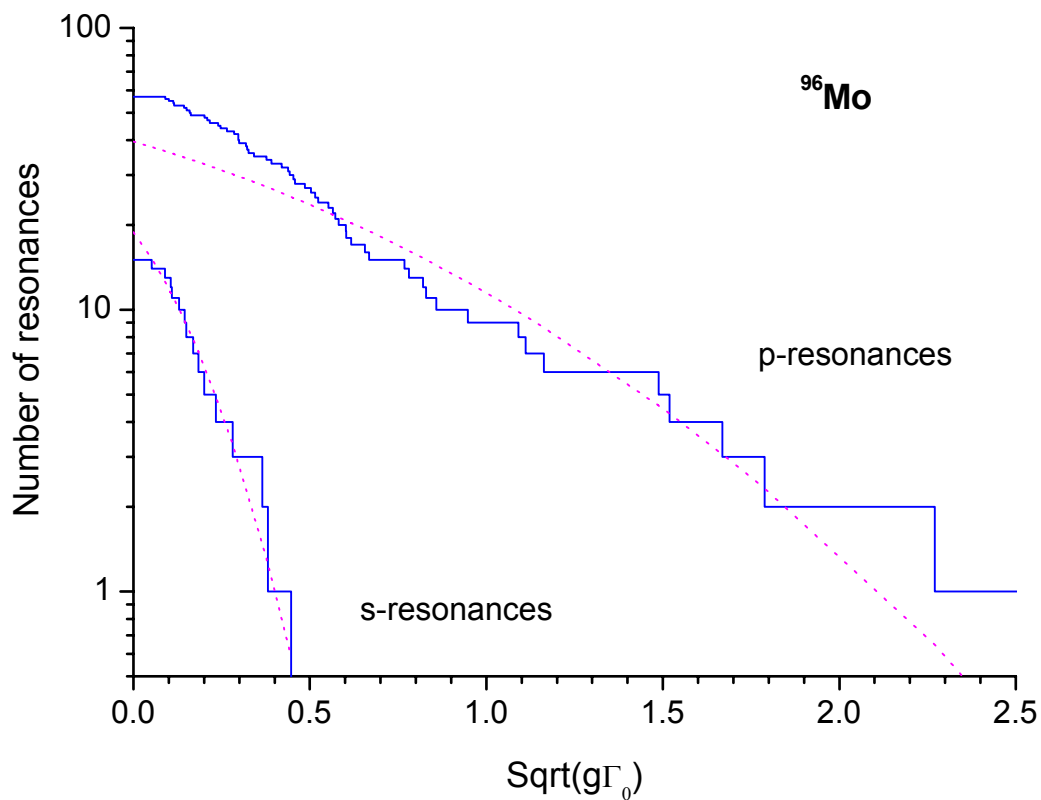


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов

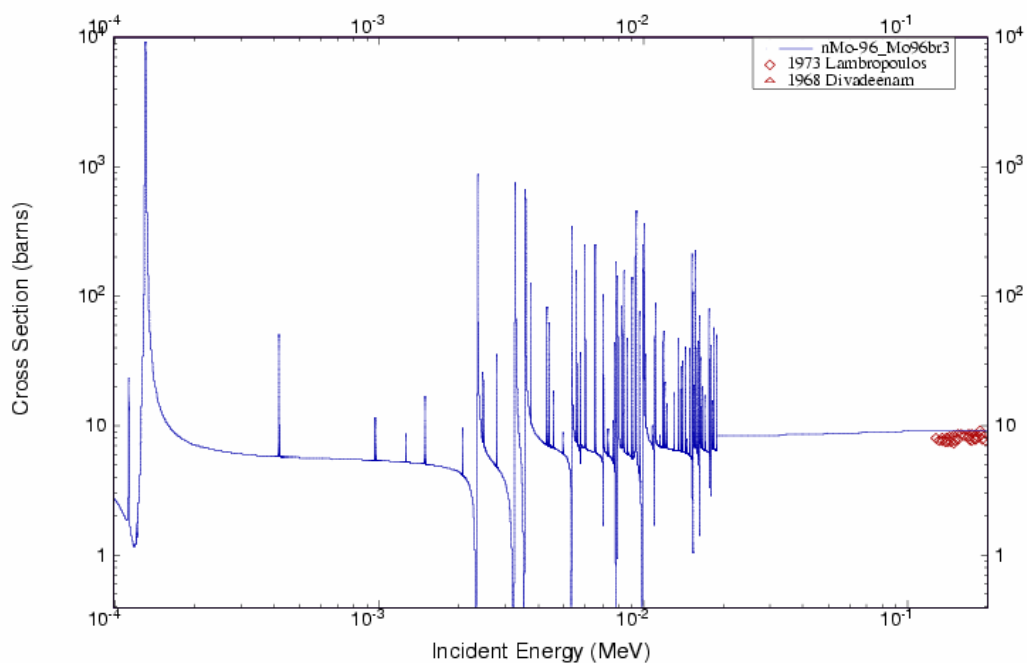


Рис. 3. Оценка полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными вне резонансной области

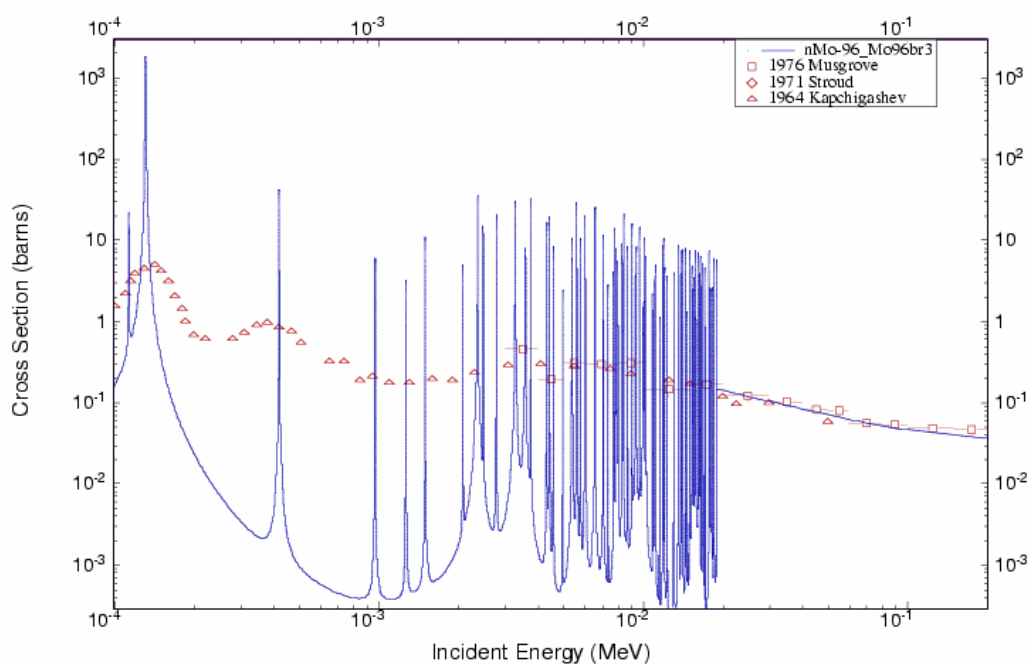


Рис. 4. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

Предварительно авторами оценки БРОНД-3 был исследован и оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния. Поскольку сечение реакции $(n,2n)$ достаточно хорошо известно из экспериментальных данных и основанной на них эмпирической систематики, теоретические расчеты сечений неупругого рассеяния проводились таким образом, чтобы получить согласованное описание функции возбуждения реакции $(n,2n)$ и оцененного вклада прямых процессов в области 20 МэВ. Полученные результаты по

функциям возбуждения других пороговых реакций корректировались на основе предсказаний эмпирических систематик.

Оцененные данные функции возбуждения неупругого рассеяния для одного изотопа сравнивались с данными для других изотопов данного элемента и изотопов соседних ядер, чтобы получить согласованное описание сечений для всех изотопов молибдена с учетом эмпирической тенденции изменения максимального сечения реакции неупругого рассеяния в зависимости от атомного номера и атомного веса изотопа.

Полученные результаты сравнивались данными библиотек ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Поскольку в библиотеке JEFF-3.1 для изотопов молибдена приняты данные библиотеки JENDL-3.3, сравнение производилось главным образом с данными библиотеки JENDL-3.3. В библиотеке ENDF-B7 в большинстве случаев также приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Поэтому сравнение с ENDF/B-VII проводилось только тех реакций, данные для которых отличаются от данных JENDL-3.3.

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин на основе подхода работы /26/. Нейтронные коэффициенты проникаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней 2+ и 3-. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /27/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /27/.

3.1. Полное нейтронное сечение (MT=1).

Полные нейтронные сечения в резонансной области энергий в библиотеках BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF-B7 рассчитаны по одним и тем же резонансным параметрам /5/ и полностью совпадают. В области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ сечения были получены расчетом по оптической модели с учетом экспериментальных данных. Значительный разброс экспериментальных данных не позволяет отдать предпочтение какой-либо одной оценке.

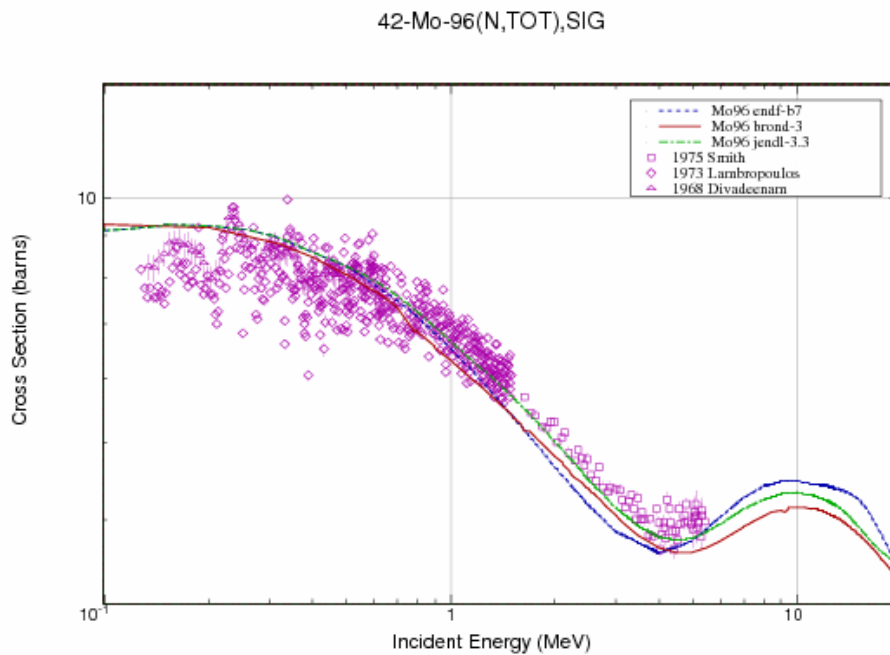


Рис.5. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2.Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис.6 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния с экспериментальными данными.

Сечение упругого рассеяния на изотопе Мо-96 в библиотеках ENDF-B7, JENDL-3.3 и BROND-3 близки, в области энергий 100-300 кэВ данные BROND-3 лежат несколько выше, что связано с более высоким сечением в этой области полного сечения (см. рис.5).

В области энергий 0.1-1 МэВ оценки практически совпадают. Заметные различия выше 1 МэВ не дают серьезных оснований отдать предпочтение какой-либо одной оценке.

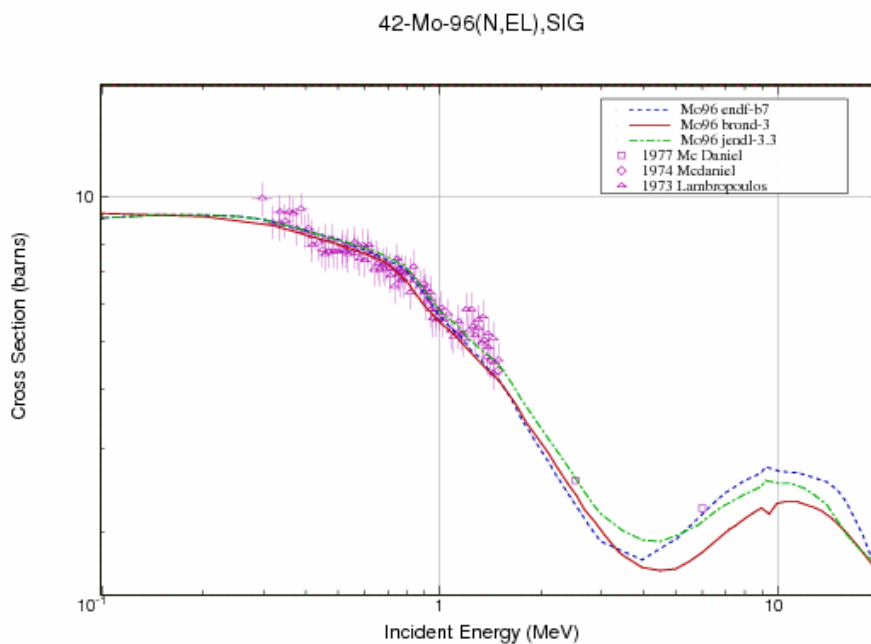


Рис. 6. Сечение упругого рассеяния в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-67).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.5945 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	0.77820	2+	1 → 0	0.77822	100
2	1.14790	0+	2 → 1	0.36967	100
3	1.49770	2+	3 → 1 3 → 0	0.71956 1.49781	71.1 28.9
4	1.62590	2+	4 → 3 4 → 1 4 → 0	0.1280 0.84769 1.62590	10.0 91.6 7.4
5	1.62810	4+	5 → 1	0.84993	100
6	1.86950	4+	6 → 5 6 → 3 6 → 1	0.24138 0.37181 1.09135	7.3 4.9 87.8
7	1.97840	3+	7 → 6 7 → 5 7 → 4 7 → 3 7 → 1	0.10895 0.35005 0.35256 0.48071 1.20023	0.1 3.9 3.3 22.1 70.6
8	2.09560	2+	8 → 2 8 → 1	0.9478 1.31733	3.7 96.3
9	2.21930	4+	9 → 7 9 → 6 9 → 5 9 → 4 9 → 3 9 → 1	0.24120 0.35005 0.59124 0.59325 0.72163 1.44113	19.5 18.6 27.4 12.3 21.1 1.1
10	2.23450	3-	10 → 6 10 → 4 10 → 3 10 → 1	0.36490 0.60867 0.73686 1.45620	4.4 46.1 44.7 4.7
11	2.42610	2+	11 → 4 11 → 3 11 → 1	0.80036 0.92840 1.64760	36.1 4.6 59.3
12	2.43840	5+	12 → 9 12 → 7 12 → 6 12 → 5	0.21898 0.45988 0.56880 0.81080	3.7 28.6 57.5 10.2
13	2.44060	6+	13 → 5	0.81258	100

14	2.48100	2+	14 → 6 14 → 5 14 → 3 14 → 1	0.61140 0.85303 0.98310 1.70280	13.4 53.4 8.1 25.1
15	2.50150	1+	15 → 3 15 → 2 15 → 1	1.0036 1.3537 1.7237	15.9 53.9 30.2
16	2.54040	3+	16 → 4 16 → 3 16 → 1	0.9146 1.0427 1.7618	8.9 25.1 66.0
17	2.59430	3+	17 → 9 17 → 7 17 → 5 17 → 4 17 → 3 17 → 1	0.3749 0.61590 0.9664 0.9685 1.09658 1.81560	16.7 22.3 24.6 14.2
18	2.59450				

На рис. 7 показаны функции возбуждения интегрального сечения неупругого рассеяния из библиотек BROND-3 и JENDL-3.3. Функция возбуждения в библиотеке ENDF-B7 взята из JENDL-3.3. Экспериментальные данные по интегральному сечению неупругого рассеяния нейтронов отсутствуют. Данные BROND-3 в области энергий нейтронов ниже 2 МэВ согласуются с данными указанных библиотек, но при более высоких энергиях они лежат выше. Учитывая, что при расчетах сечений в BROND-3 была применена несферическая оптическая модель и улучшенные параметры, зависимость из библиотеки BROND-3 предпочтительнее.

На рис. 8-9 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первом уровне Mo-96 в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, оценки JENDL-3.3 и BROND-3 практически совпадают. На Рис.9 представлено сечение неупругого рассеяния на втором уровне. В области до энергии 3 МэВ оценки также совпадают, выше энергии 3 МэВ оценка BROND-3 предпочтительнее. На Рис.10 показано сечение на третьем уровне.

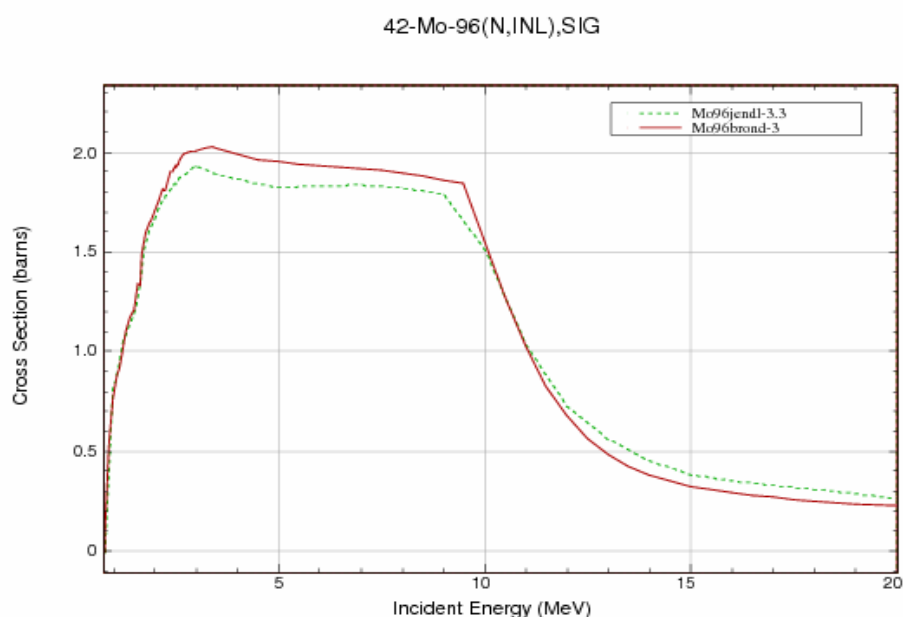


Рис.7. Полное сечение неупругого рассеяния нейтронов.

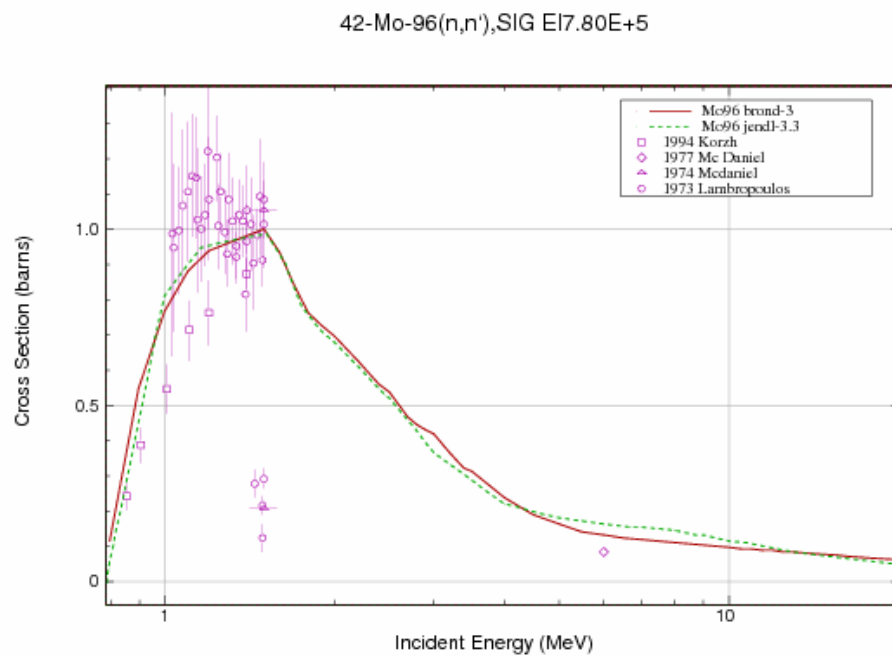


Рис.8. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на первом уровне.

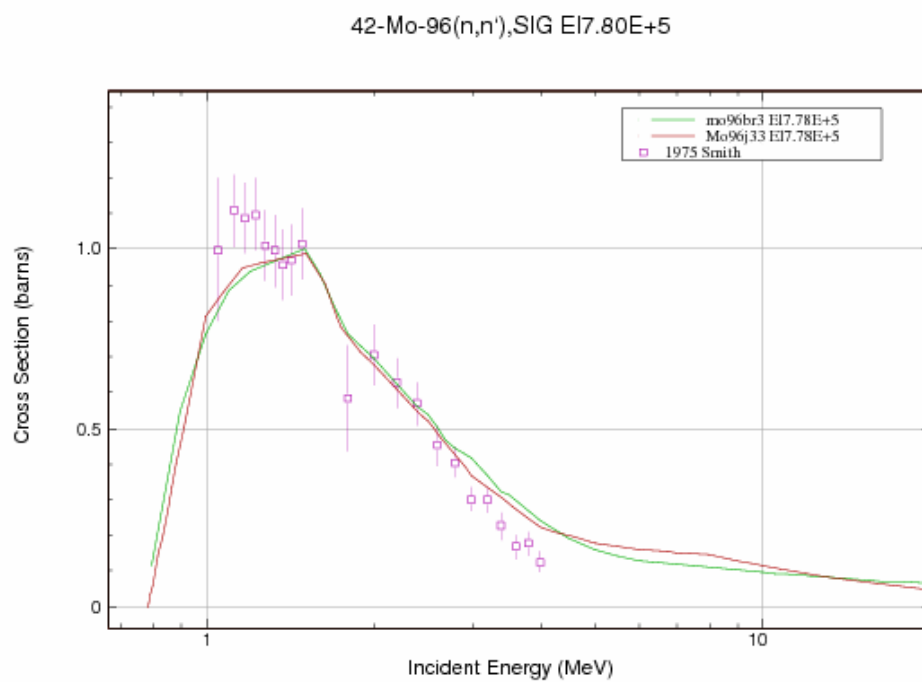


Рис.9. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на первом уровне.

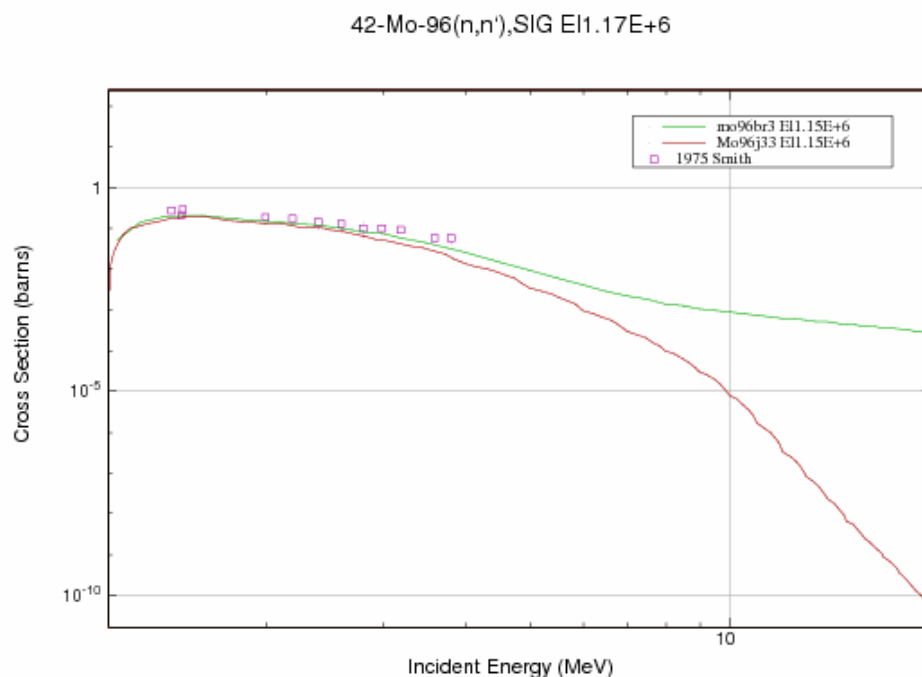


Рис. 10. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на втором уровне.

3.4. Сечение реакции радиационного захвата (MT=102).

На Рис. 11 показано сечение радиационного захвата в нерезонансной области энергий нейтронов. В области до 200 кэВ оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 совпадают, но выше 200 кэВ имеются существенные различия, однако в отсутствии экспериментальных данных трудно отдать предпочтение какой-либо одной зависимости. Данные в ENDF-B7 взяты из JENDL-3.3.

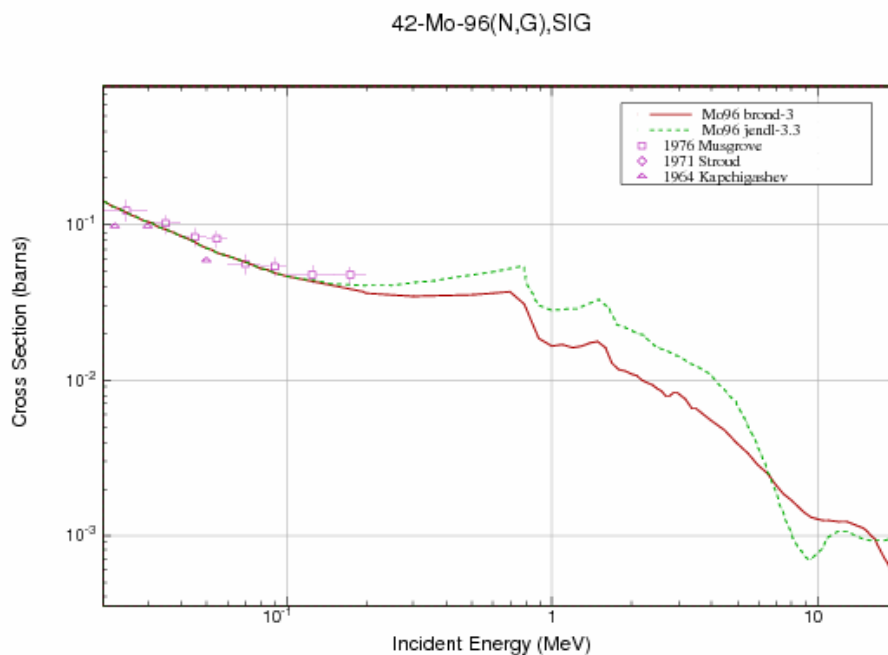


Рис. 11. Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 0.019-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции $(n,2n)(n,3n)$ (MT=16, 17).

На рис. 12 показаны теоретические оценки сечений реакции $(n,2n)$ библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения этой реакции в ENDF-B7 взяты из JENDL-3.3. Данные BROND-3 и JENDL-3.3 различаются, но обе оценки по форме и абсолютной величине согласуются с эмпирической систематикой и выглядят равноценными.

Экспериментальных данных по сечению реакции $(n,3n)$ нет (рис. 13). Оценка библиотеки ENDF-B7 также принята из JENDL-3.3. Различия в данных BROND-3 и JENDL-3.3 не являются существенными, обе оценки равноценны.

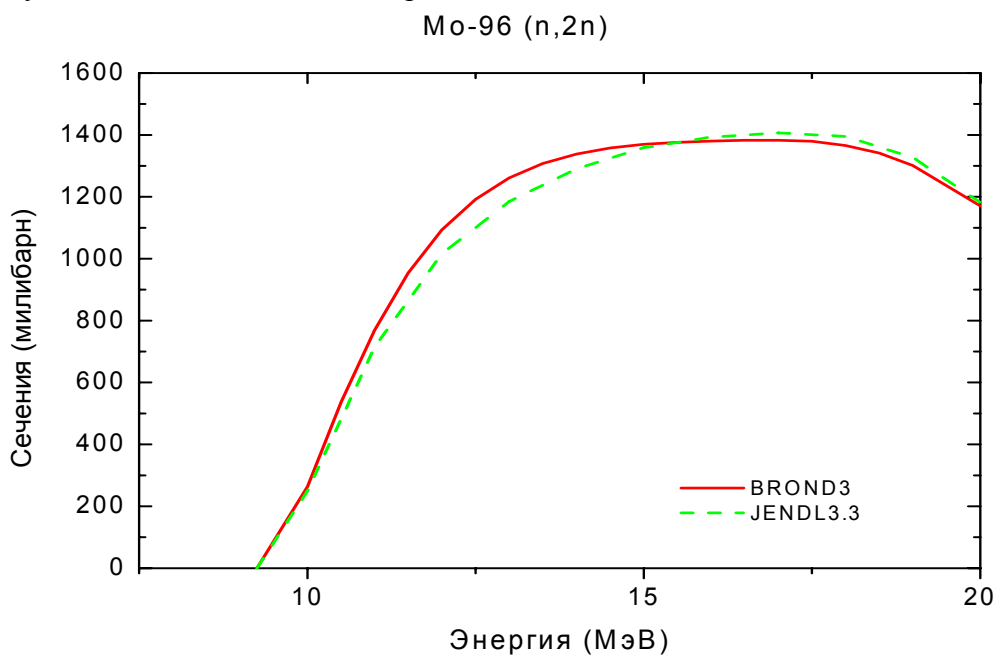


Рис. 12. Сечение реакции $(n,2n)$.

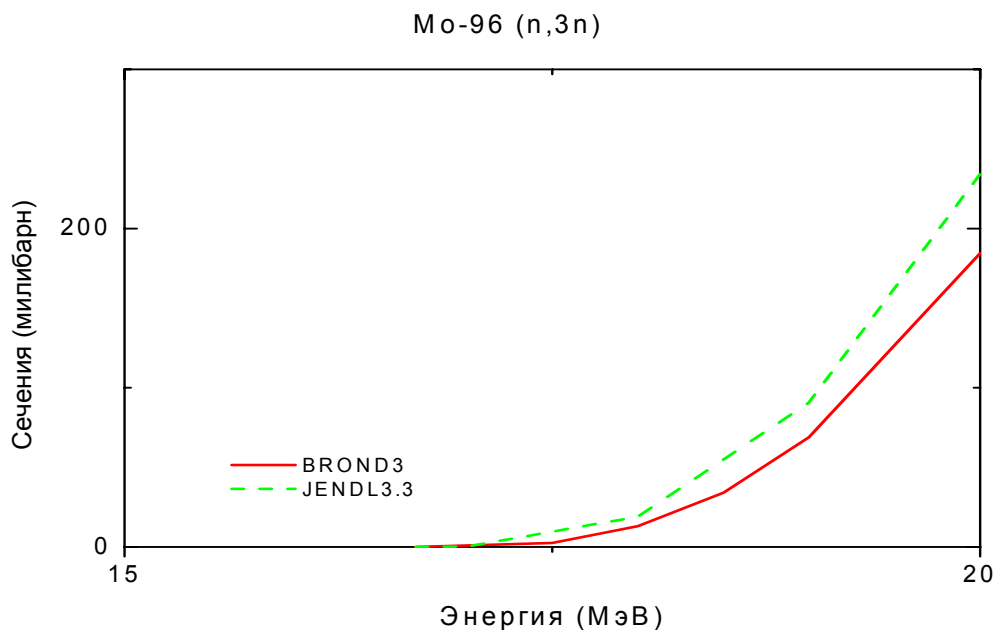


Рис. 13. Сечение реакции $(n,3n)$.

3.6. Сечение реакции (n,p),(n,d), (n,t), (n, α)(MT=103,104,105,107).

Сечение реакции (n,p) в ENDF-B7 принято из JENDL-3.3. Расхождения в сечениях реакции (n,p) библиотек BROND-3 и JENDL-3.3 незначительны (см. рис.14), сечение в обоих случаях соответствует экспериментальным данным.

На рис. 15 показано сечение реакции (n,d). Сечение реакции из библиотеки BROND-3 предпочтительнее, поскольку при его расчете более корректно учтен вклад прямых процессов.

Сечение реакции (n,t) в библиотеках БРОНД-3 и ENDF-B7 принято из JENDL-3.3

На рис. 16 представлено сечение реакции (n,a). Экспериментальных данных нет. Рассчитанная по теории ядерных реакций функция возбуждения реакции (n,a) из библиотек BROND-3 по форме и абсолютной величине в максимуме сечения лучше согласуется с эмпирической систематикой /15/.

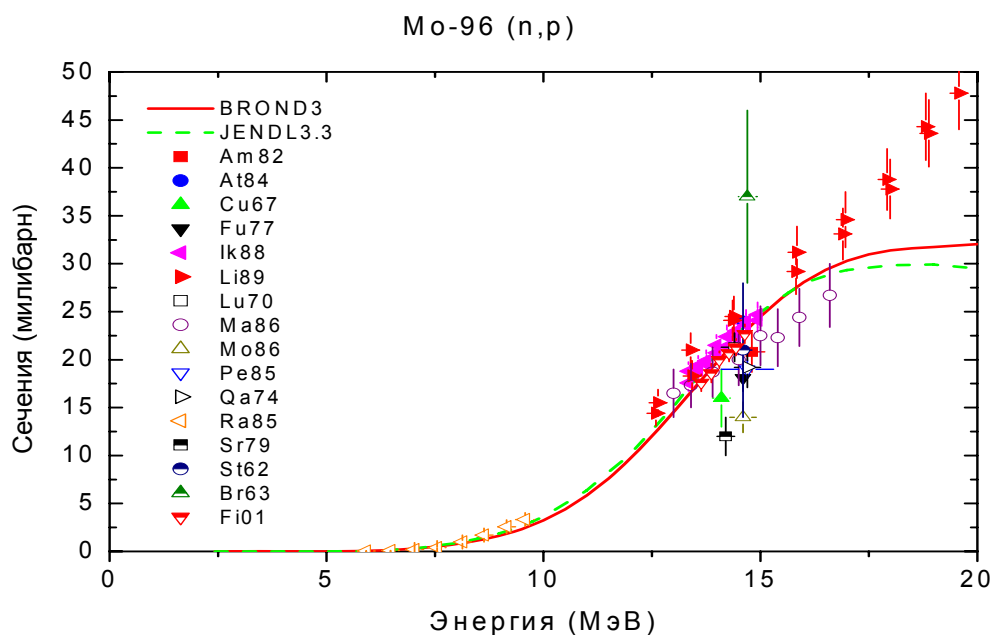


Рис. 14. Сечение реакции (n,p).

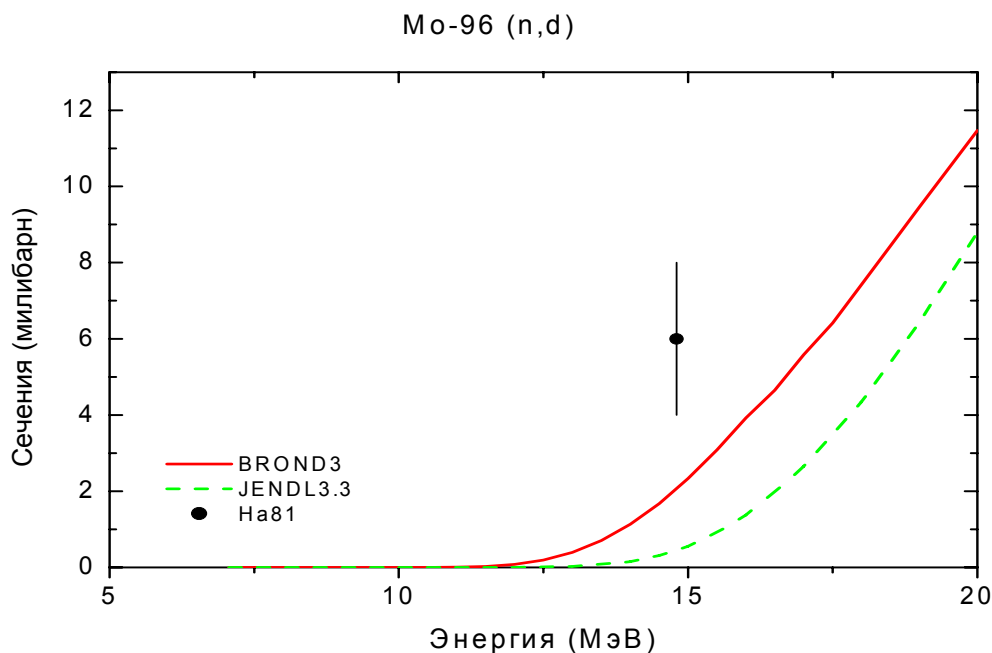


Рис.15. Сечение реакции (n,d).

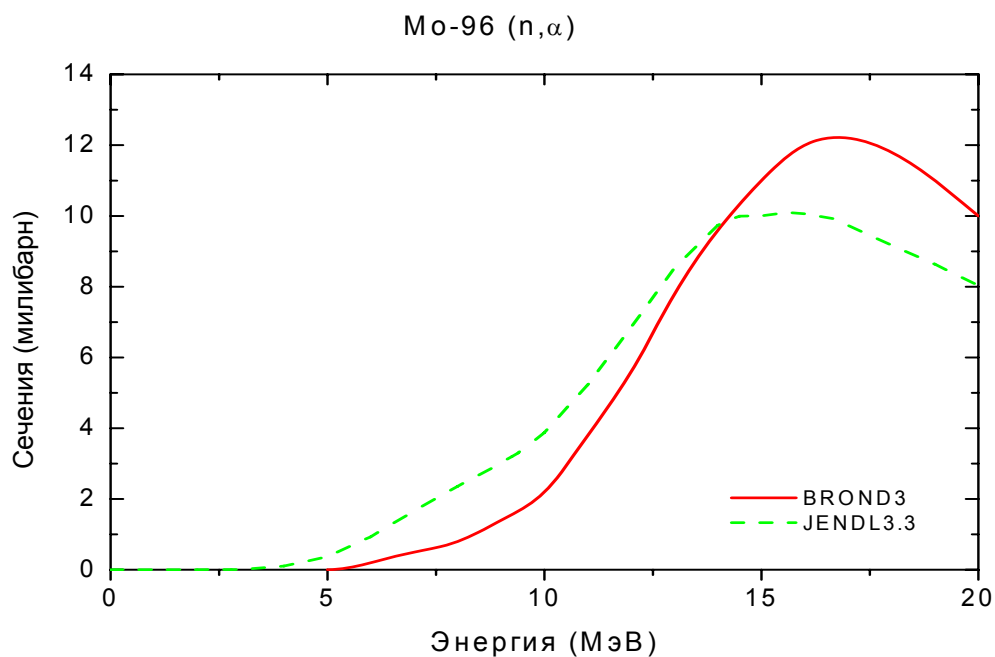


Рис.16. Сечение реакции (n,α).

3.7. Сечение реакции (n,np),(n,nα) (MT=28, 22).

На рис. 17 и 18 показаны функции возбуждения реакций (n,np) и (n,nα). Экспериментальных данных нет, поэтому критерием отбора является согласованность сечений этих с сечениями реакций (n,p) и (n,α),соответственно. Функция возбуждения реакции (n,np) из BROND-3 лучше согласуется с сечением реакции (n,p) и с систематикой сечений реакции (n,xp).

Сечения реакции (n,na) библиотеки ENDF-B7 взяты из JENDL-3.3. Данные BROND-3 отличаются незначительно, и поэтому может быть рекомендована любая из трех оценок. Экспериментальные точки на рис. 18 представляют собой сумму сечений реакций (n,a) и (n,na). Сумма оцененных сечений этих реакций из БРОНД-3 и JENDL-3.3 согласуется с нижней экспериментальной точкой.

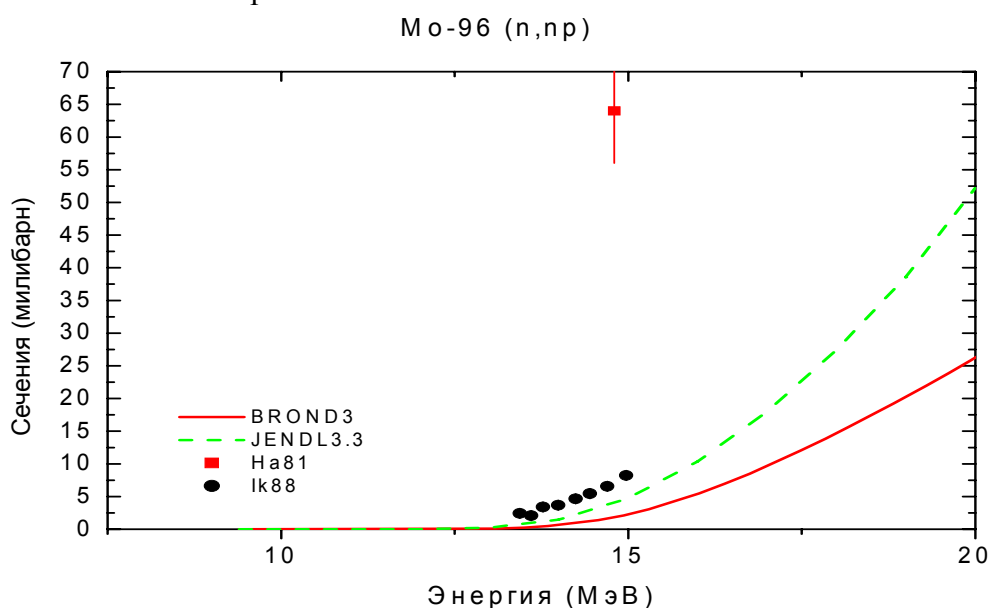


Рис. 17. Сечение реакции (n,np).

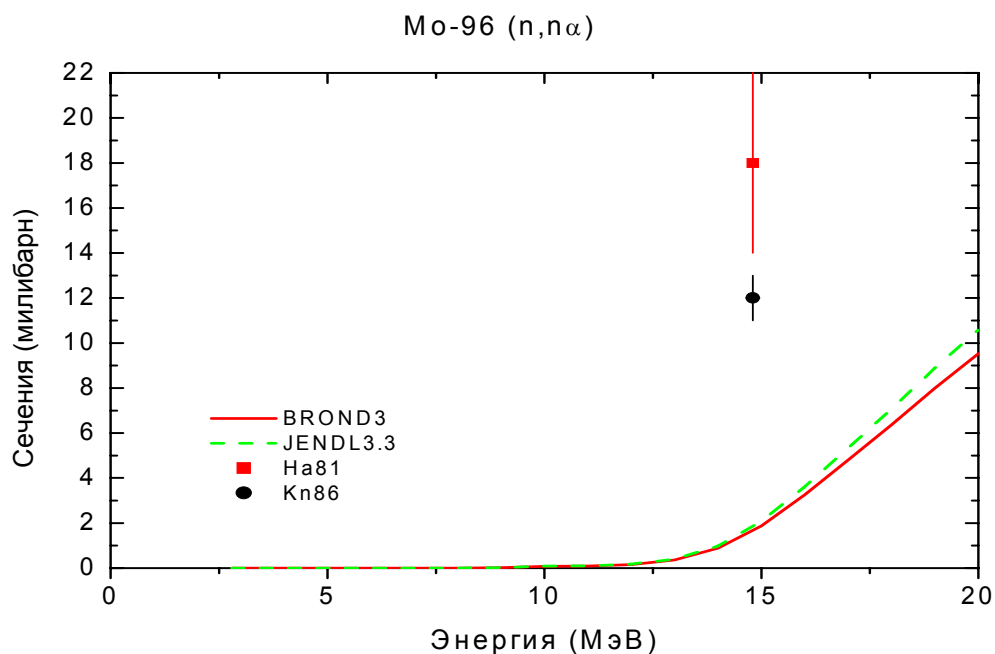


Рис. 18. Сечение реакции (n,nα).

В результате выполненного сравнительного анализа предпочтительны сечения всех пороговых реакций из библиотеки BROND-3.

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/6/. На Рис.17-18 показаны угловые распределения из библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 в сравнении с экспериментальными данными.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

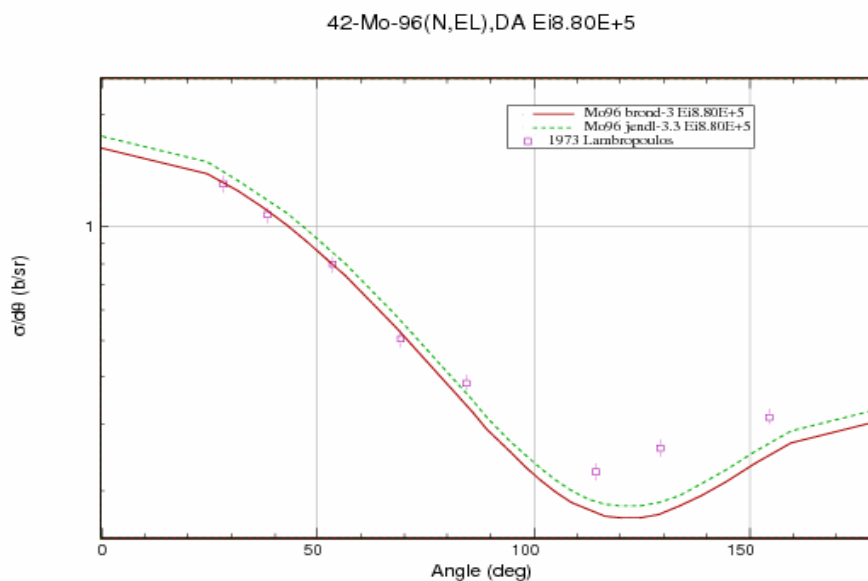


Рис.19. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов.

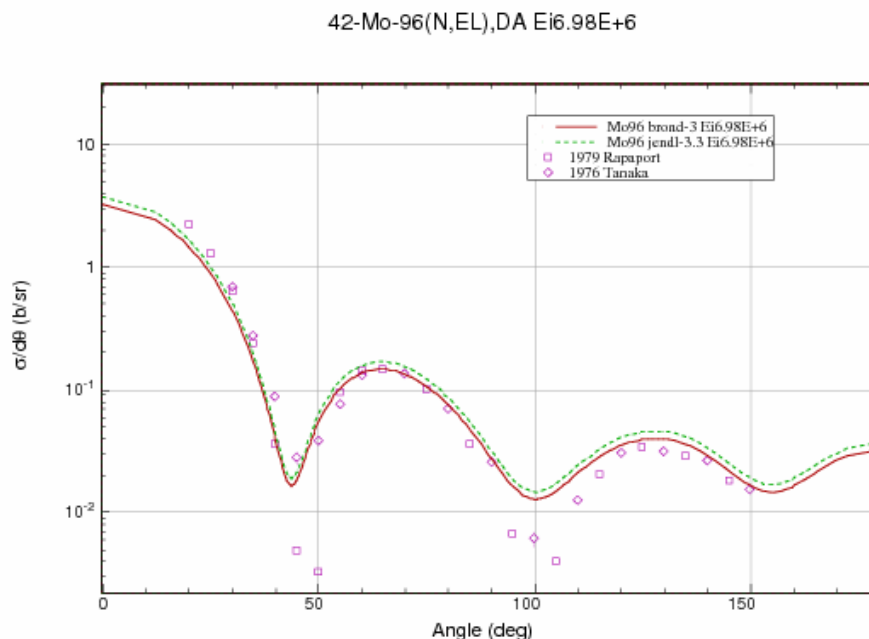


Рис. 20. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy и Dwuck.

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

5.

MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /17/

6. Множественность образования гамма-лучей MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

8.

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

9. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

10.

MT=3,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

10. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy /6/.

Литература

1. Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).
2. Wasson, O.A. et. al.: Phys. Rev., c7, 1532(1973).
3. Weigmann, H. et. al.: 1971 Konoxville, 749(1971).
4. Musgrove, A.R.De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).

5. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
6. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
7. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
8. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
9. Koning, A.J., Dalaroche, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
10. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
11. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
12. Dietrich. S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1988) 199.
13. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
14. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
15. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
16. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
18. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
19. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).
20. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
21. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.

Перечень использованных экспериментальных работ

1. Полное сечение

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Sm75	A.B.Smith	J,NP/A,244,213,1975	10524	1.64+06	5.51+06	88
La73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	1.01+05	1.50+06	594
Di68	M.Divadeenam	J,DA/B,28,3834,1968	10523	1.30+05	6.40+05	103

2. Сечение радиационного захвата

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Mu76	A.R.Del.Musgrove	J,NP/A,270,108,1976	30357	3.0+03	2.0+05	15
Ka64	S.P.Kapchigashev	C, 64Dubna, 104, 1964	41233	3.25+01	4.60+04	47

3. Сечение упругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Mc Daniel77	F.D.Mc. Daniel	P,A-KTY-74/77,3,1977	10770 12782	2.52+06 6.00+06		1 1
Mcdaniel74	F.D.Mcdaniel	J,PR/C,10,1087,1974	10391	1.50+06		1
Lambropoulos73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	3.0+05	1.5+06	130

4. Сечение неупругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Mc Daniel77	F.D.Mc. Daniel	P,A-KTY-74/77,3,1977	10770 12782	2.52+06 6.00+06		1 1
Mcdaniel74	F.D.Mcdaniel	J,PR/C,10,1087,1974	10391	1.50+06		1
Lambropoulos73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	3.0+05	1.5+06	130
Korzh94	I.A.Korzh	J, UFZ,39, 785, 1994	32201	9.07+05	1.40+06	5

5. Сечение реакции (n,p)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Filat01	A.A.Filatenkov	R, RI-258, 2001	41424	1.3+06	1.5+06	6
Liskien90	H.Liskien	J, ARI,41(1990)83	22125	1.3+07	2.0+07	15
Ikeda88	Y.Ikeda	R, JAERI-1312(1988)	22089	1.3+07	1.5+07	16
Molla86	N.I.Molla	R, INDC(BAN)-003, 1986	30985	1.4+07	1.5+07	5
Marcinko86	A.Marcinkowski	J, ZP/A, 223, 91, 1986	30809	1.3+07	1.7+07	8
Rahman85	M.Rahman	J, NP/A, U, 435(1985)43	21990	5.9+06	9.6+06	8
Pepelnik85	R.Pepelnik	P, NEANDC(E)-26U, 1985	21999	1.47+07		1
Atsumi84	H.Atsumi	R, NEANDC(J)106U, 1984	21935	1.5+07		1
Anemiya82	S.Anemiya	J, NST, 19, (10), 781, 1982	21840	1.48+07		1
Srinivas79	R.Srinivasa	C,79Knoxvill, 848	30576	1.4+07		1
Fujino77	Y.Fujino	R, NEANDC(J)-51, 1977	20850	1.46+07		1
Qaim 74	S.Qaim	C, 77Geel, 327(1977)	20513	1.5+07		1
Lu70	W.D.Lu	J, PR/C, 1, 358, 1970	10145	1.44+07		1
Cu67	P.Cuzzocrea	J, NP/A, 103, 616, 1967	21141	1.41+07		1
Br63	E.T.Bramlitt	J, PR, 131, 2649, 1963	11590	1.47+07		1
St62	F.Strohal	J, NP, 30,49, 1962	30008	1.46+07		1

6. Сечение реакции (n,d)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.48+07		1

7 Сечение реакции (n,np)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Ikeda88	Y.Ikeda	R, JAERI-1312(1988)	22089	1.3+07	1.5+07	16
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.48+07		1

8. Сечение реакции (n,na)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Kneff86	D.W.Kneff	J, NSE, 92, 491, 1986	10933	1.48+07		1
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.48+07		1

9. Заключение

7.1 Выводы На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3. Целесообразно включить файла БРОНД-3 для Мо-96 в библиотеку Росфонд-2005.

7.2. Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.6. Молибден-97

Содержание в естественной смеси: 9.55 %.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=97$

1.3. $A_w=96.07350$

1.4. Перечень нейтронных реакций:

МТ	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$, МэВ	Ядро-продукт ^{*)}
04	n, n'	-0.4809	0.4859	Mo-97
16	$n, 2n$	-6.8159	6.8869	Mo-96
17	$n, 3n$	-15.9750	16.1348	Mo-95
22	$n, n\alpha$	-2.8214	2.8508	Zr-93
28	n, np	-9.2204	9.3164	Nb-96
102	n, γ	8.6420		Mo-97
103	n, p	-1.1504	1.1624	Nb-97
104	n, d	-6.9200	6.9920	Nb-96
105	n, t	-7.6325	7.7119	Nb-95
106	$n, {}^3\text{He}$	-8.7369	8.8279	Zr-95
107	n, α	5.3736		Zr-94

2. Нейтронные сечения в резонансной области (MF=2).

2.1. Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи [1] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию [2] и радиационному захвату нейтронов [3, 4]. Эти параметры для большинства резонансов близки к параметрам, рекомендованных Мугабгабом и др. [5]. Верхняя граница резонансной области принята равной 1.8 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 6.9$ фм [5] и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин: 130 мэВ для s-резонансов и 150 мэВ для p- резонансов. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3 и также в JEFF-3.1. В 2005 г. Мугабгаб [17] пересмотрел параметры разрешенных резонансов. Наиболее существенными являются перенос резонанса с энергией 227.6 эВ из списка s-резонансов в список p-резонансов и, наоборот, перенос 5 резонансов в диапазоне энергий от 1133 до 1364 эВ списка p- в список s- резонансов. Были также увеличены до 162 мэВ средние значения радиационных ширин s-резонансов и до 210 мэВ средние радиационные ширины p-резонансов. Верхняя граница области разрешенных резонансов была увеличена до 2.0 кэВ. Пересмотренные параметры резонансов были включены в оценку ENDF/B-VII. Радиационных ширины резонансов, использованные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Хорошо видны существенные различия радиационных ширин большинства резонансов в обеих оценках. Так как не появилось каких-либо новых данных по параметрам нейтронных резонансов, то основания для пересмотра резонансов в оценке ENDF/B-VII в настоящее время не ясны. Ниже будет показано, что принятые в ENDF/B-VII изменения орбитальных моментов резонансов не приводит к сколь-либо заметному изменению оценок нейтронных силовых функций и средних расстояний между резонансами.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

оценка	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	Эксперимент [23]
полное	7.957 б	8.849 б	
упругое	5.857 б	6.653 б	
захвата	2.100 б	2.196 б	2.5±0.2 б
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ:	17.1 б	21.72 б	14±3 б

Следует отметить, что в предыдущей компиляции параметров нейтронных резонансов [5] сечение захвата тепловых нейтронов принималось равным 2.1 ± 0.5 б и тот же резонансный интеграл захвата, что и приведенный выше [23]. Различие оценок полных сечений и сечений упругого рассеяния целиком обусловлены существенным отличием параметров отрицательного резонанса. Обе оценки дают заниженные значения сечения радиационного захвата нейтронов, но JENDL-3.3 в пределах погрешности согласуется с экспериментальным значением резонансного интеграла захвата нейтронов.

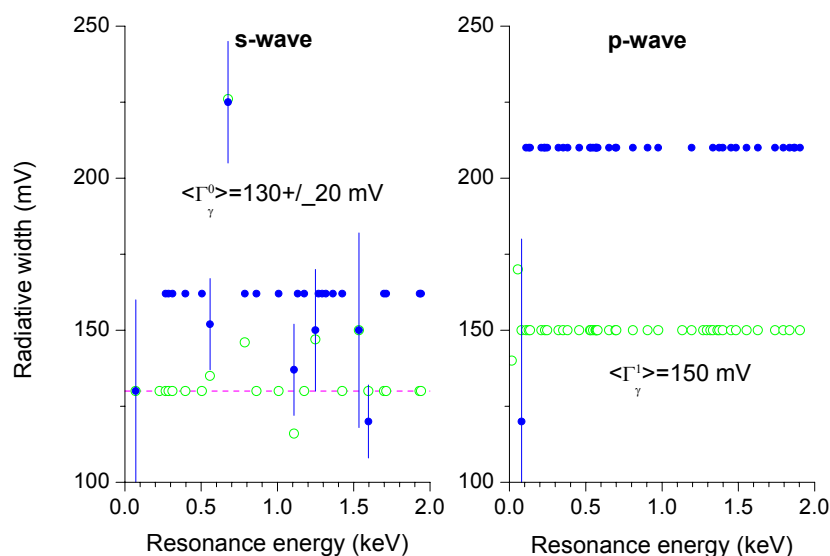


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки), пунктиром показаны средние значения ширины, которые приняты для резонансов с неизвестными ширинами

2.2. Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (90 \pm 10)$ эВ, и для p-резонансов – $D_1 = (35 \pm 5)$ эВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.38 \pm 0.06) 10^{-4}$ и $S_1 = (9.0 \pm 1.0) 10^{-4}$. Перенос в ENDF/B-VII пяти резонансов из списка p- в набор s-резонансов не изменяет существенно оценки силовых функций, но приводит к заметному отклонению нарастающей суммы числа s-резонансов от линейной аппроксимации (см. рис. 2), и такое отклонение не кажется физически оправданным.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов обычно привлекается анализ

соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов обеих оценках в, по-видимому, пропущено 8 или 9 резонансов и в наборе p-резонансов пропущено более 30 слабых резонансов. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они заметно изменяют оценки среднего расстояния между резонансами.

Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, для набора JENDL-3.3 равны $D_0=(59 \pm 5)$ эВ и $D_1=(21.2 \pm 1.7)$ эВ и для ENDF/B-VII $D_0=(56 \pm 4)$ эВ и $D_1=(20.1 \pm 1.7)$ эВ. Отношение $D_0/D_1=2.78 \pm 0.43$ хорошо согласуется с общей статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной ~ 3 .

2.3. Область неразрешенных резонансов.

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S0, S1 и S2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [20, 4]. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.369E-4$, $S_1 = 5.479E-4$, $S_2 = 0.364E-4$, $G_g = 0.180$ эВ, $D_0 = 58.76$ эВ, $R = 6.687$ фм

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для данного изотопа нет экспериментальных данных по полным нейтронным сечениям, имеются только данные по сечениям радиационного захвата нейтронов [20, 4]. При соответствующем усреднении резонансов оценки также достаточно хорошо согласуются с такими данными.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на достаточно хорошее согласие нейтронных сечений, вычисленных для обеих оценок параметров нейтронных резонансов, **оценка JENDL-3.3 является предпочтительной и она включена в БРОНД-3 как для разрешенных, так и для неразрешенных резонансов.** При отсутствии новых экспериментальных данных изменения параметров нейтронных резонансов, сделанные в ENDF/B-VII не кажутся оправданными.

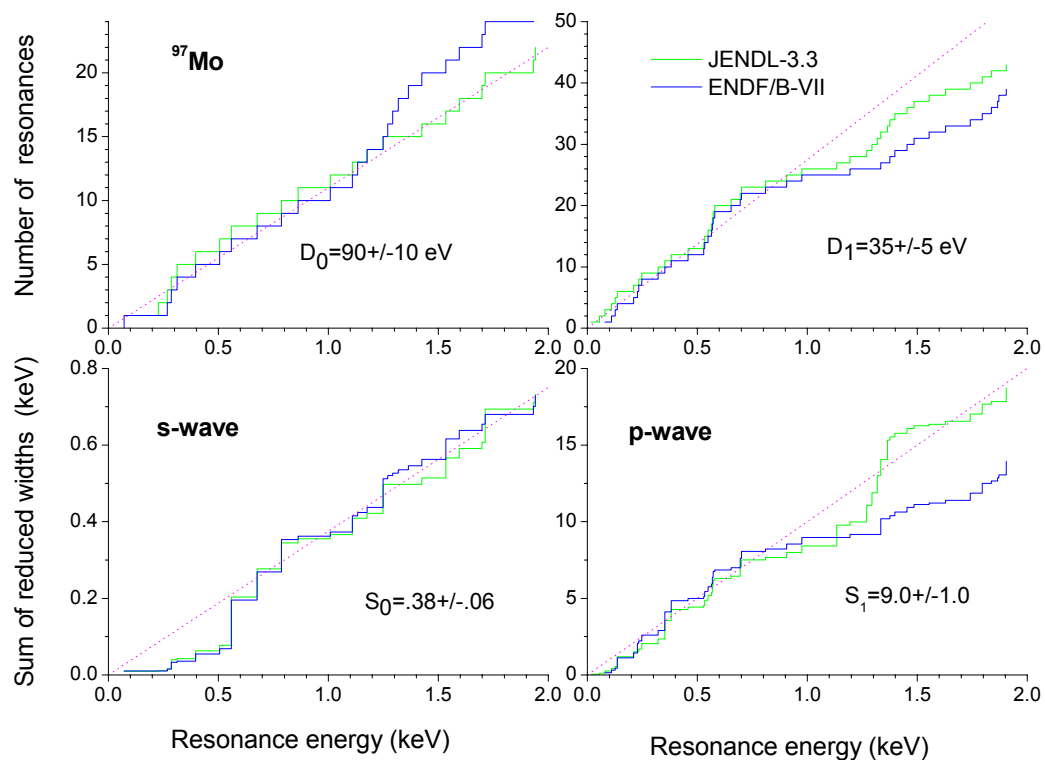


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

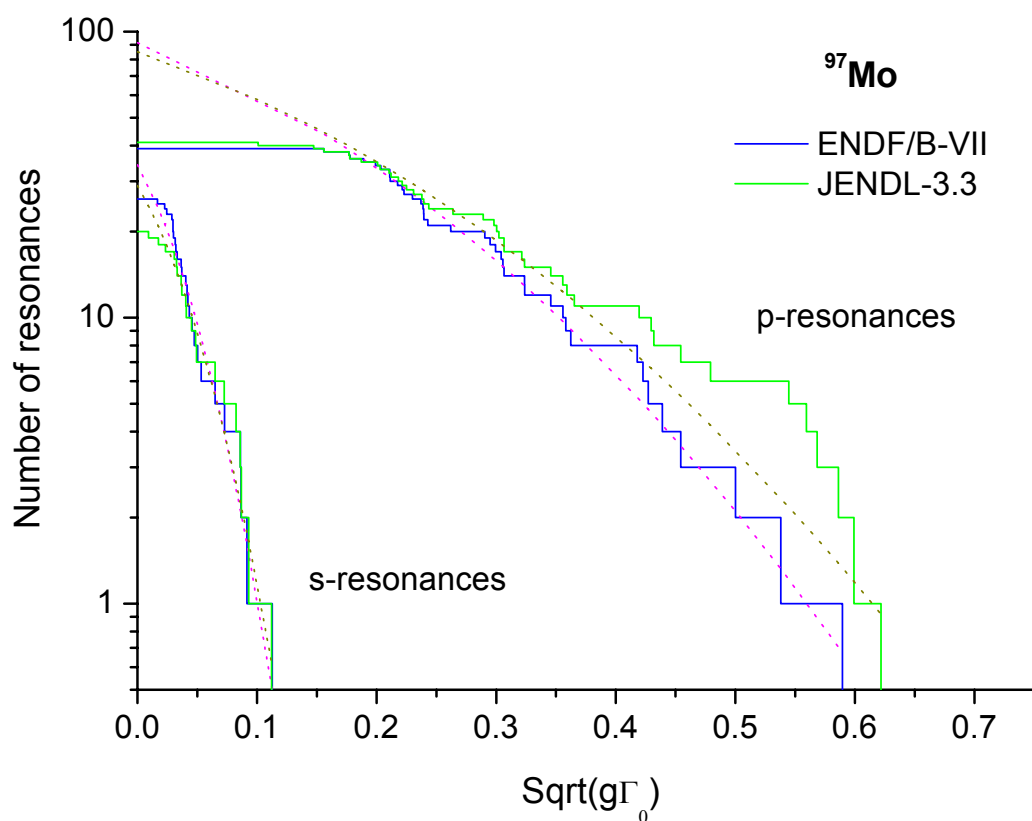


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

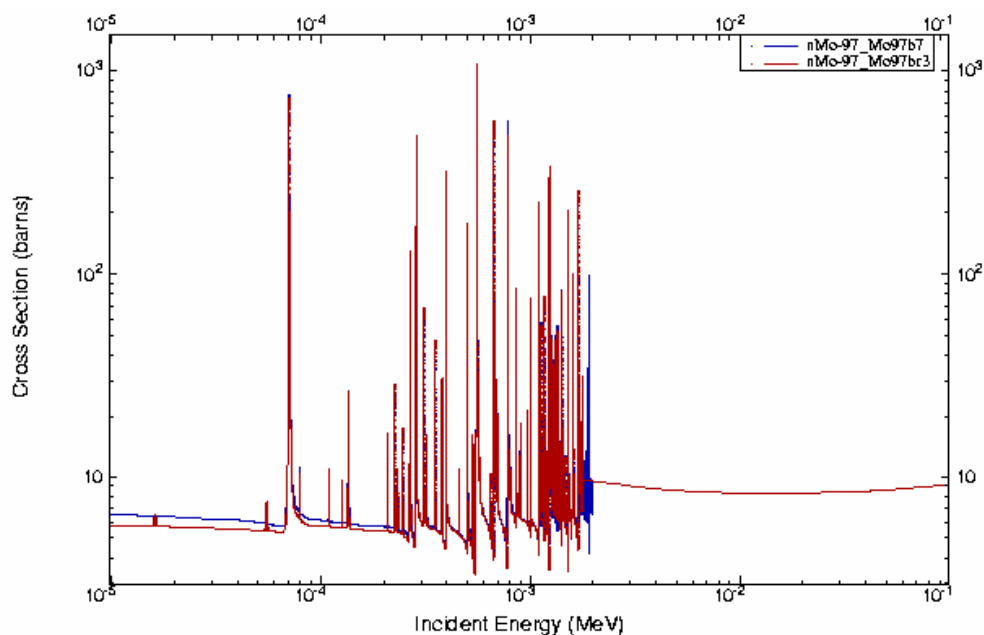


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов

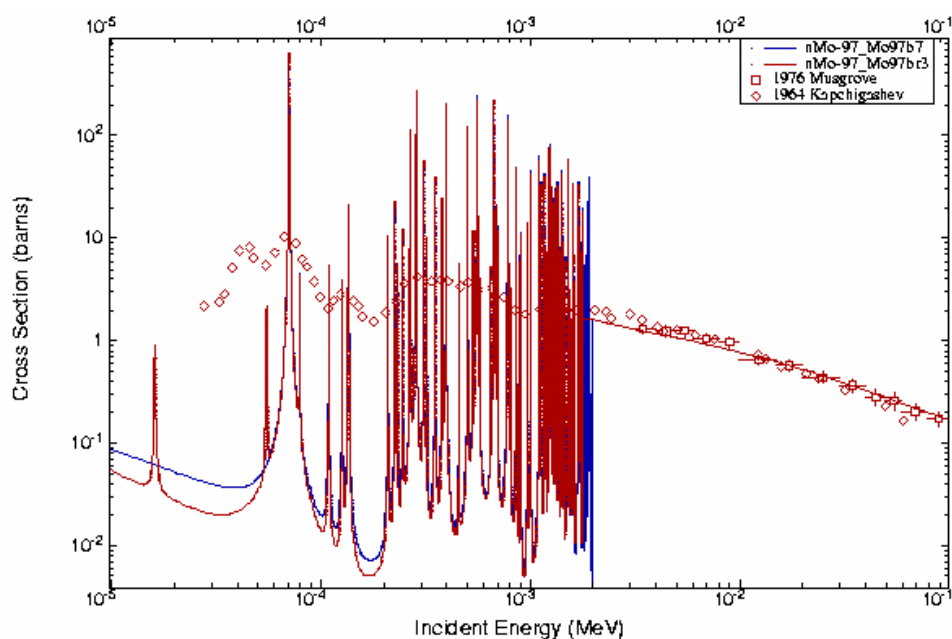


Рис. 5. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

В данном разделе проведено сравнение данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и JEFF-3.1 во вне резонансной области энергий нейтронов. Поскольку в библиотеке JEFF-3.1 для изотопов молибдена приняты данные библиотеки JENDL-3.3, сравнение производилось главным образом с данными библиотеки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII. В библиотеке ENDF/B-VII в большинстве случаев также приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Поэтому сравнение с ENDF/B-VII проводилось только тех реакций, данные для которых отличаются от данных JENDL-3.3.

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин работы /21/. Нейтронные коэффициенты проникаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней, соответствующих мультиплетам $(3/2+\otimes 2+)$ и $(3/2+\otimes 3-)$. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /27/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /22/.

3.1. Полное сечение (MT=1).

В области энергий выше 100 кэВ экспериментальных данных нет. Полные нейтронные сечения в области 0.1-20 МэВ были получены расчетом по оптической модели. В отсутствии экспериментальных данных оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 выглядят равноценными.

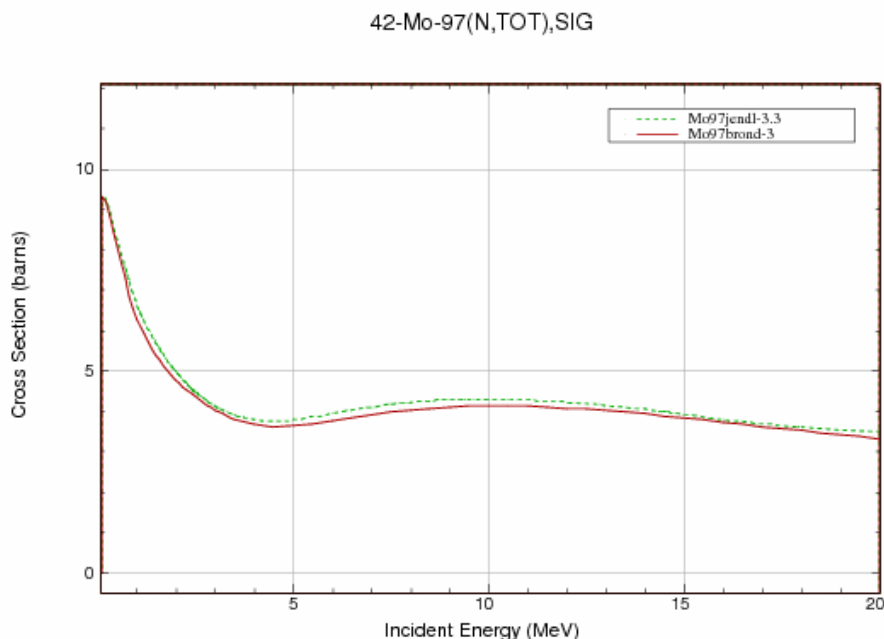


Рис. 6. Полное сечение в области 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. показано сравнение различных оценок упругого рассеяния. В области выше 3 МэВ оценки библиотек БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF-B7 заметно расходятся, но отсутствие экспериментальных данных не позволяет судить уверенно, какая оценка лучшая.

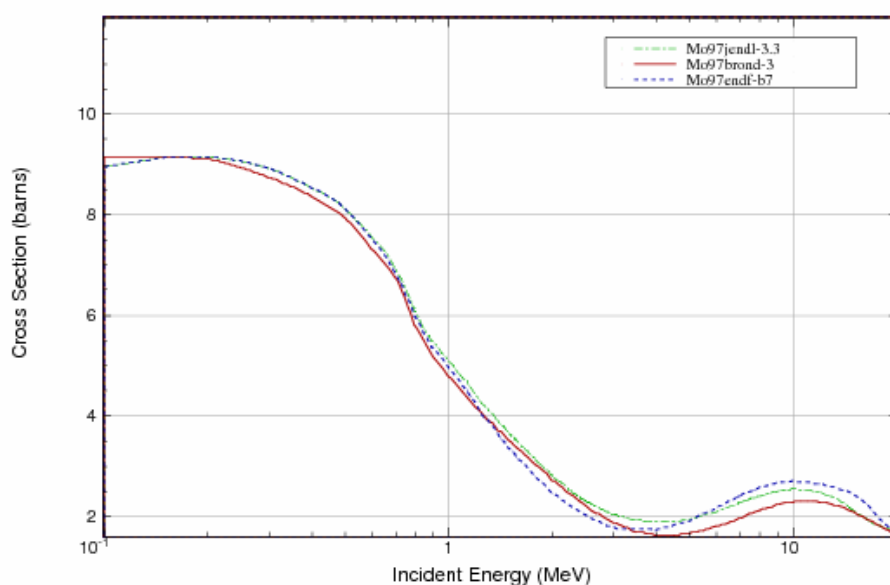


Рис.7. Сечение упругого рассеяния.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-73).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 1.5479 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	0.48090	3/2+	1 → 0	0.48091	100
2	0.65790	7/2+	2 → 0	0.65813	100
3	0.67960	1/2+	3 → 0	0.67959	100
4	0.71920	5/2+	4 → 1 4 → 0	0.23830 0.71946	1 99
5	0.72080	3/2+	5 → 0	0.72092	100
6	0.75300	5/2+	6 → 0		100
7	0.79500	1/2+	7 → 1		100
8	0.84090	3/2+	8 → 0		100
9	0.88810	1/2+	9 → 1 9 → 0	0.40706 0.88820	87 13
10	0.99300	5/2+	10 → 1 10 → 0		50 50
11	1.02450	7/2+	11 → 2 11 → 1 11 → 0	0.36627 0.54380 1.02449	3.7 0.3 96

12	1.09280	3/2+	12 → 1 12 → 0	0.61190 1.09256	
13	1.11680	9/2+	13 → 4 13 → 2 13 → 0	0.39743 0.45857 1.11688	1.2 1.8 97.0
14	1.26500	5/2+	14 → 0	1.2649	100
15	1.26865	7/2+	15 → 0	1.26868	100
16	1.28462	3/2+	16 → 0	1.28464	100
17	1.32212	1/2+	17 → 1	0.80370	100
18	1.40983	11/2+	18 → 2	0.75141	100
19	1.43737	11/2-	19 → 13	0.32031	100
20	1.51566	9/2+	20 → 1	1.51559	100
21	1.51600	3/2+	21 → 0	1.5160	100
22	1.54510	11/2+	22 → 13	0.42815	100
23	1.54770		23 → 1	1.0667	100
24	1.54790				

Экспериментальных данных для интегрального сечения неупругого рассеяния нет. На рис.8 представлены оценки библиотек JENDL-3.3, JENDL-3.3 и БРОНД-3. Функция возбуждения в библиотеке ENDF/B-VII принята из JENDL-3.3. При отсутствии экспериментальных данных трудно отдать предпочтение какой-либо одной из оценок. Однако, учитывая, что при расчетах сечений в БРОНД-3 была применена несферическая оптическая модель и улучшенные параметры, оценка из библиотеки BROND-3 предпочтительней.

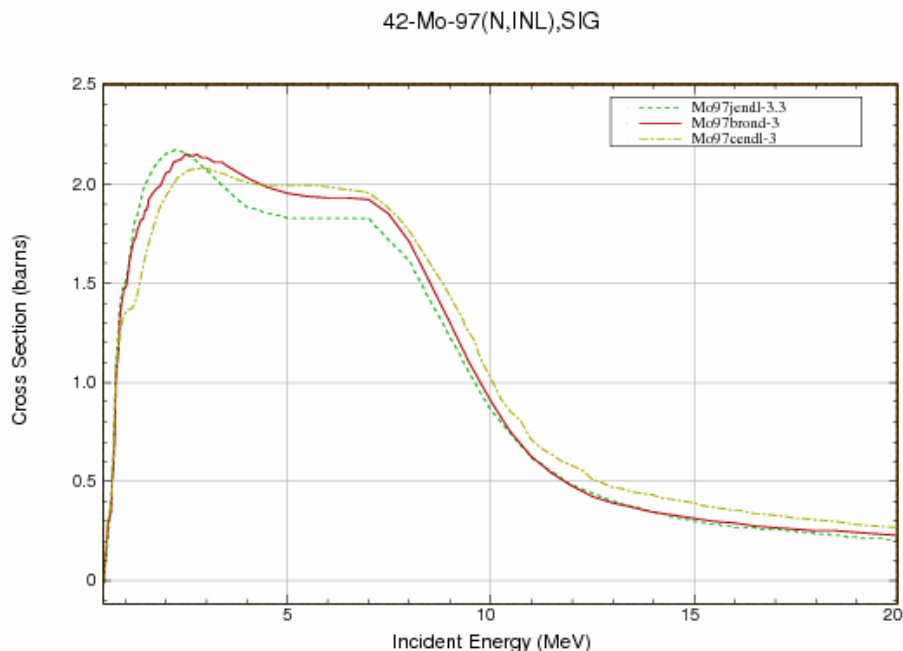


Рис.8. Оценки сечения неупругого рассеяния.

8.2.Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области выше 200 кэВ экспериментальных данных нет и в этой области энергий трудно отдать предпочтение одной из оценок. Однако оценка БРОНД-3 выглядит несколько лучше и предпочтительнее с физической точки зрения.

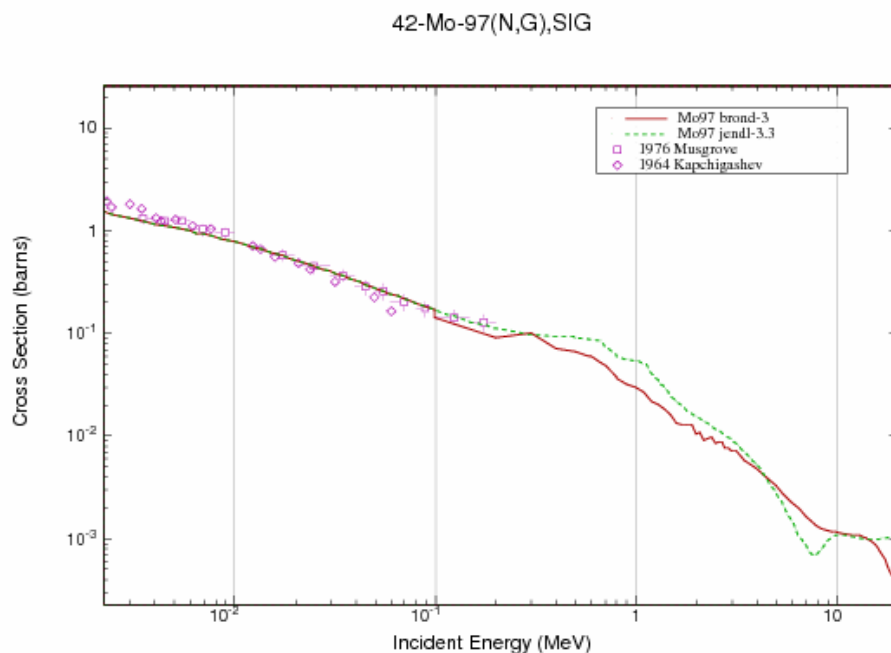


Рис.9. Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 0.02-20 МэВ..

3.5. Сечение реакции (n,2n), (n,3n) (MT=16, 17).

Сечение реакции (n,2n) из библиотеки BROND-3 лучше согласуется с систематикой сечений этой реакции и более предпочтительно по сравнению с сечением JENDL-3.3. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают.

Сечение реакции (n,3n) в библиотеке ENDF/B-VII взято из JENDL-3.3. Следует отдать предпочтение сечению из BROND-3, поскольку оно согласовано с рекомендованным выше сечением для (n,2n).

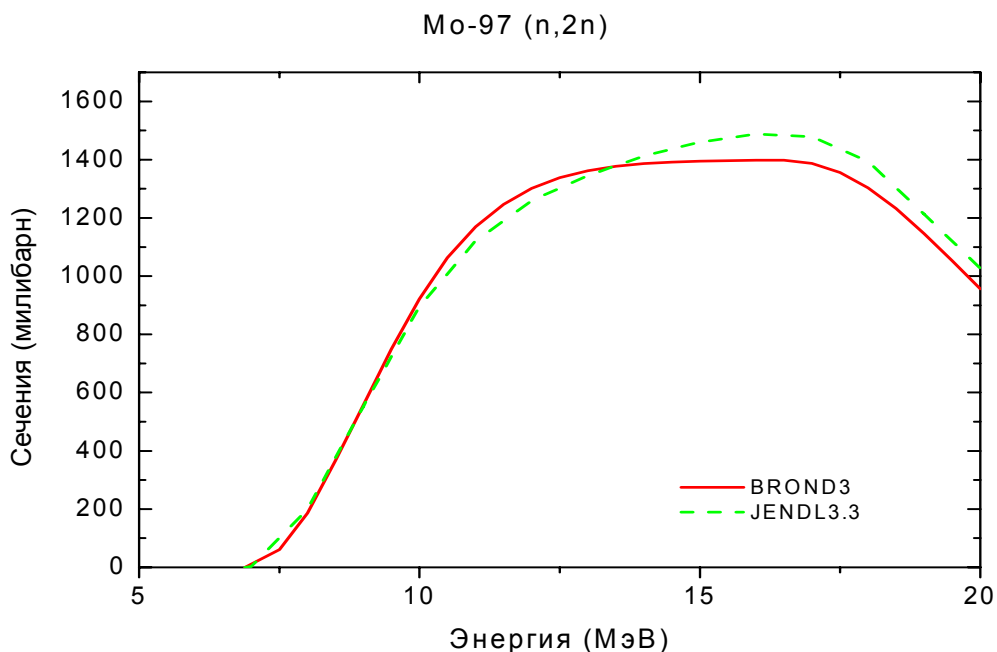


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n).

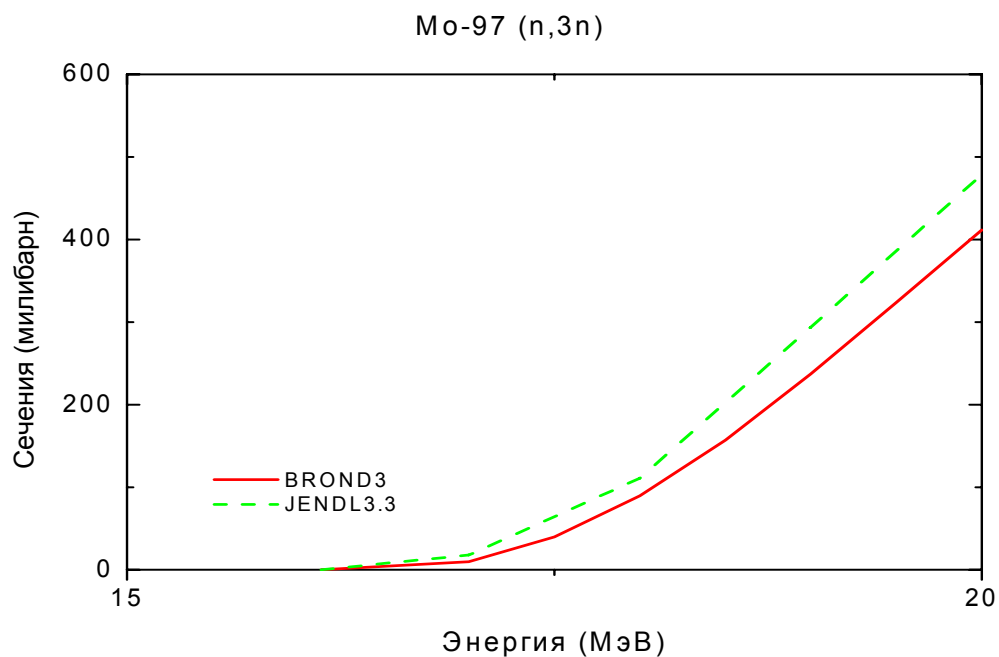


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Сечение реакций (n,p),(n,d), (n,t), (n, α) (MT=103, 104,105,107).

На рис.12 даны сечения реакции (n,p). Сечение реакции (n,p) из BROND-3 лучше согласуется с экспериментальными данными. Сечения в библиотеке ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3.

Сечение реакции (n,d) (рис.13) в библиотеке ENDF/B-VII взято из JENDL-3.3. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 близки, может быть рекомендована любая из них.

Сечения реакции (n,t) в библиотеках BROND-3 и ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3.

На рис. 14 представлены сечения реакции(n,a). Экспериментальных данных нет. Рекомендуется сечение из библиотеки BROND-3, так как оно согласуется с систематикой /15-16/ сечений данной реакции.

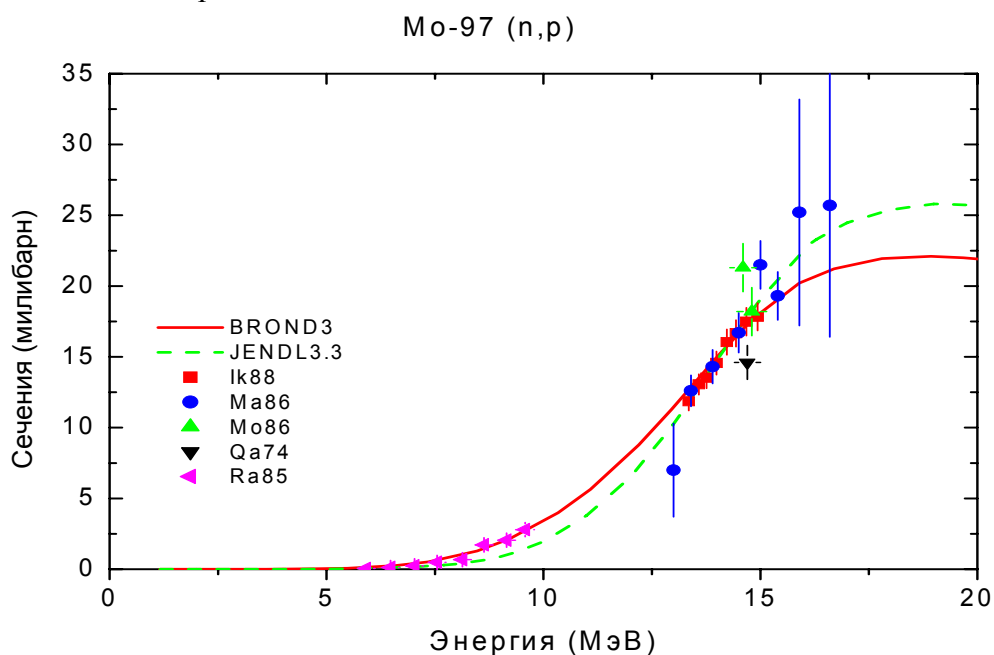


Рис. 12. Сечение реакции (n,p).

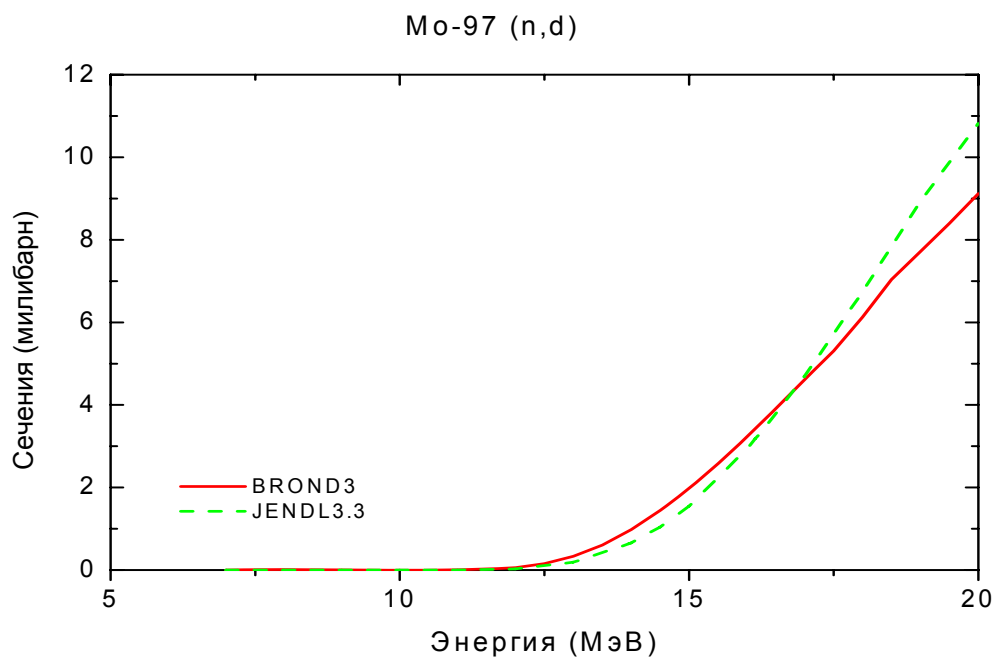


Рис. 13. Сечение реакции (n,d).

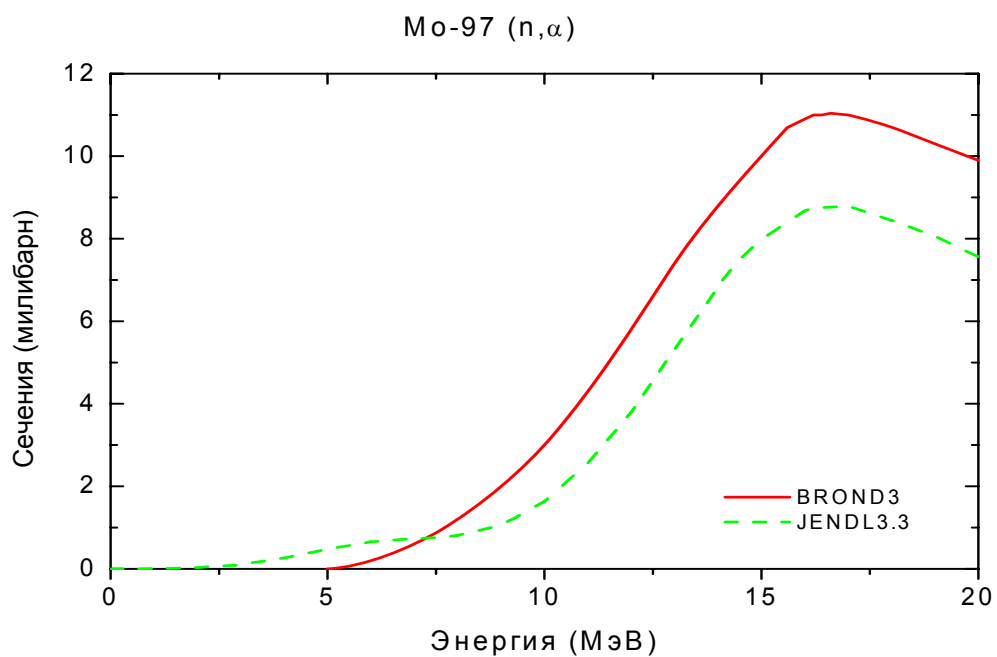


Рис. 14. Сечение реакции (n,α).

3.7. Сечение реакции (n,np), (n,nα).

Экспериментальных данных по реакции (n,p) нет. Сечение из библиотеки BROND-3 (рис.16) лучше согласуется с систематикой и с сечением реакции (n,p) (см. рис. 12). Сечения реакции (n,nα) (рис.16) в обеих библиотеках равноценны.

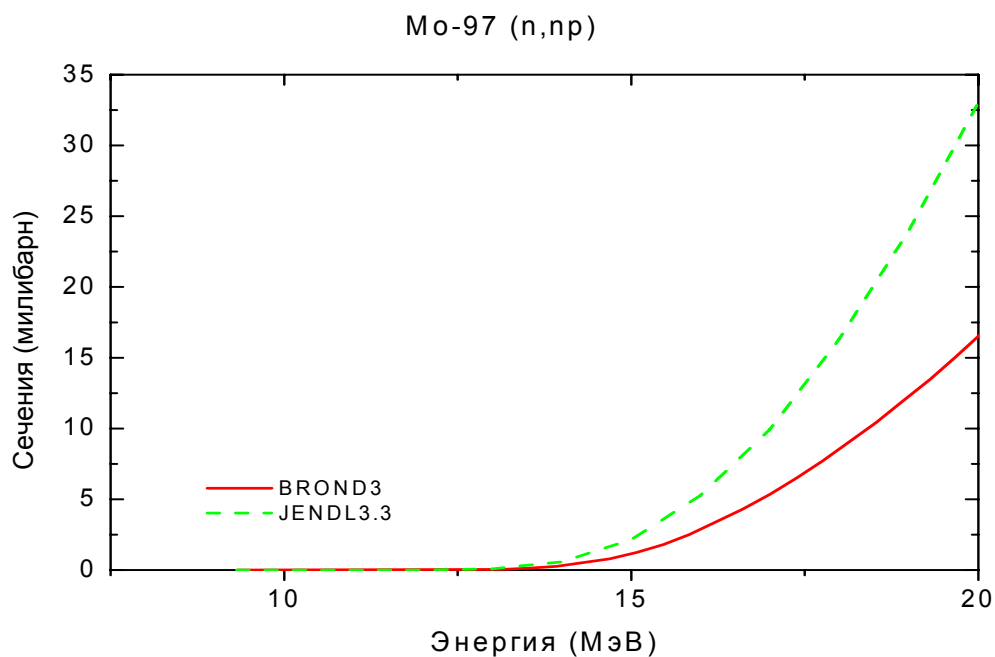


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

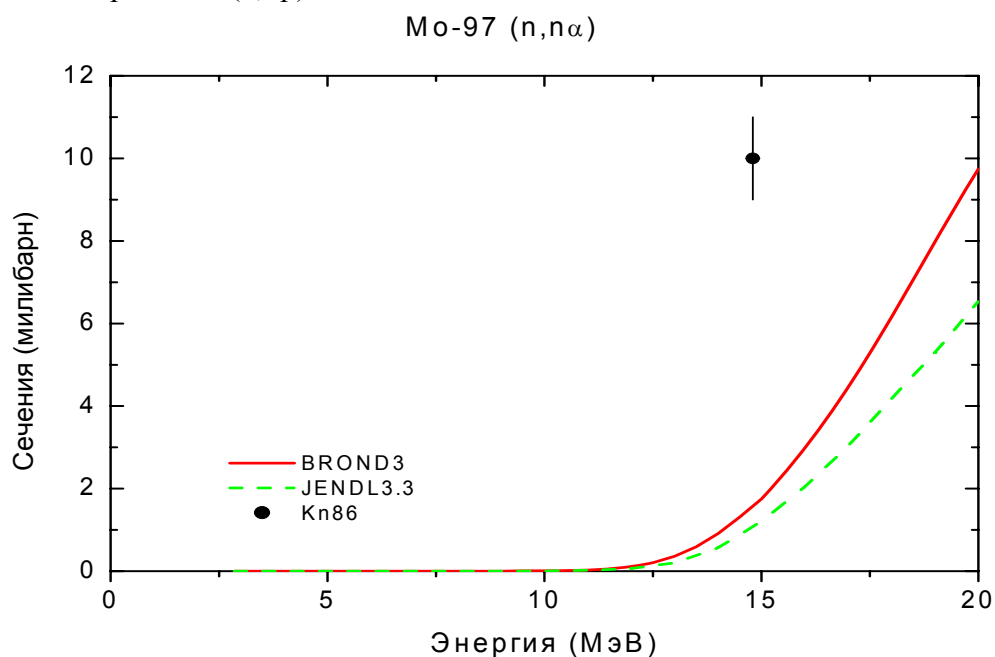


Рис. 16. Сечение реакции (n,nα).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/ /

MT=51-73 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /5/.

6. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

9. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

10.

MT=3,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy /6/.

Литература:

17. Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).
18. Shwe, H. Cote, R.E. Phys. Rev. 179, 1148 (1969).
19. Weigmann, H. et. al.: 1971 Konoxville, 749(1971).
20. Musgrove, A.R.De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).
21. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
22. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
23. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
24. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
25. Koning, A.J., Dalaroche, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
26. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
27. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
28. Dietrich, S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1988) 199.
29. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
30. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
31. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
32. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
18. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
19. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).
20. Mughabghab, S.F. Atlas of Neutron Resonances, to published by Academic Press, 2005 (5-th edition of BNL-325).
21. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
22. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
23. Mughabghab, S.F., Report INDC(NDS)-440, Vienna, 2003.

Перечень использованных экспериментальных работ

Сечение радиационного захвата

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Mu76	A.R.Del.Musgrove	J,NP/A,270,108,1976	30357	3.0+03	2.0+05	15
Ka64	S.P.Kapchigashev	C, 64Dubna, 104, 1964	41233	3.25+01	4.60+04	47

Сечение реакции (n,p)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Ikeda88	Y.Ikeda	R, JAERI-1312(1988)	22089	1.3+07	1.5+07	16
Molla86	N.I.Molla	R, INDC(BAN)-003, 1986	30985	1.4+07	1.5+07	5
Marcinko86	A.Marcinkowski	J, ZP/A, 223, 91, 1986	30809	1.3+07	1.7+07	8
Rahman85	M.Rahman	J, NP/A, U, 435(1985)43	21990	5.9+06	9.6+06	8
Qaim 74	S.Qaim	C, 77Geel, 327(1977)	20513	1.5+07		1

9. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в **БРОНД-3**.

Целесообразно включить файла **БРОНД-3** для **Mo-97** в библиотеку **Росфонд-2005**.

Авторы обоснования файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.7 Молибден-98

Содержание в естественной смеси: 24.13 %.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=98$

1.3. $A_w=97.06430$

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогами ниже 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	Е _{порог.} , МэВ	Ядро-продукт ^{*)}
04	n,n'	-0.7348	0.7424	Mo-98
16	n,2n	-8.6424	8.7414	Mo-97
17	n,3n	-15.4636	15.1824	Mo-96
22	n,n α	-3.2727	3.3065	Zr-94
28	n,np	-9.7951	9.8960	Nb-97
102	n, γ	5.9250		Mo-98
103	n,p	-3.8029	3.8421	Nb-98
104	n,d	-7.4873	7.5645	Nb-97
105	n,t	-9.3819	9.4785	Nb-96
107	n, α	3.2022		Zr-95

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

2.5 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время оценка JENDL-3.3 для разрешенных и неразрешенных резонансов включена в оценки JEFF-3.0(=JEFF-3.1), CENDL-3 и последнюю версию ENDF/B-VII. Так как нет экспериментальных данных, указывающих на недостатки этой оценки, то она включена также в оценку БРОНД-3.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи /1/ на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию /2/ и радиационному захвату нейтронов /2, 3, 4/. Эти параметры лишь незначительно отличаются от параметров, рекомендованных на Мугабгхабом и др. /5/. Были приняты средние радиационные ширины 0.085 эВ для s-резонансов и 0.12 эВ для p-резонансов. Был добавлен отрицательный резонанс при энергии -980 эВ, чтобы воспроизвести сечение захвата при тепловой энергии /5/. Верхняя граница резонансной области принята равной 32 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 6.9$ фм /5/ и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

оценка	JENDL-3.3	Эксперимент [23]
полное	5.772 б	
упругое	5.642 б	
захвата	0.130 б	0.137±0.005
резонансный интеграл		
захвата выше 0.5 эВ:	6.56 б	6.9±0.3 б

В пределах погрешности оценка согласуется с уточненным экспериментальным сечением захвата тепловых нейтронов [23], а также измеренным резонансным интегралом захвата нейтронов, но нет экспериментальных данных по другим типам сечений.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценку JENDL-3.3, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_{\text{OBS}} = (1.10 \pm .11)$ кэВ, и для p-резонансов – $D_1 = (.30 \pm .02)$ кэВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.45 \pm 0.07) 10^{-4}$ и $S_1 = (5.2 \pm 1.5) 10^{-4}$.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов часто привлекают анализ соответствия параметров резонансов распределению нейтронных ширин Портер-Томаса. Результаты такого анализа представлены на рис. 2. Данный анализ показывает, что в наблюдаемом наборе s-резонансов, по-видимому, пропущено около 3-4 резонанса и в наборе p-резонансов содержится 17-20 слабых резонансов, которые следовало бы отнести к d-волне. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но их учет существенен для оценки среднего расстояния между резонансами.

2.3. Область неразрешенных резонансов.

Для области неразрешенных резонансов все последние оценки, CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII, заимствуют оценку JENDL-3.3. Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

Нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ.

Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.369\text{E-}4$, $S_1 = 5.479\text{E-}4$, $S_2 = 0.364\text{E-}4$, $S_g = 1.74\text{E-}4$, $G_g = 0.133$ эВ, $R = 6.631$ фм.

На рис. 3 и 4 оценки JENDL-3.3 для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с экстраполяцией энергетической зависимостью оценки JENDL-3.3. В диапазоне энергий от 10 эВ до 30 кэВ данные по сечениям радиационного захвата нейтронов измерены в работе [20], а при энергиях выше 4 эВ также в работах [4], и при соответствующем усреднении резонансов оценка воспроизводит имеющиеся экспериментальные данные.

На основе проведенного анализа было принято решение, что, несмотря на отмеченные выше погрешности анализа резонансов, для области разрешенных и неразрешенных резонансов целесообразно включить в БРОНД-3 оценку JENDL-3.3. При отсутствии новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений в области резонансных нейтронов.

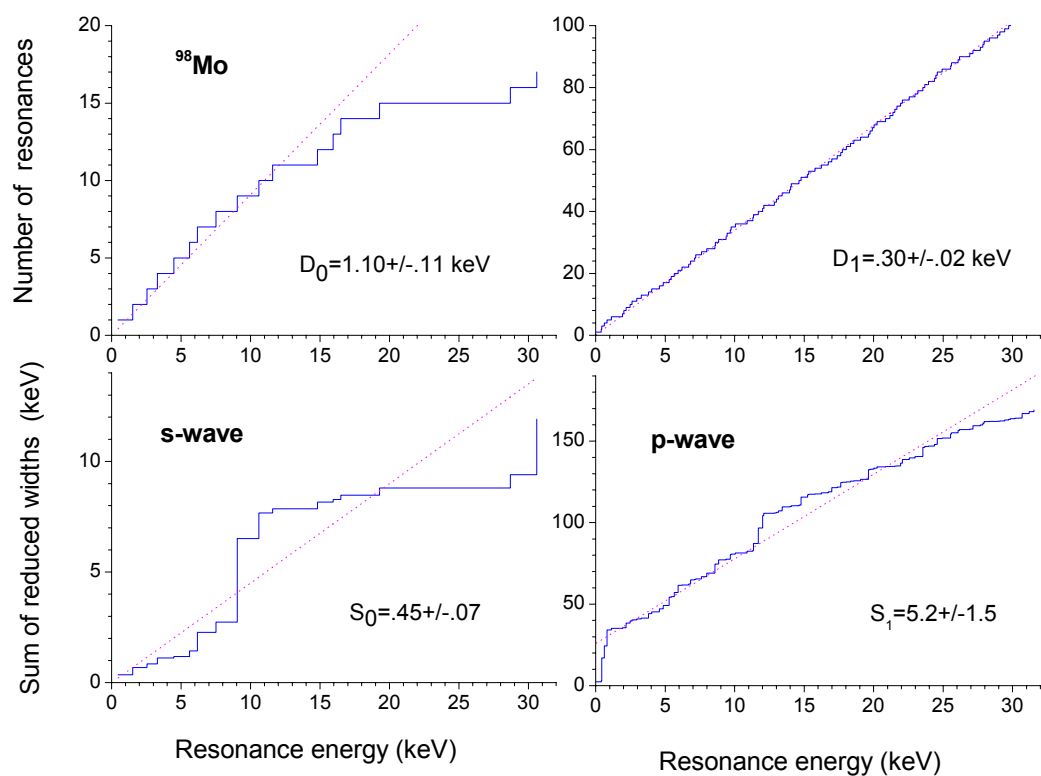


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин s- и p-резонансов

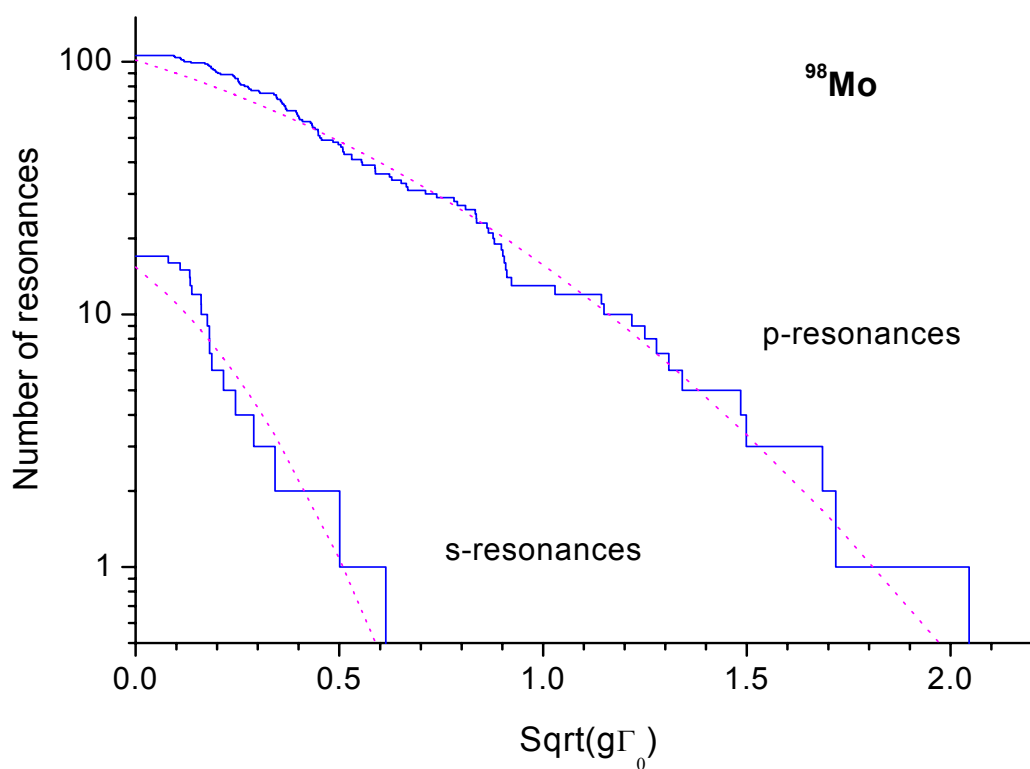


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов

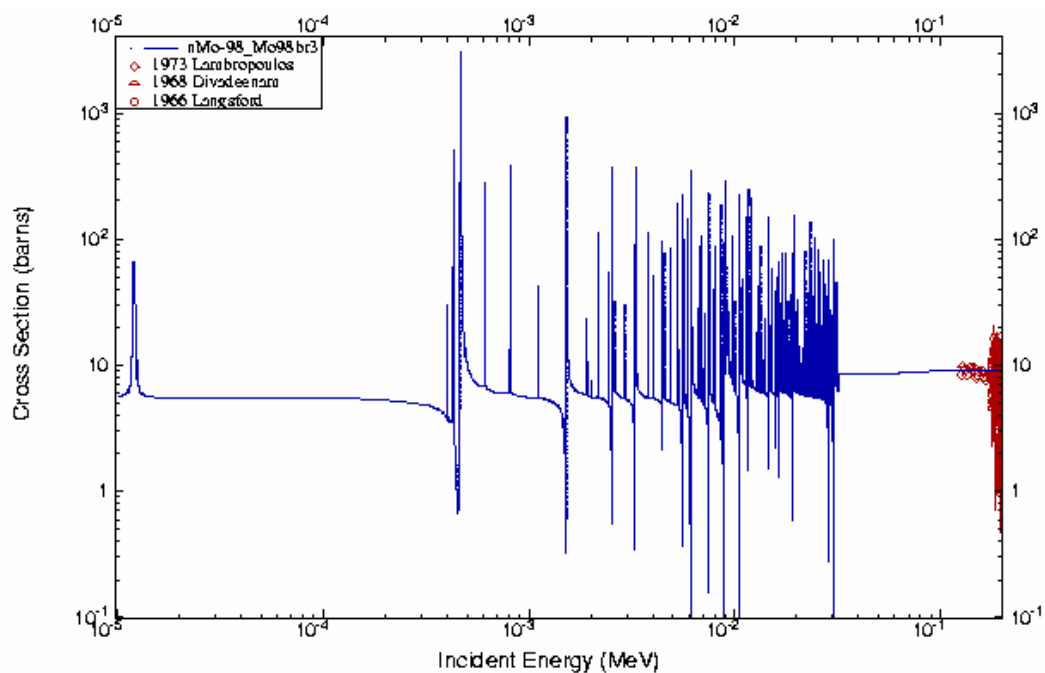


Рис. 3. Оценка полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными вне резонансной области

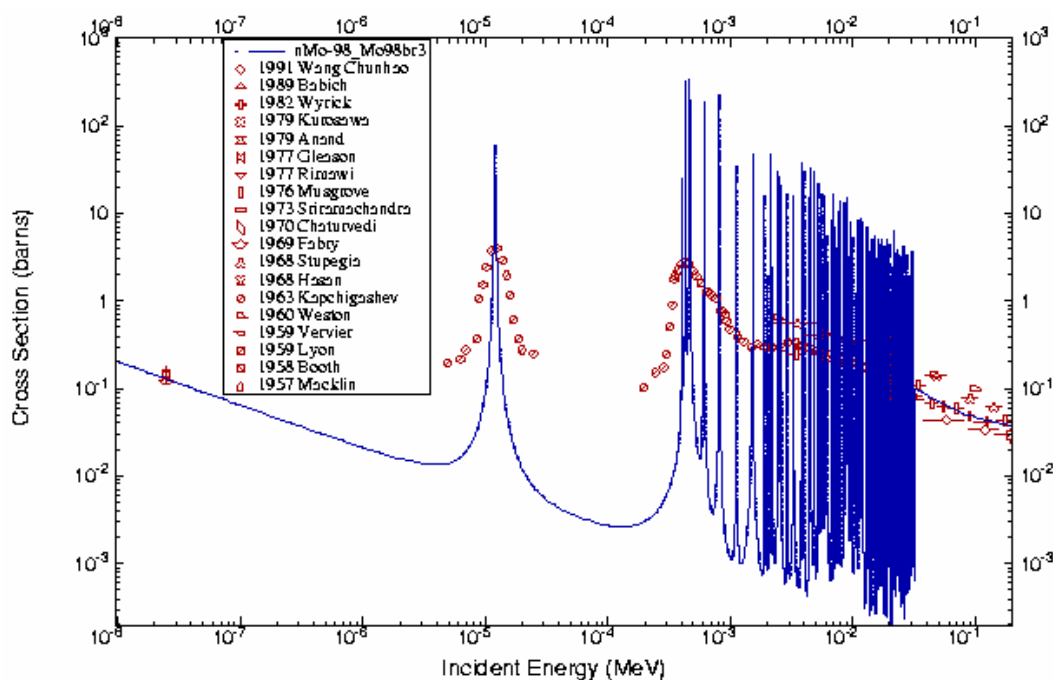


Рис. 4. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными.

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

Предварительно авторами оценки БРОНД-3 был исследован и оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния. Поскольку сечение реакции $(n,2n)$ достаточно хорошо известно из экспериментальных данных и основанной на них эмпирической

систематики, теоретические расчеты сечений неупругого рассеяния проводились таким образом, чтобы получить согласованное описание функции возбуждения реакции ($n, 2n$) и оцененного вклада прямых процессов в области 20 МэВ. Полученные результаты по функциям возбуждения других пороговых реакций корректировались на основе предсказаний эмпирических систематик.

Оцененные данные функции возбуждения неупругого рассеяния для одного изотопа сравнивались с данными для других изотопов данного элемента и изотопов соседних ядер, чтобы получить согласованное описание сечений для всех изотопов молибдена с учетом эмпирической тенденции изменения максимального сечения реакции неупругого рассеяния в зависимости от номера и атомного веса изотопа.

В данном разделе проведено сравнение данных данными библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Поскольку в библиотеке JEFF-3.1 для изотопов молибдена приняты данные библиотеки JENDL-3.3, сравнение производилось главным образом с данными библиотеки JENDL-3.3. В библиотеке ENDF/B-VII в большинстве случаев также приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Поэтому сравнение с ENDF/B-VII проводилось только тех реакций, данные для которых отличаются от данных JENDL-3.3.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин на основе подхода работы /26/. Нейтронные коэффициенты проницаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней 2^+ и 3^- . Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались $E1$, $M2$ и $E2$ – гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /27/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширинеи плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /27/.

3.1. Полные сечения ($MT=1$)

Полные нейтронные сечения в области энергий нейтронов выше 100 кэВ были получены расчетом по оптической модели с учетом главным образом экспериментальных данных работы /14/. Существенных различий между данными указанных библиотек в этой области нет. Может быть рекомендована любая из них.

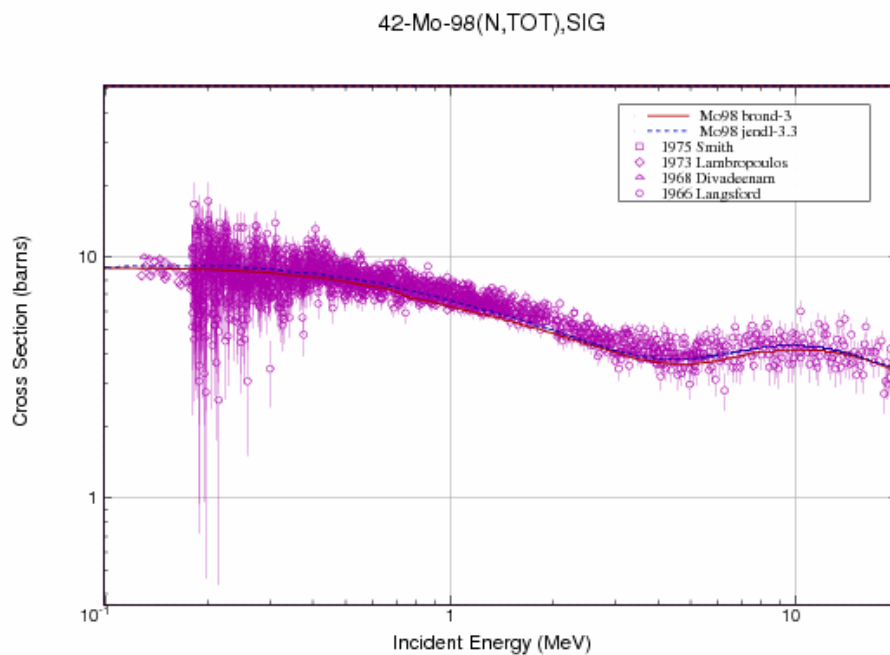


Рис.5. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20МэВ.

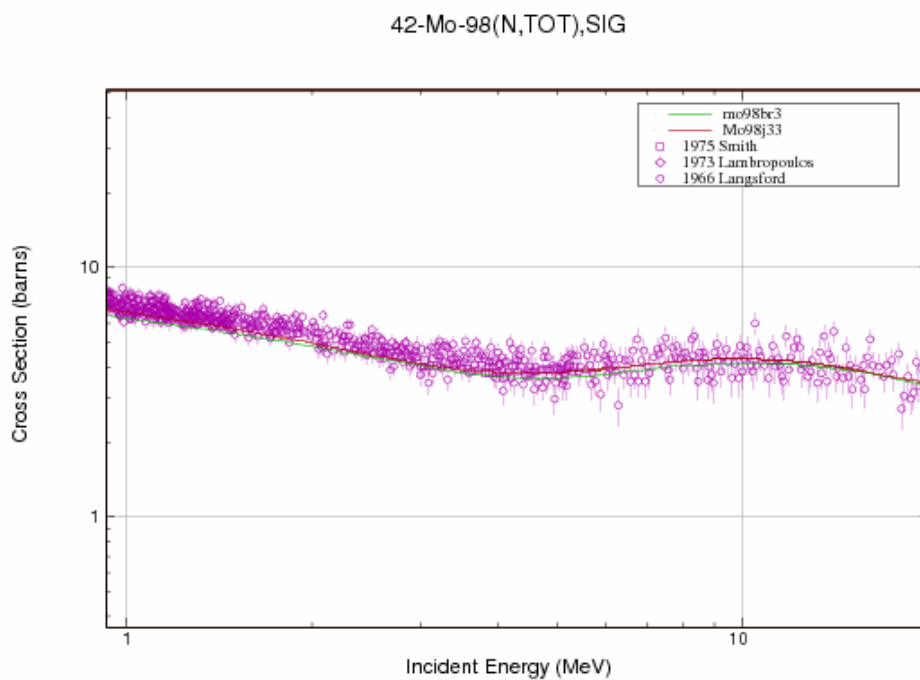


Рис.6. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. показано сравнение различных оценок упругого рассеяния. В области выше 3 МэВ оценки библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 заметно расходятся, но отсутствие экспериментальных данных не позволяет судить уверенно, какая оценка лучшая.

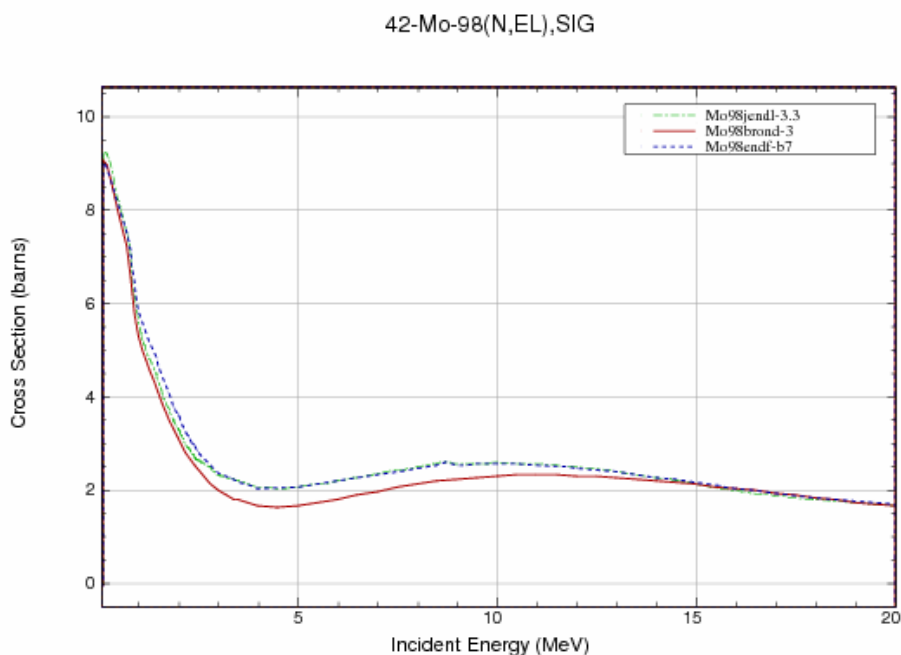


Рис.7. Сечение упругого рассеяния в области 0.1-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-64).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.3440 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром..

Схема уровней:

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	0.73480	0+	1 → 0	0.73475	100
2	0.78740	2+	2 → 0	0.78738	100
3	1.43230	2+	3 → 3 3 → 1 3 → 0	0.64483 0.69743 1.43222	51.5 2.7 45.8
4	1.51000	4+	4 → 0	0.722646	100
5	1.75850	2+			
6	1.88090	4+			
7	1.96500	0+			
8	2.01750	3-	8 → 5 8 → 4 8 → 2 8 → 0	0.25899 0.5078 1.23016 2.01745	13.6 65.3 2.7 18.4
9	2.03760	0+	9 → 0	1.25014	100
10	2.10480		10 → 4 10 → 3 10 → 2	0.59465 0.67252 1.31738 1.3700	8.9 34.4 44.6 12.1

			10 → 1		
11	2.20630		11 → 5 11 → 3 11 → 2	0.4482 0.77430 1.41935	42.0 21.7 36.2
12	2.22380		12 → 4 12 → 3 12 → 2	0.713825 0.791645 1.43644	46.7 39.7 13.6
13	2.33340		13 → 5 13 → 4 13 → 3 13 → 2	0.57506 0.82338 0.90094 1.54603	3.7 27.8 10.4 58.1
14	2.34360		14 → 4	0.83356	100
15	2.34400				

Экспериментальные данные по интегральному сечению неупругого рассеяния нейтронов отсутствуют. Функция возбуждения в библиотеке ENDF/B-VII принята из JENDL-3.3. Данные BROND-3 в области энергий нейтронов ниже 2 МэВ согласуются с данными указанных библиотек, но при более высоких энергиях они лежат выше. Однако данные библиотеки CENDL-3 (Китай) лучше согласуются с данными оценки БРОНД-3. Учитывая, что при расчетах сечений была применена несферическая оптическая модель и улучшенные параметры, оценка из библиотеки BROND-3 кажется предпочтительной.

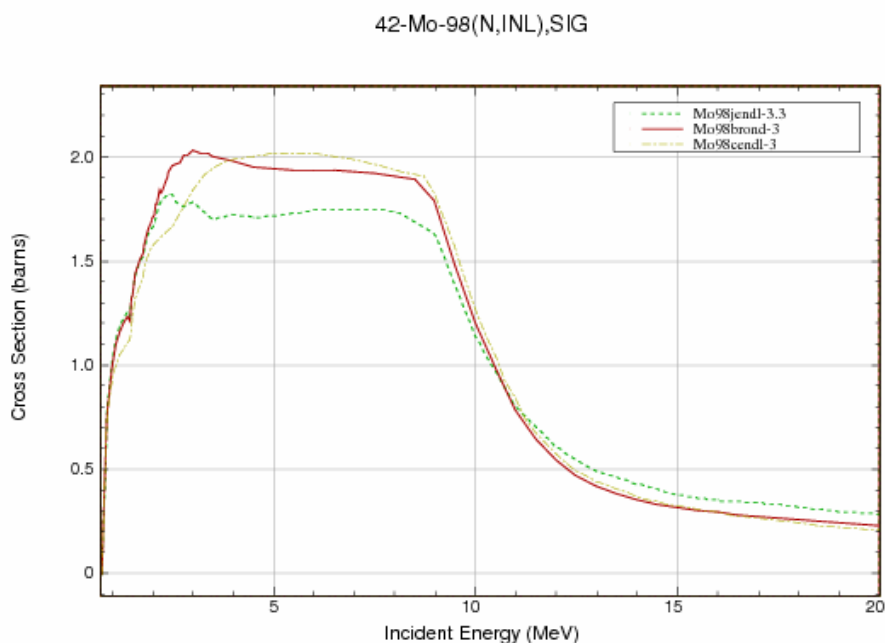


Рис. 8. Оценки сечений неупругого рассеяния.

3.4. Сечение реакции радиационного захвата (MT=102).

Сечение радиационного захвата библиотек BROND-3 заметно отличается от данных библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, однако из-за отсутствия экспериментальных данных трудно отдать предпочтение одной из них в области энергий до 4 МэВ, выше зависимость из BROND-3 предпочтительнее. Оценка ENDF/B-VII принята из JENDL-3.3.

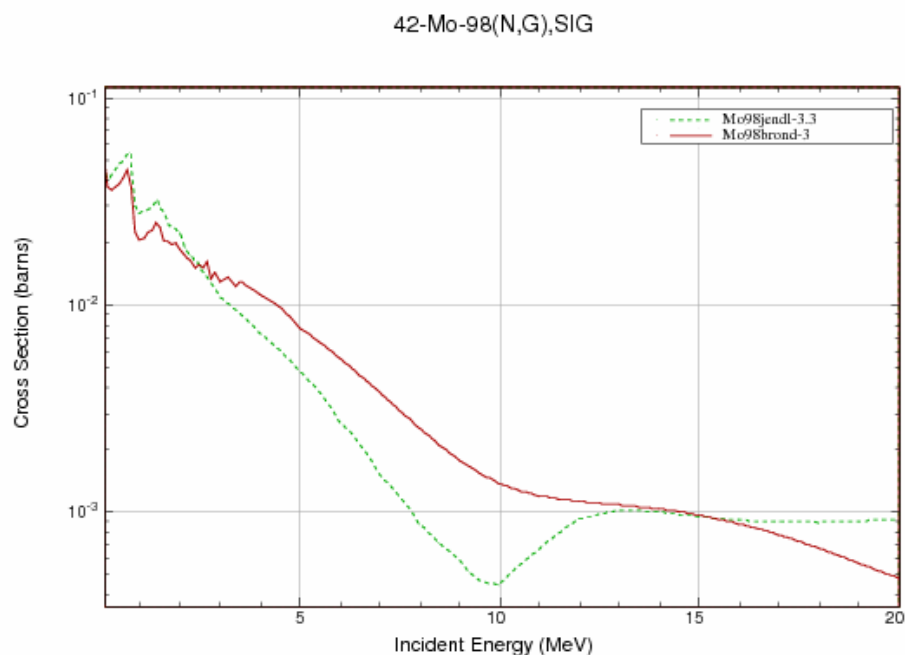


Рис. 9. Сечение реакции радиационного захвата.

3.5. Сечение реакции (n,2n), (n,3n) (MT=16, 18).

Экспериментальные данные по сечениям реакции $^{98}\text{Mo}(n,2n)$ отсутствуют (рис.10). Расхождения данных библиотек BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII принципиального характера не носят. Выбор той или иной зависимости определяется выбором зависимости полного неупругого рассеяния. В данном случае предпочтительней оценка BROND-3.

. Сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n,3n)$ показано на рис. 11. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 равноценны.

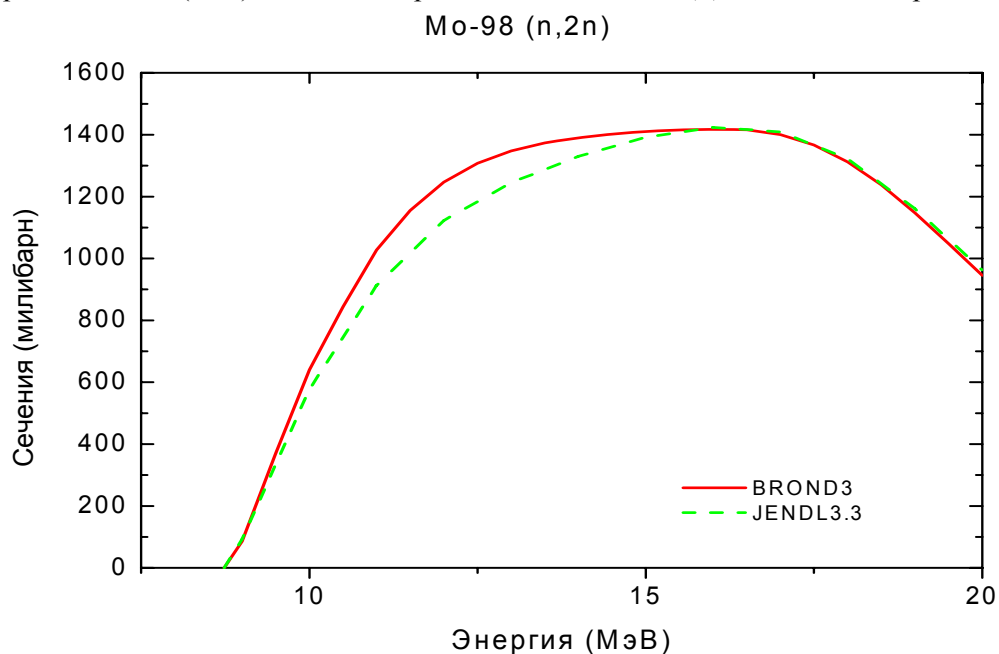


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n).

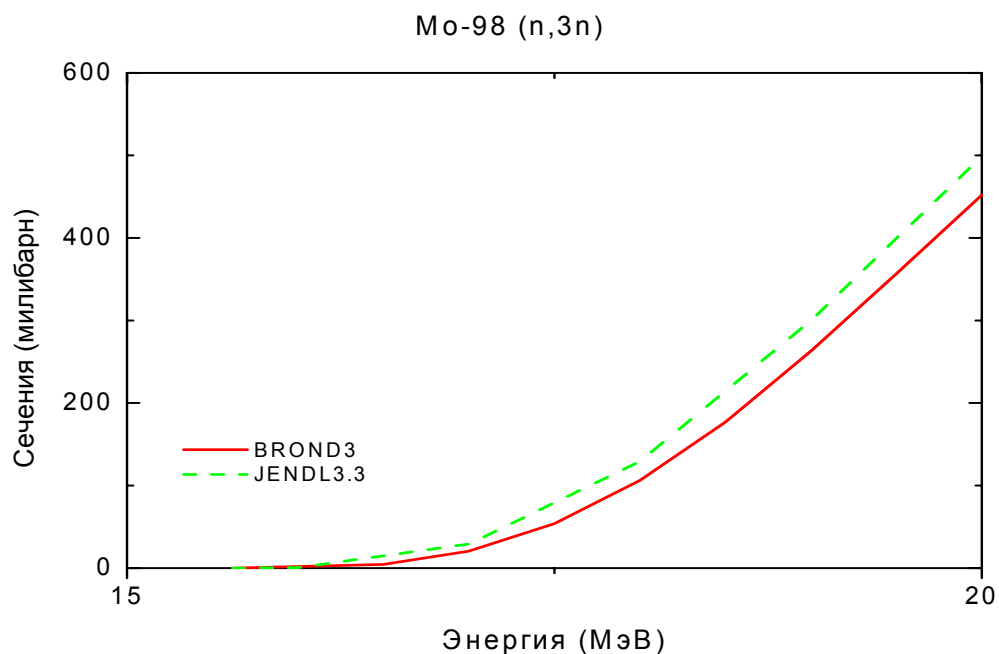


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104, 105 и 107):

Сечение реакции (n,p). Экспериментальных данных по реакции $^{98}\text{Mo}(n,p)$ нет. Оцененное сечение реакции (n,p) библиотеки BROND-3 (рис.12) лучше согласуется с систематикой сечений указанной реакции, однако наблюдаемое расхождение не носит принципиально характера из-за малости сечения. На рис.14 показано сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n,\alpha)$. Рекомендуется функция возбуждения из библиотеки BROND-3, поскольку она точнее описывает экспериментальные данные в области 14 МэВ.

Сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n,d)$ (рис. 13) рекомендуется сечение из библиотеки BROND-3, поскольку при расчете сечения по теории ядерных реакций более корректно учтен вклад прямых процессов, которые являются преобладающими для этой реакции.

Сечение реакции (n,t) в библиотеках в БРОНД-3 и ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3.

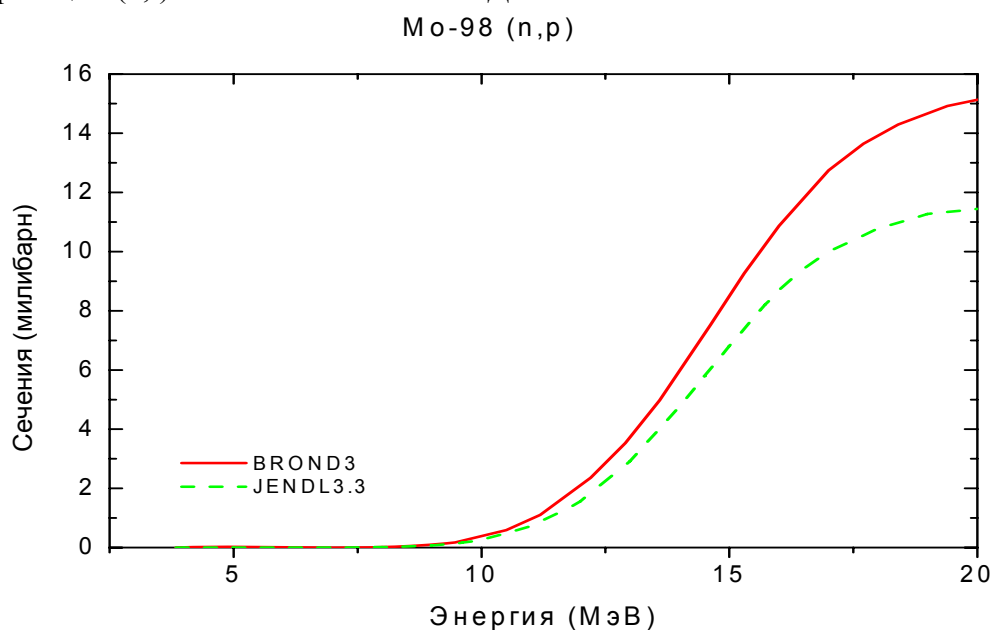


Рис. 12. Сечение реакции (n,p).

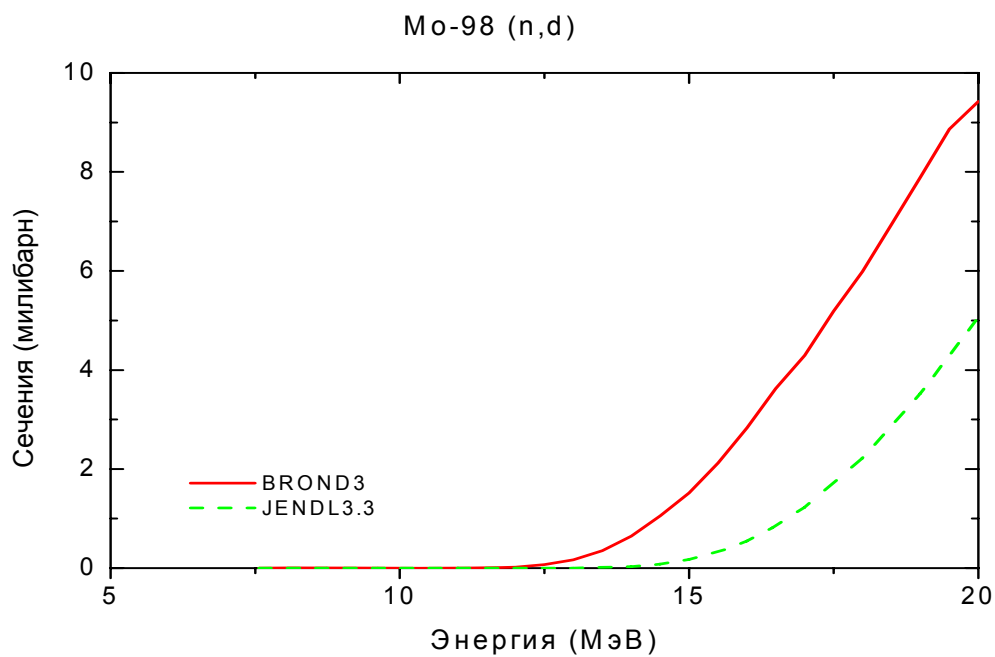


Рис. 13. Сечение реакции (n,d).

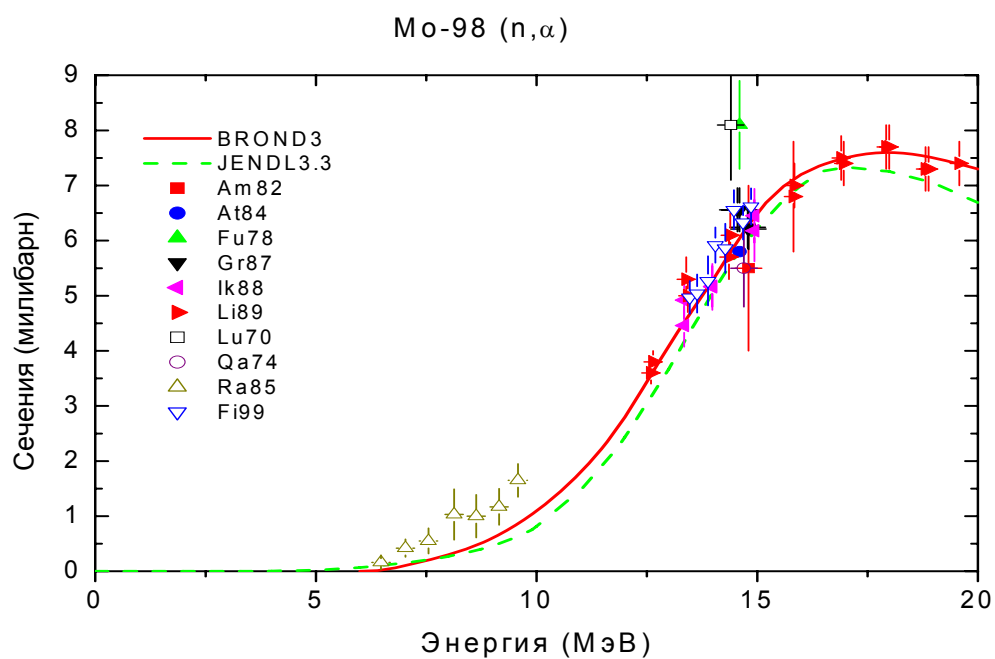


Рис.14. Сечение реакции (n,α).

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

Сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n,np)$ в библиотеках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Данные BROND-3 лежат существенно ниже и лучше согласуются с систематиками сечений реакций (n,p) и (n,np). (рис.15).

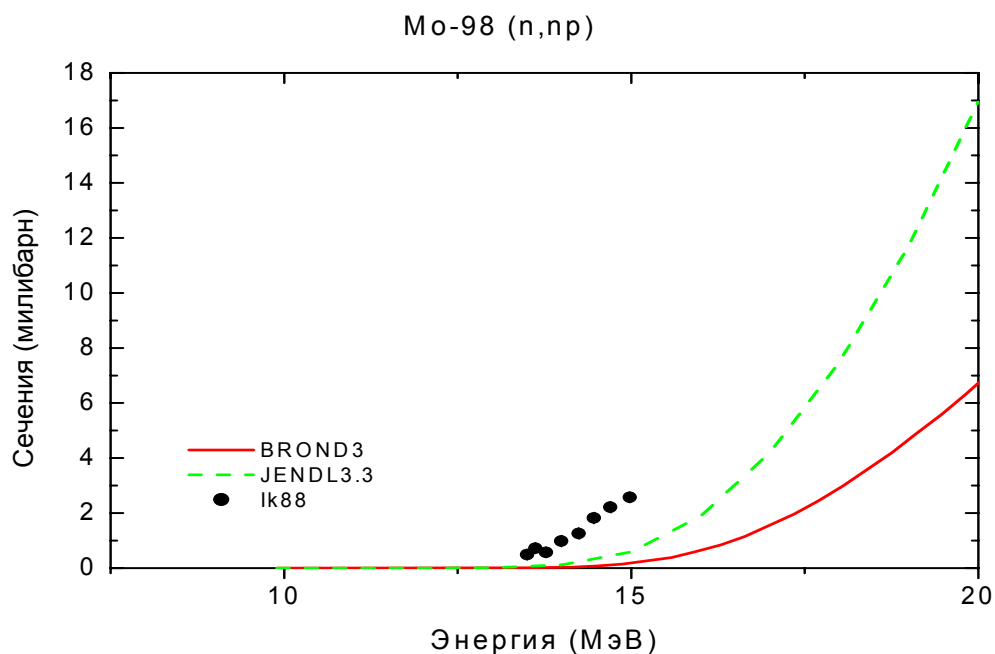


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

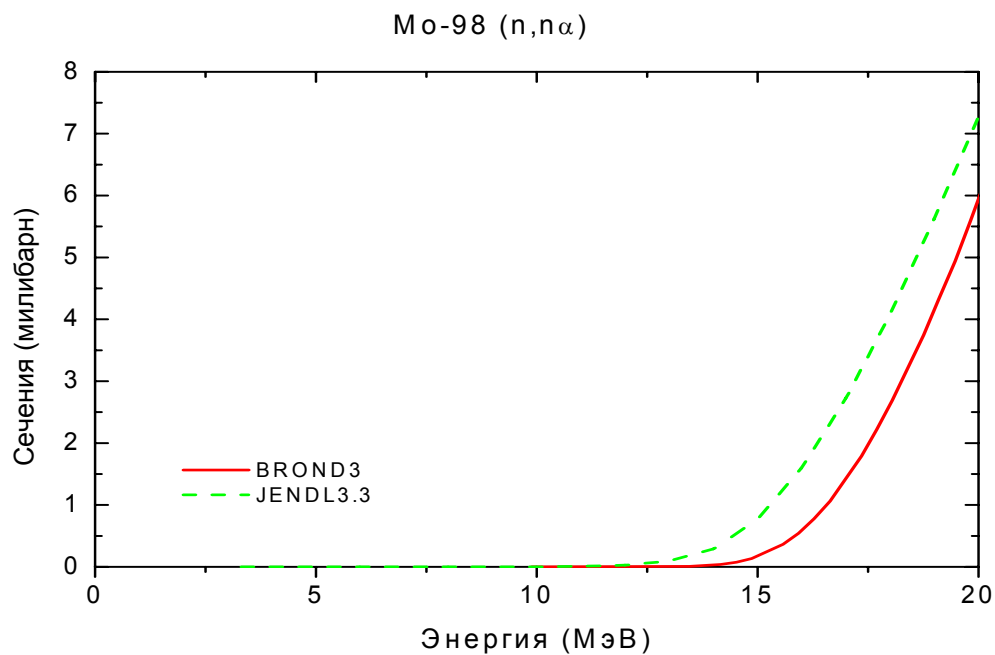


Рис. 16. Сечение реакции (n,nα).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/ /. На Рис.17-19 показаны угловые распределения из библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 в сравнении с экспериментальными данными.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

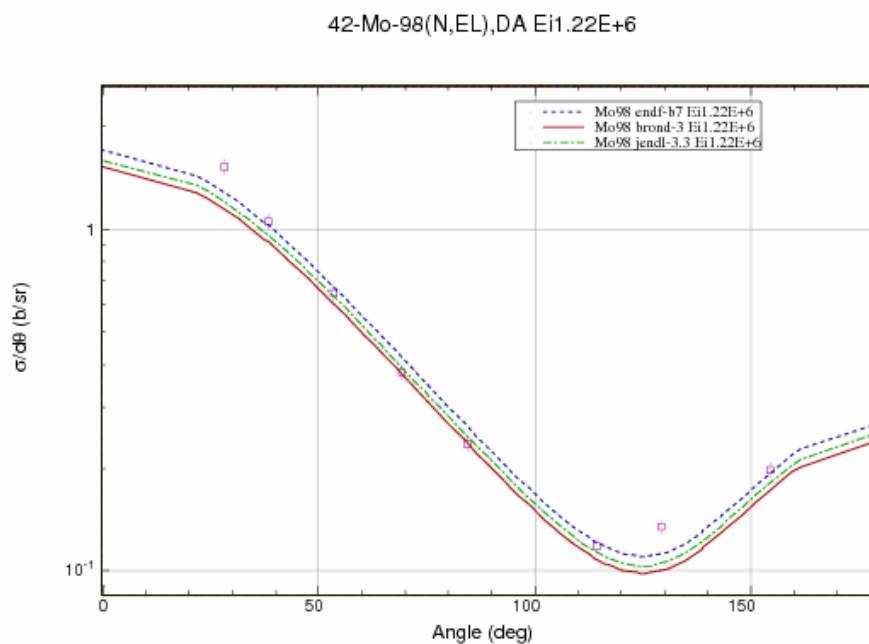


Рис.17. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов

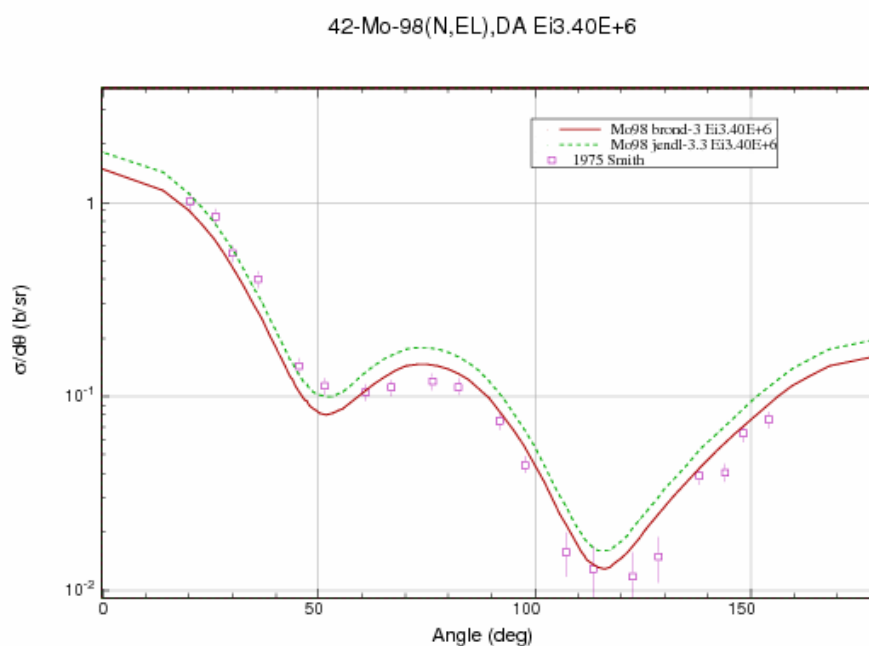


Рис.18. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов

MT=51-64 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

MF=6. MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /5/

6. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

8. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=3,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy /6/.

Литература:

1. Kikuchi, Y. et. al. Report JAERI-M 86-030 (1986).
2. CHRIEN, R.E. ET AL. PHYS. REV., C13, 578 (1976) .
3. Weigmann, H. et. al. 1971 Konoxville, 749(1971).
11. Musgrove, A.R.De L. et. al. Nucl. Phys., A270, 108(1976).
12. Mughabghab, S.F. et. al. "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
13. Igarasi, S. and Fukahori, T. Report JAERI-1321(1991).
14. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B. in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
15. Raynal, J. Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
16. Koning, A.J., Dalaroche, J.P. Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
17. Lohr, J.M. and Haeberli, W. Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
18. Avrigeanu, V., Hodgson, P. Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
19. Dietrich. S.S., Berman, B.L. Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1088) 199.
20. Firestone, R.B. Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
21. Smith, A.B. Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
15. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
16. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. Kumabe, I. et al. Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
18. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F. Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
19. Morgan, G. and Newman, N. ORNL-TM-5097 (1975).
20. Kapchigashev, S.P. 64Dubna, 104, 1964.
21. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
22. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
23. Mughabghab, S.F., Report INDC(NDS)-440, Vienna, 2003.

Перечень использованных экспериментальных работ

Полное сечение

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Pa80	M.V.Pasechnik	C,80Kiev,1,304,1980	40617	4.58+05	3.12+06	54
Sm75	A.B.Smith	J,NP/A,244,213,1975	10524	1.64+06	5.51+06	88
La73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	1.01+05	1.50+06	594
Di68	M.Divadeenam	J,DA/B,28,3834,1968	10523	1.30+05	6.40+05	103
La66	A.Langsdorf	C, 66Paris, 1, 165, 1966	21088	1.00+01	1.00+07	1934

Сечение упругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
McDaniel77	F.D.McDaniel	P,A-KTY-74/77,3,1977	10770	2.52+06		1
McDaniel74	F.D.McDaniel	J,PR/C,10,1087,1974	10391	1.50+06		1
La73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	3.0+05	1.5+06	130
Ka66	S.Kapchigashev	J,YF, 4, (4), 686, 1966	40778		5.00+04	1

Сечение реакции (n,a)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Filat99	A.A.Filatenkov	R, RI-252, 1999	41240	1.3+06	1.5+06	8
Liskien90	H.Liskien	J, ARI, 41(1990)83	22125	1.3+07	2.0+07	15
Ikeda88	Y.Ikeda	R,JAERI-1312(1988)	22089	1.3+07	1.5+07	7
Gr87	L.Greenwood	J, PR/C, 35, 76, 1987	12976	1.46+07	1.48+07	4
Rahman85	M.Rahman	J,NP/A,435(1985)43	21990	5.9+06	9.6+06	8
Atsumi84	H.Atsumi	R,NEANDC(J)106	21935	1.5+07		1
Am82	S.Anemiya	J, NST, 19, (10), 781, 1982	21840	1.48+07		1
Fu78	K.Fukuda	P, NEANDC(J)-56/U, 44, 1984	20841	1.46+07		1
Qaim 74	S.Qaim	C,77Geel,327(1977)	20513	1.5+07		1
Lu70	W.D.Lu	J, PR/C, 1. 358, 1970	10145	1.44+07		1

Сечение реакции (n,np).

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Ik88	Y.Ikeda	R, JAERI-1312, 1988	22089	1.33+07	1.49+07	6

9. Заключение

7.1. Вывод. На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3. Целесообразно включить файла БРОНД-3 для Мо-98 в библиотеку Росфонд-2005.

7.2. Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.8 Молибден-99

Радиоактивен. ($T_{1/2}=66\text{ч}$). Испытывает бета-распад в технеций-99, который, в свою очередь, очень медленно распадается в рутений-99 ($T_{1/2}=2.1\cdot 10^5\text{лет}$).

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка В.Манохина из ФОНД-2.2, как единственная полная оценка, принятая не только в ФОНД-2.2, но и группой специалистов, занимавшихся данными для продуктов деления и включенная в JENDL-2.

В то же время целесообразно провести сравнительный анализ содержащихся в ней данных с данными EAF2003..

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

42.9. Молибден-100

Содержание в естественной смеси: 9.63%.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=100$

1.3. $A_w=99.04920$

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогами ниже 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$, МэВ	Ядро-продукт ^{*)}
04	n, n'	-0.5356	0.5410	Mo-100
16	$n, 2n$	-8.3008	8.3846	Mo-99
17	$n, 3n$	-14.2150	14.3585	Mo-98
22	$n, n\alpha$	-3.1840	3.2162	Zr-96
28	n, np	-10.6143	10.7215	Nb-99
102	n, γ	5.3990		Mo-100
103	n, p	-5.4465	5.5015	Nb-100
104	n, d	-8.8265	8.9156	Nb-99
105	n, t	-9.5335	9.6297	Nb-98
107	n, α	2.4194		Zr-97

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

2.6 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время оценка JENDL-3.3 для разрешенных и неразрешенных резонансов включена в оценки JEFF-3.0(=JEFF-3.1), CENDL-3 и последнюю версию ENDF/B-VII. Так как нет экспериментальных данных, указывающих на недостатки этой оценки, то она включена также в оценку БРОНД-3.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи /1/ на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию /2/ и радиационному захвату нейтронов /3, 4/. Эти параметры лишь незначительно отличаются от параметров,

рекомендованных на Мугабгхабом и др. /5/. Были приняты средние радиационные ширины 0.065 эВ для s-резонансов и 0.08 для p-резонансов. Верхняя граница резонансной области принята равной 26 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 6.30$ фм /5/ и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) равны:

полное = 5.499 б, упругое = 5.300 б, захвата = 0.199 б,
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: = 3.86 б.

2.3. Область неразрешенных резонансов.

Для области неразрешенных резонансов все последние оценки, CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII, заимствуют оценку JENDL-3.3. Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера. Нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ.

Для энергии нейтронов 50 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.370E-4$, $S_1 = 5.480E-4$, $S_2 = 0.364E-4$, $Gg = 0.085$ эВ, $R = 6.308$ фм.

На основе проведенного анализа было принято решение, что для области разрешенных и неразрешенных резонансов целесообразно включить в БРОНД-3 оценку JENDL-3.3.

При отсутствии новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений в области резонансных нейтронов.

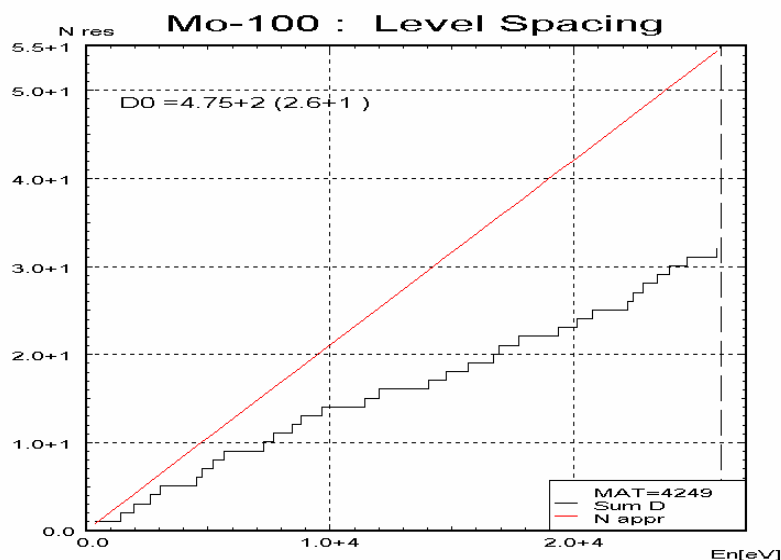


Рис.1. Расстояние между резонансами для S-волн.

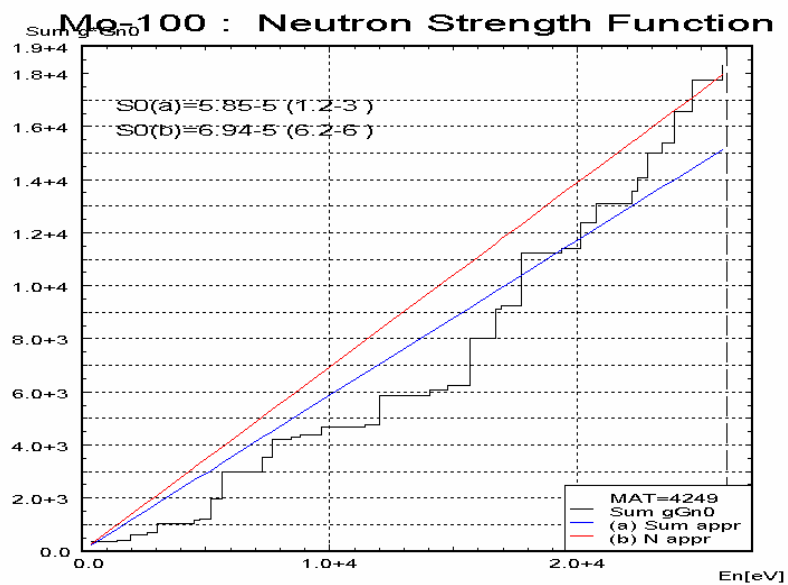


Рис. 1. Нейтронная силовая функция для S-волны.

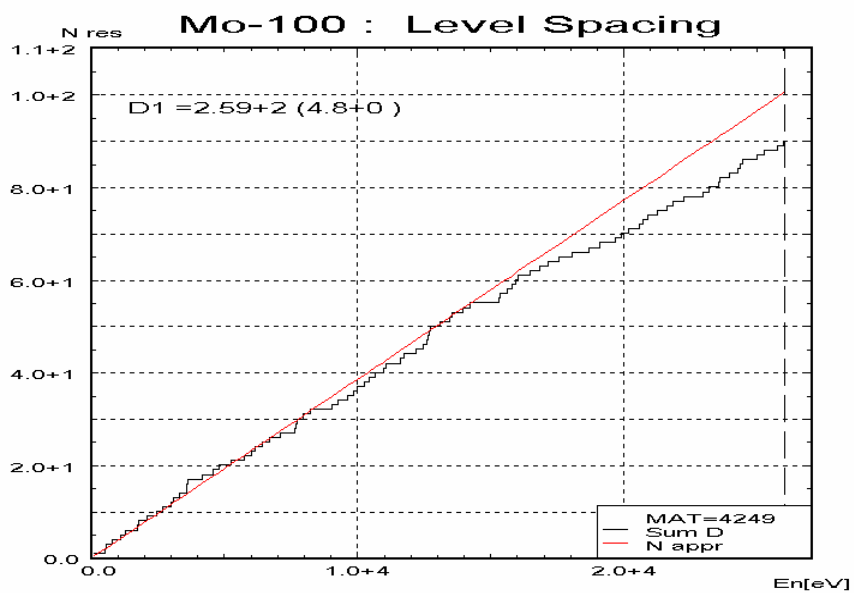


Рис. 3. Расстояние между резонансами для S-волны.

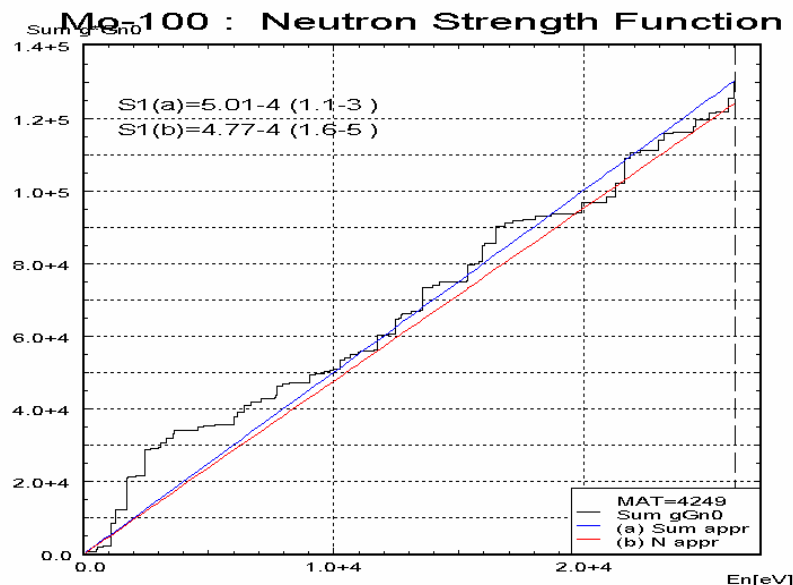


Рис.4. Нейтронная силовая функция для Р- волны.

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

В данном разделе проведено сравнение данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Поскольку в библиотеке JEFF-3.1 для изотопов молибдена приняты данные библиотеки JENDL-3.3, сравнение БРОНД-3 производилось с данными библиотеки JENDL-3.3 и ENDF-B7. В библиотеке ENDF-B7 в большинстве случаев также приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Поэтому сравнение с ENDF/B-VII проводилось только тех реакций, данные для которых отличаются от данных JENDL-3.3.

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин на основе подхода работы /26/. Нейтронные коэффициенты проницаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней 2+ и 3-. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /27/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /27/.

3.1. Полное сечение (MT=1).

В полном сечении в области 0.1-20 МэВ имеются существенные различия между данными указанных библиотек. В этой области данным библиотеки ENDF/BVII следует отдать предпочтение, поскольку они существенно лучше согласуются с экспериментальными данными. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 требуют пересмотра и коррекции.

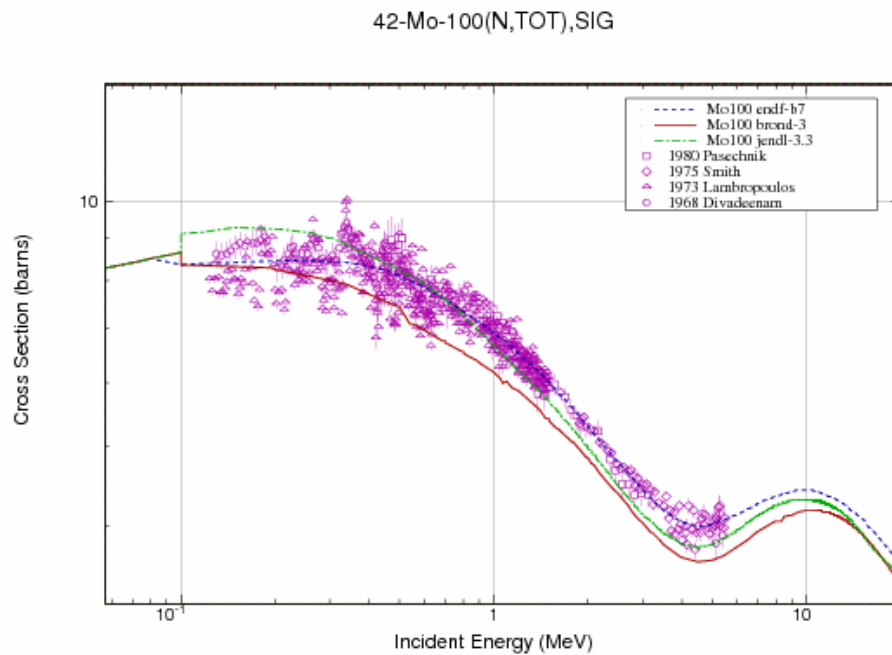


Рис. 5. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

В области энергий 0.1-20 МэВ имеются существенные различия. В этом случае оценки JENDL-3.3 и ENDF-B7 лучше согласуются с экспериментальными данными. Могут быть рекомендованы обе оценки, однако оценка JENDL-3.3 выглядит предпочтительней.

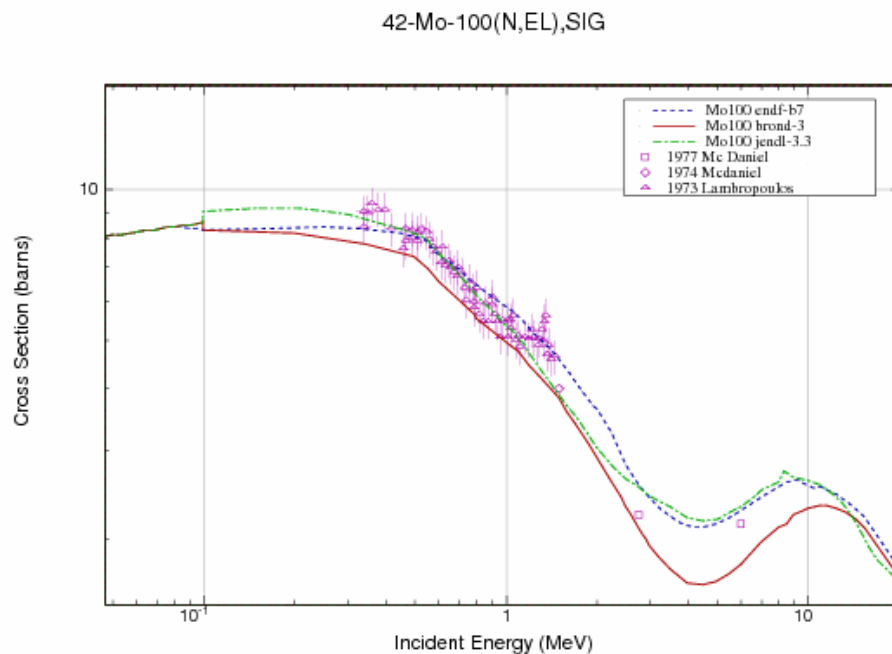


Рис.6. Сечение упругого рассеяния нейтронов в области 0.1-20 МэВ..

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-67).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых в БРОНД-3 рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Следует отметить, что в JENDL-3.3 парциальные сечения рассчитаны только для уровней 51-54, а в ENDF/B-VII для уровней 51-57. В нижеследующей таблице уровню под номером 1 соответствует уровень неупругого рассеяния под номером 51 в формате ENDF-6.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.5945 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	0.53560	2+	1 → 0	0.53557	100
2	0.69440	0+	2 → 1	0.159547	100
3	1.06370	2+	3 → 1 3 → 0	0.52824 1.06376	75 25
4	1.13610	4+	4 → 1	0.6005	100
5	1.46391	2+	5 → 2 5 → 1	0.76877 0.92834	56.4 43.6
6	1.50464	0+	6 → 3 6 → 1	0.44084 0.96907	27.5 72.5
7	1.60737	3+	7 → 4 7 → 3 7 → 1	0.47139 0.54362 1.07177	8.9 52.4 38.7
8	1.76650	2+	8 → 0	1.76650	100
9	1.77146	4+	9 → 4 9 → 3	0.63531 0.70768	35.5 64.5
10	1.84690	6+	10 → 4	0.71080	100
11	1.90837	3-	11 → 3 11 → 1 11 → 0	0.8444 1.37273 1.90820	66.4 30.5 3.1
12	1.97740	2+	12 → 5 12 → 3 12 → 2 12 → 1	0.51320 0.91372 1.2818 1.44169	24.3 25.9 17.0 32.8
13	2.03749	4+	13 → 13 → 1	0.5736 1.5019	6.2 93.8
14	2.04277	2+	14 → 7 14 → 5 14 → 3 14 → 1 14 → 0	0.43550 0.57880 0.97895 1.5075 2.0429	8.2 34.3 24.3 1.0 9.6
15	2.04300				

Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и ENDF-B7 совпадают, поскольку в ENDF-B7 принята оценка JENDL-3.3. Оценка BROND-3 существенно лежит выше оценки JENDL-3.3. Это различие связано с тем, что при оценке БРОНД-3 использовалась несферическая оптическая модель и другие улучшенные входные параметры. Интегральное сечение неупругого рассеяния библиотеки CENDL-3 лежит ближе к оценке БРОНД-3 и хорошо согласуется с ней по форме. Оценки сечений неупругого рассеяния на первом уровне существенно различаются, но зависимости BROND-3 и JENDL-3.3 выглядят предпочтительнее.

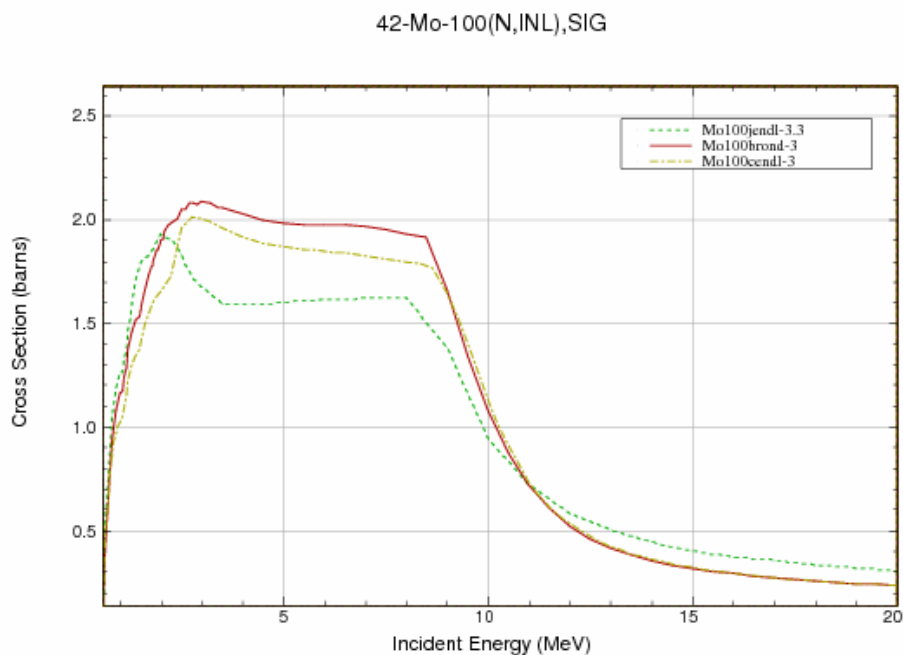


Рис. 7. Интегральное сечение неупругого рассеяния нейтронов.

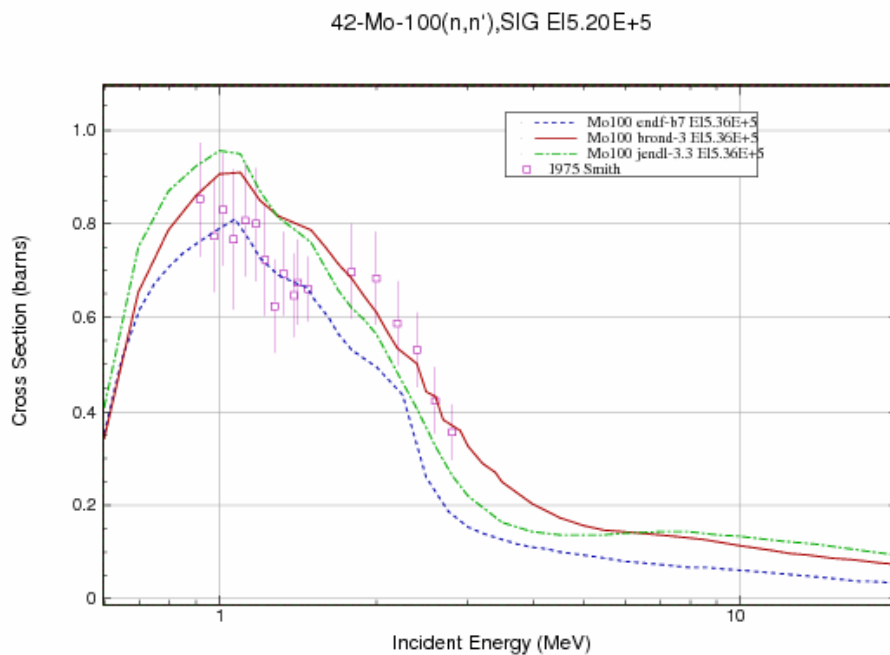


Рис.8. Неупругое рассеяние нейтронов на первом уровне.

3.4. Сечение реакции радиационного захвата (MT=102).

Оценки сечений БРОНД-3 и ENDF/B-VII примерно равноценны, оценка JENDL-3.3 требует существенной коррекции.

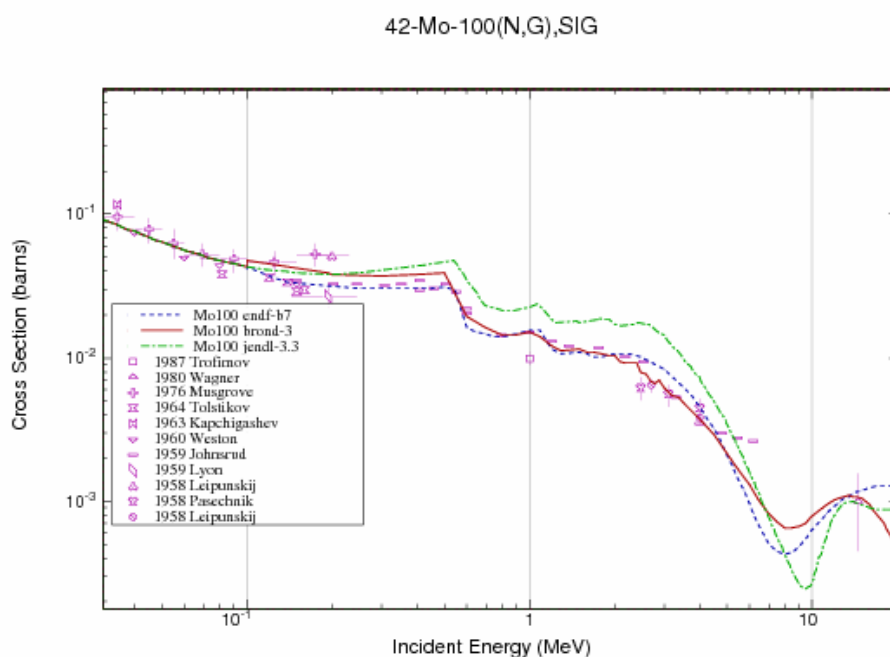


Рис. 9. Сечение реакции радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

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

Сечение реакции (n,2n) из библиотеки BROND-3 лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции (n,2n) и с экспериментальными данными. Оценка JENDL-3.3 завышена в области 14-18 МэВ, а оценка ENDF-B7 занижена при энергиях 10-14 МэВ.

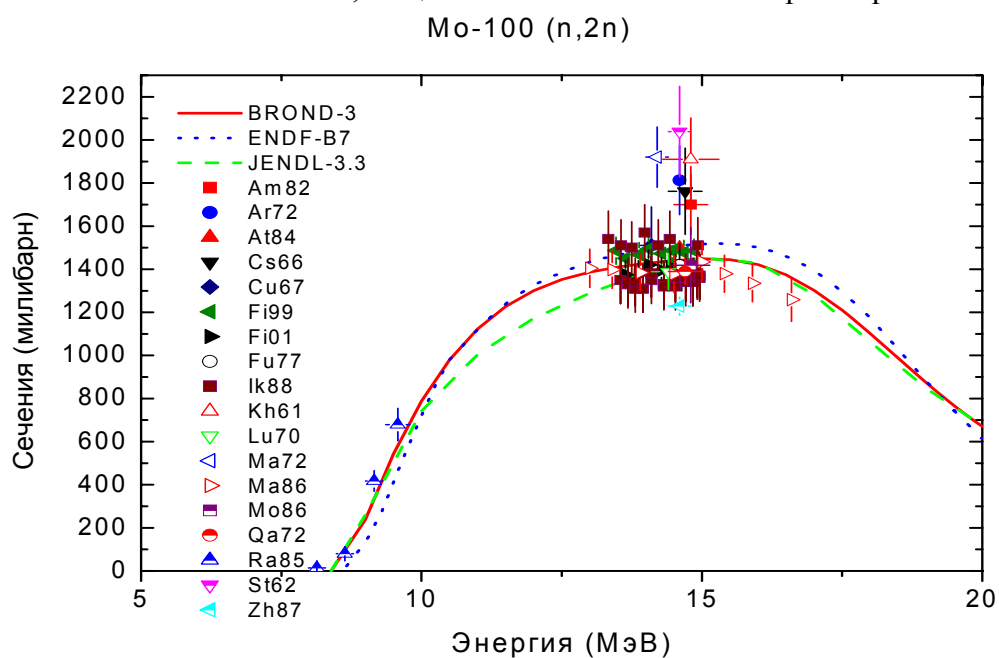


Рис.10. Сечение реакции (n,2n).

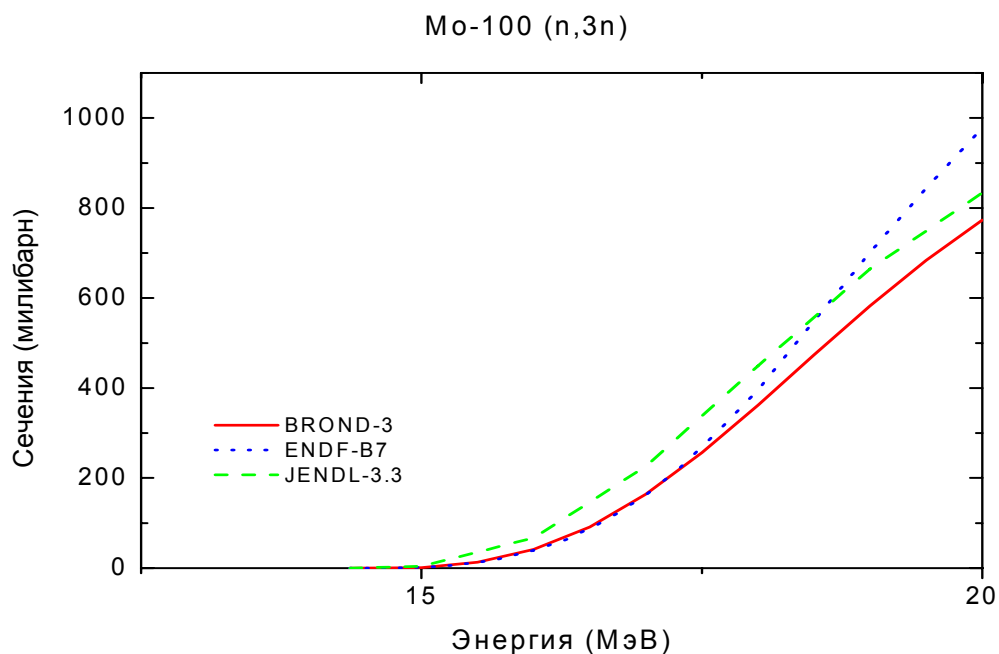


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.5. Сечение реакций (n,p), (n,d), (n,t), (n,a) (MT=103,104,105,107).

Сечение реакции (n,a) (рис.12) в библиотеках BROND-3 и JENDL-3.3 близки и практически равноценны. Сечения реакции (n,a) (рис. 14) в библиотеках BROND-3 и JENDL-3.3 также близки и может быть рекомендовано любое из них. Однако сечение из библиотеки ENDF-B7 противоречит как экспериментальным данным так и эмпирическим систематикам. Сечения реакции (n,d) (рис.13) библиотеки БРОНД-3 более предпочтительны, поскольку лучше согласуются с тенденцией поведения функций возбуждения этой реакции, установленной на основе экспериментальных данных для других изотопов молибдена и циркония. Данные реакции (n,t) в библиотеках БРОНД-3 и ENDF-B7 приняты из JENDL-3.3.

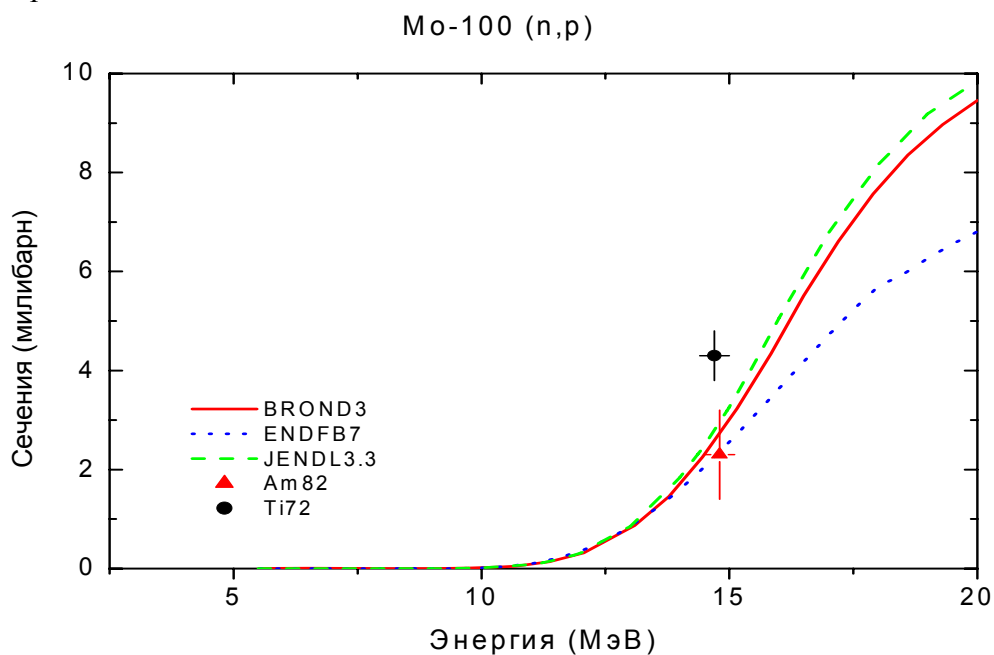


Рис. 12. Сечение реакции (n,p).

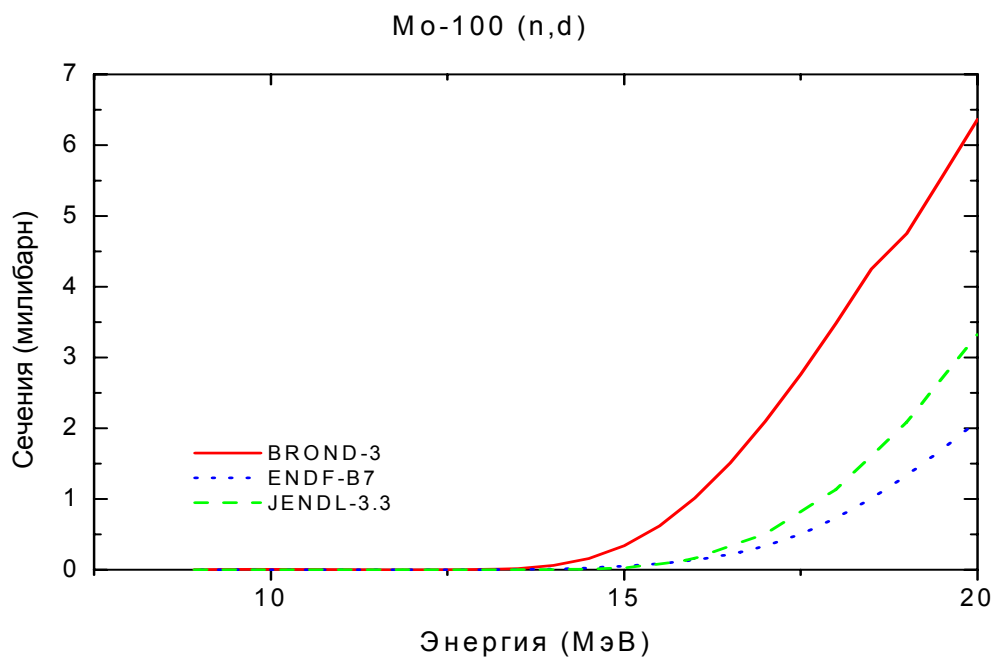


Рис. 13. Сечение реакции (n,d).

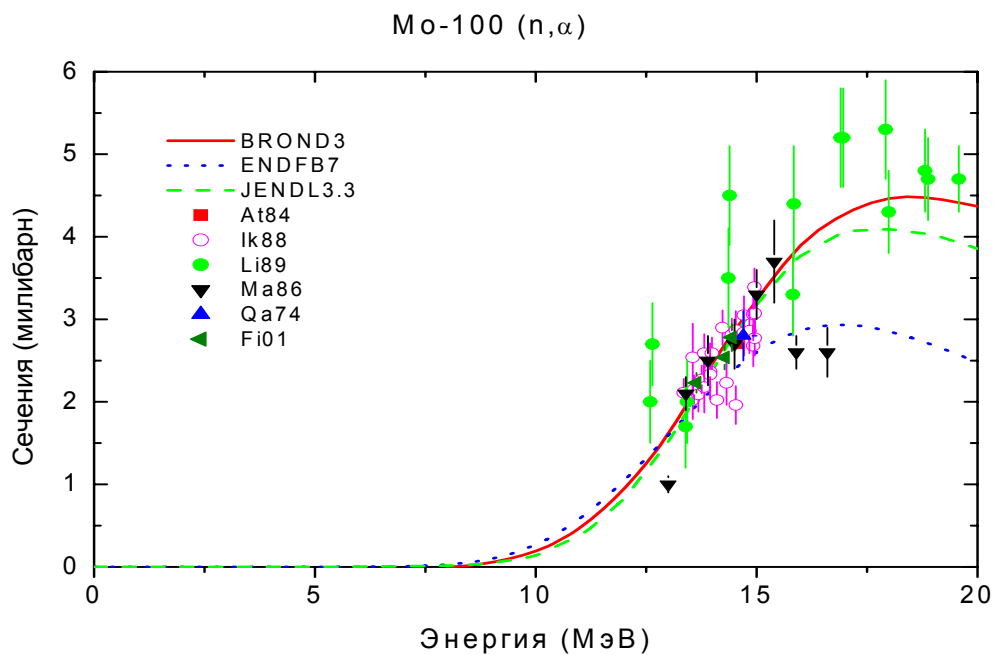


Рис. 14. Сечение реакции (n,α).

3.7. Сечение реакций (n,np) и (n,na) (MT=28,22).

Сечение реакции (n,np) (рис.15) в библиотеках БРОНД-3 и JENDL-3.3 заметно различаются, однако оценка БРОНД-3 лучше согласуется с эмпирической систематикой сечений реакций (n, p) и (n,np). Сечения реакции (n,na) малы и во всех библиотеках различаются несущественно.

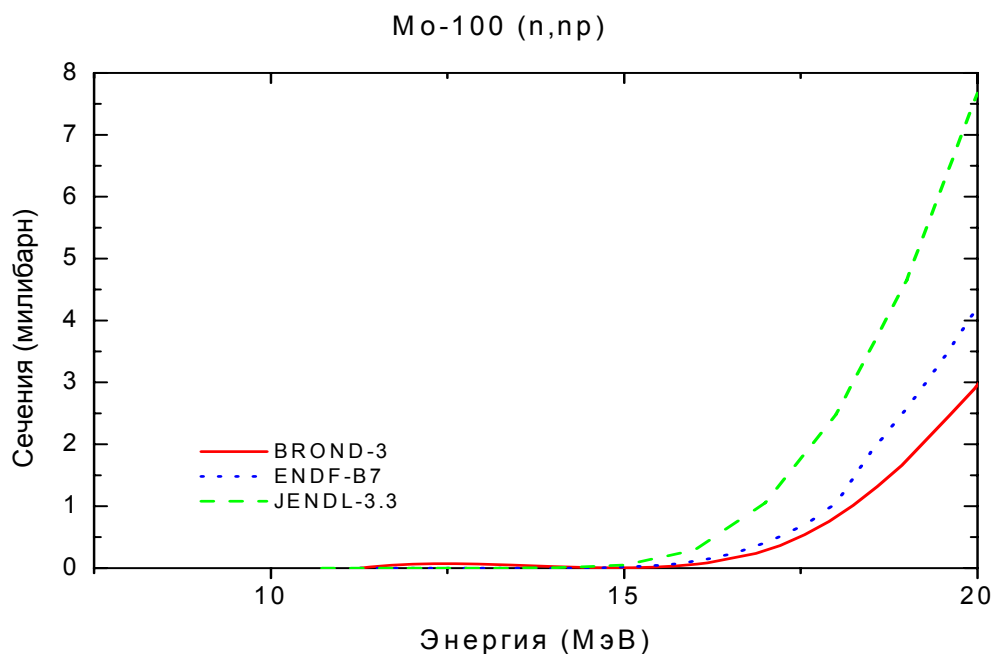


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

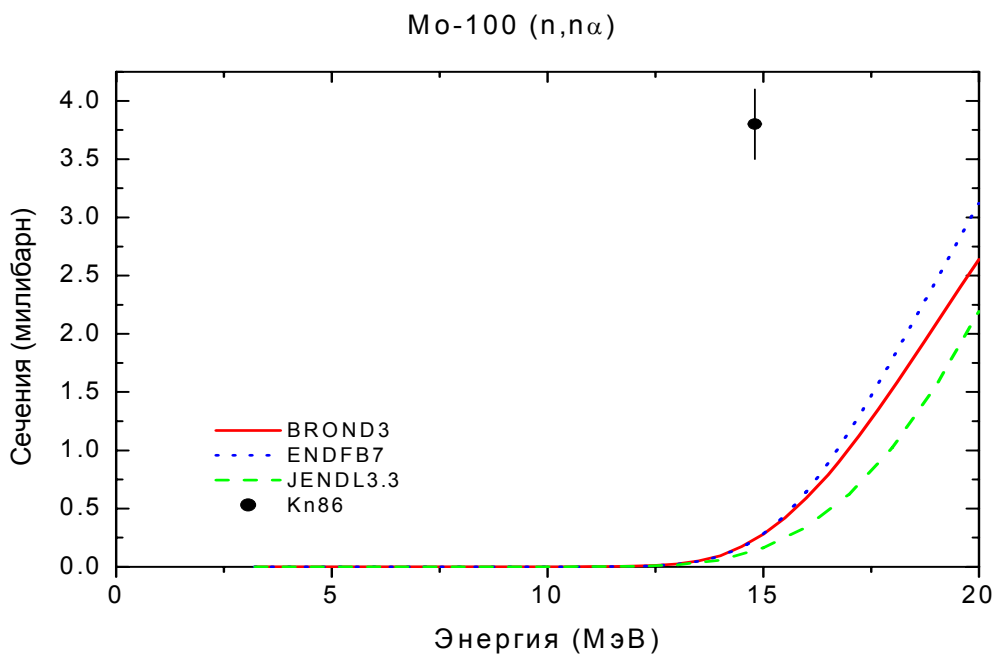


Рис. 16. Сечение реакции (n,nα).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/6/.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /17/

6. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

8. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=3,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy /6/.

ЛИТЕРАТУРА:

Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).

1. Weigmann, H. et al. Phys. Rev., C20, 115 (1969).
2. Weigmann, H. et al.: 1971 Konoxville, 749(1971).
3. Musgrove, A.R.De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).
4. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
5. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
6. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
7. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
8. Koning, A.J., Dalaroché, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
9. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
10. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
11. Dietrich, S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1988) 199.
12. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
13. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
14. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
15. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
18. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
19. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).
20. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
21. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.

Перечень использованных экспериментальных работ

Полное сечение

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Pa80	M.V.Pasechnik	C,80Kiev,1,304,1980	40617	4.58+05	3.12+06	54
Sm75	A.B.Smith	J,NP/A,244,213,1975	10524	1.64+06	5.51+06	88
La73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	1.01+05	1.50+06	594
Di68	M.Divadeenam	J,DA/B,28,3834,1968	10523	1.30+05	6.40+05	103

Сечение радиационного захвата

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Trofimov87	Yu.N.Trofimov	C,87Kiev, 3, 331, 1987	41001	1.0+06		1
Wy82	J.M.Wyrick	S,ANL-83-4,196,8204	12831	3.0+04		1
Wa80	M.Wagner	J,APA,52,23,80	20718	1.46+07		1
An79	R.P.Anand	J,NC/A,50,274,197903	30390	2.50+04		1
Gl77	G.Gleason	W,GLEASON,770414	10662	2.53-02		1
Sr73	M.Sriramachandra	J,JPI,35,8,7307	30503	2.40+04		1
To64	V.A.Tolstikov	J,AE,17,(6),505,64	40689	5.00+03	1.60+05	8
Ka63	S.V.Kapchigashev	J,AE,15,120,63	40663	1.95+02	3.50+04	39
We60	L.W.Weston	J,AP,10,477,60	11818	4.00+03	1.50+05	9
Ly59	W.S.Lyon	J,PR,114,1619,59	11407	1.95+05		1
Jo59	A.E.Johnsrud	J,PR,116,927,59	11675	1.50+05	6.20+06	24
Ve59	J.F.Vervier	J,NP,9,569,5901	20205	2.50+04		1
Le58	A.I.Leipunskij	C,58Geneva,15,50(2219)	40244	2.70+06	4.00+06	2
Pa58	M.V.Pasechnik	C,58Geneva,15,18(2030)	40336	2.50+06	4.00+06	3
Ko58	V.N.Kononov	J,AE,5,564,58	40421	2.40+04		1
Ma57	R.L.Macklin	J,PR,107,504,57	11399	2.40+04	2.40+04	2
Hu51	V.Hummel	J,PR,82,67,5104	11010	2.40+04		1

Сечение упругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
McDaniel77	F.D.McDaniel	P,A-KTY-74/77,3,1977	10770 12782	2.52+06 6.00+06		1 1
McDaniel74	F.D.McDaniel	J,PR/C,10,1087,1974	10391	1.50+06		1
La73	P.Lambropoulos	J,NP/A,201,1,1973	10277	3.0+05	1.5+06	130

Сечение реакции (n,2n)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
Filat01	A.A.Filatenkov	J,YK-2(1998)10	41240	1.3+06	1.5+06	7
Filat99	A.A.Filatenkov	R, RI-252, 1999	41240	1.35+07	1.49+07	8
Ikeda88	Y.Ikeda	R,JAERI-1312(1988)	22089	1.3+07	1.5+07	7
Zhou87	Zhou Muyao	J, CNP, 9,34, 1987	30755	1.46+07		1
Molla86	N.I.Molla	R, INDC(BAN)-003, 1986	30825	1.48+07		1
Marcinko86	A.Marcinkowski	J, ZP/A,323,91, 1986	30809	1.3+07	1.7+07	8
Rahman85	M.Rahman	J,NP/A,435(1985)43	21990	5.9+06	9.6+06	8
Atsumi84	H.Atsumi	R,NEANDC(J)106	21935	1.5+07		1
Anemia82	S.Anemiya	J, NST,19, (10), 781, 1982	21840	1.48+07		1
Fujino77	Y.Fujino	R,NEANDC(J)-51U(1977)	20850	1.5+07		1
Qaim72	S.Qaim	J,NP/A,185(1972)614	20536	1.5+07		1
Маслов72	Г.Н.Маслов	J,YK-9(1972)50	40136	1.4+07		1

Araminow72	J.Araminowich	R, INR-1464(1972)14	30264	1.5+07		1
Lu70	W.D.Lu	J,PR,C1(1970)358	10145	1.4+07		1
Chikai67	J.Chikai	J,AHP,23(1967)87	30033	1.6+07		1
Cuzzocrea67	P. Cuzzocrea	J. NP/A, 103, 616, 1967	21141	1.41+07		1
Chikai65	J.Chikai	C,EANDC-50,102(1965)	30038	1.5+07		1
Strohal62	F.Strohal	J,NP,30(1962)49	30008	1.4+07		1
Khurana61	C.S.Khurana	J, NP, 28, 560, 1961	31247	1.48+07		1

Сечение реакции (n,a)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Filat01	A.A.Filatenkov	J,YK-2(1998)10	41240	1.3+06	1.5+06	7
Liskien90	H.Liskien	J,ARI,41(1990)83	22125	1.3+07	2.0+07	15
Ikeda88	Y.Ikeda	R,JAERI-1312(1988)	22089	1.3+07	1.5+07	7
Marcinko86	A.Marcinkowski		30940	1.3+07	1.7+07	8
Atsumi84	H.Atsumi	R,NEANDC(J)106	21935	1.5+07		1
Qaim 74	S.Qaim	C,77Geel,327(1977)	20513	1.5+07		1
Cuzzocrea67	P. Cuzzocrea	J. NP/A, 103, 616, 1967	21141	1.41+07		1

Сечение реакции (n,p).-

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Anemia82	S.Anemiya	J, NST,19, (10), 781, 1982	21840	1.48+07		1
Tikku72	V.K.Tikku	C,72 Chandigr,2,115	30394	1.5+07		1

9. Заключение

7.1. Вывод. На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд недостатков, оценка БРОНД-3 может быть принята за основу для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций в БРОНД-3 уточнены на основе согласованных статистических расчетов, расширено существенно количество уровней неупругого рассеяния, для которых рассчитаны парциальные сечения, уточнены также сечения всех пороговых реакций. Возможно включить описанную версию файла **БРОНД-3 для Mo-100 в библиотеку Росфонд-2005**, если провести коррекцию полного сечения во вне резонансной области энергий. Однако в данном случае файл JENDL-3.3 имеет заметные преимущества и может быть включен в Росфонд-2005.

Авторы отбора данных

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.