

1. ВОДОРОД

В библиотеке РОСФОНД представлены полные наборы данных для всех трех известных изотопа водорода – обычного водорода, ^1H , тяжелого водорода или дейтерия, ^2H или ^2D , и радиоактивного сверхтяжелого водорода – трития, ^3H или ^3T .

Тритий испытывает бета-распад в гелий-3 с периодом $T_{1/2}=12.323$ года.

1.1. Водород

1. Общие характеристики

$Z=1$

$A^1=1.00782503207\pm 0.00000000010$

$Aw^1=0.9991673313\pm 0.00000000006$

Содержание в естественной смеси: 99.985 ат%;
99.970 вес%

Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q^1 , МэВ	$E_{\text{порог.}}$, МэВ	Ядро-продукт ^{*)}
102	(n, γ)	2.224566 ± 0.000015	-	D

Схема уровней: возбужденные состояния невозможны.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = \frac{1}{2}^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R=1.276553 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область неразрешенных резонансов отсутствует.

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

При отборе оцененных нейтронных данных для библиотеки РОСФОНД рассматривались следующие оценки, используемые в современных библиотеках оцененных данных:

- Оценка Гопкинса и Брайта², принятая еще в библиотеку ENDF/B-IV и практически без изменений перешедшая в ENDF/B-V, включая ее последнюю версию - ENDF/B-V.2 (изменение коснулось лишь закона интерполяции между точками и добавлением данных о погрешностях, которые будут обсуждены ниже).

¹ G.Audi, A.H.Wapstra and C.Thibault, Nucl. Phys. A729, p. 337-676, December 22, 2003

² J.C. Hopkins and G.Breit, N.D. A9, 145 (1971)

- Оценка Хэйла, Доддера, Сицилиано и Вильсона³, принятая в 1989 г в библиотеку ENDF/B-VI(Rev.1), в области энергий ниже 20 МэВ основана на R-матричном анализе экспериментальных данных. Лишь в области энергий выше 20 сечения и угловые распределения рассчитывались по программе NPSCAT с использованием фазовых сдвигов, оцененных Сицилиано и Вильсоном.
- Оценка К.Шибата, выполненная для библиотеки JENDL-2, и несколько пересмотренная при энергиях ниже 100кэВ при переоценке для библиотеки JENDL-3.3⁴
- Оценка Хэйла и Янга⁵ основана на R-матричном анализе экспериментальных данных по (n-n) и по (p-p)-рассеянию при энергиях ниже 30 МэВ. Использовалась более полная экспериментальная информация, чем та, что имелась во время выполнения предыдущих оценок Гопкинсом и Брайтом и Доддером и Хэйлом. С помощью 33 параметров теоретической модели удалось описать с точностью до погрешностей 836 экспериментальных точек ($\chi^2=0.9988$). Как и ранее постулировалась зарядовая независимость ядерных сил. Авторы отмечают, что угловые распределения (n-n) и (p-p)-рассеяния совершенно различны из-за влияния кулоновского рассеяния, но с помощью одних и тех же ядерных параметров с учетом влияния кулоновского взаимодействия на (p-p)-рассеяние удается описать всю совокупность данных. Авторы не сообщают, однако, сколь сильно повлиял учет (p-p)-рассеяния на оценку сечений и угловых распределений (n-p)-рассеяния и на погрешности оцененных данных.

Оценка Хэйла и Янга была принята в качестве международного стандарта и включена в ENDF/B-VI (Rev.4). При последней ревизии этой библиотеки ENDF/B-VI (Rev.5). данные о сечениях водорода не менялись. Эта же оценка, принята и в библиотеке ФОНД-2.2.

Поскольку эта оценка представлялась наиболее надежной, именно она и была первоначально принята в библиотеку РОСФОНД.

- В декабре 2006 г., т.е. после завершения работы над РОСФОНДом, стала доступна исходная версия (Revision 0) библиотеки ENDF/B-VII, в которую включена новая оценка сечений водорода, выполненная Хэйлом еще в конце 2005 г. в рамках работ, проводившихся международной группой по оценке сечений реакций, использующихся в качестве нейтронных стандартов. В заголовочной секции этой оценки отмечается, что новый R-матричный анализ, на котором основана эта оценка, отличается от предыдущего в нескольких аспектах. Прежде всего, данные по радиационному захвату и данные по обратной реакции – фоторасщеплению дейтрона – были включены в совокупный анализ с самого начала, а не подключены к нему в качестве дополнительной информации, как это делалось ранее. Это удалось сделать благодаря использованию нового метода учета фотонных каналов в R- матричной теории⁶, который, в частности, позволил более корректно описывать E1-переходы. Исходными данными для теоретического описания этих реакций служили, главным образом, интегральные и дифференциальные сечения, но в анализ были включены и имеющиеся поляризационные данные. Сечение

³ G.M. Hale, D.C. Dodder, E.R. Siciliano, W.B. Wilson (LANL)

⁴ Shibata K. et al.: JAERI-Research 96-041 (1996) [in Japanese].

⁵ Nuclear Data Standards for Nuclear Measurements, 1991 NEANDC/INDC Nuclear Standard File. NEANDC-311"U", 1992.

⁶ G. M. Hale and A. S. Johnson, Proc. 17th Int. IUPAP Conf. on Few-Body Problems in Physics, 5-10 June 2003, Durham NC, W. Gloeckle and W. Tornow, eds., Elsevier B.V., pp. S120-S122 (2004).

захвата тепловых нейтронов принято таким же, как и в предыдущей оценке, т.е. равным 332.0 миллибарн. Оцененное сечение захвата хорошо согласуется как с недавними измерениями астрофизической группы^{7,8} при энергиях 20 – 550 кэВ, так и с более ранними данными, полученными, главным образом, в экспериментах по фоторасщеплению дейтронов при энергиях ниже 14 МэВ. Во-вторых, в новом анализе учтено несколько дополнительных измерений полного сечения. В результате вновь оцененное полное сечение отличается от прежнего при 10 МэВ на -0.5%. В-третьих, в анализе приняты во внимание новые данные и сечения рассеяния медленных нейтронов и их угловом распределении. Учет результатов новых измерений угловых распределений нейтронов с энергией 10 МэВ⁹ и коррекции результатов более ранних измерений при 14 МэВ, привел к тому, что в области 10 – 14 МэВ переднее-задняя асимметрия согласно новой оценке оказалась промежуточной между оценками, принятыми в ENDF/B-V и ENDF/B-VI. В-четвертых, оказалось, что включение в анализ результата измерения длины когерентного рассеяния тепловых нейтронов в работе¹⁰ привел к интересному эффекту: оцененное сечение рассеяния при “нулевой энергии” снизилось так, что пришло в отличное согласие с результатами ранних измерений Хоука¹¹ и расходится с более поздними и более точными измерениями Дилга¹². В заголовочной секции файла отмечается, что данные по ковариации погрешностей нейтронных данных будут включены в файл позже, но без каких-либо обоснований и комментариев приводится следующая оценка погрешностей полного сечения с шагом 2 кэВ:

En	Погр. (%)
0	0.20
2	0.22
4	0.30
6	0.36
8	0.44
10	0.50
12	0.49
14	0.46
16	0.40
18	0.35
20	0.30

Появление уточненных данных о важнейшем нейтронном стандарте привело к необходимости заменить в РОСФОНДе данные для водорода на новую оценку.

Ниже будет рассмотрено, насколько перечисленные выше оценки отличаются друг от друга и насколько они согласуются с имеющимися нейтронными данными. Однако, прежде всего, сравним перечисленные выше оценки друг с другом. Сравнить будем оценки полного сечения, которое при энергии выше 10 эВ практически не отличается от сечения упругого рассеяния. Сравнение проводится на рис. 1а – 1в. Нанесенные на графики данные получены после приведения сравниваемых оцененных данных к общей энергетической сетке. Интерполяция к промежуточным

⁷ T. S. Suzuki et al., *Astrophys. Lett.* 449, L59 (1995).

⁸ Y. Nagai et al., *Phys. Rev. C* 56, 3173 (1997).

⁹ N. Boukharouba et al., *Phys. Rev. C* 65, 014004 (2002).

¹⁰ K. Schoen et al., *Phys. Rev. C* 67, 044005 (2003).

¹¹ T. L. Houk, *Phys. Rev. C* 3, 1886 (1971).

¹² W. Dilg, *Phys. Rev. C* 11, 103 (1975).

энергетическим точкам проводилась по предписанным файлами законам интерполяции. Как правило, это была линейная интерполяция в дважды логарифмическом масштабе. Исключение составляло сечение, принятое в ENDF/B-V, которое при энергиях выше 4 кэВ предписывалось интерполировать линейно в линейно-линейном масштабе. Треугольниками при нулевом значении расхождения показаны узловые точки, в которых заданы сечения в файле ENDF/B-VII. На кривых расхождений других оценок с данными ENDF/B-VII узловые точки изображены кружками.

На графиках нанесены также две оценки погрешностей полного сечения – одна представляет собой оценку Хэйла, приведенную выше, другая – оценку, выполненную в настоящей работе. Основания для этой оценки будут даны ниже по ходу изложения.

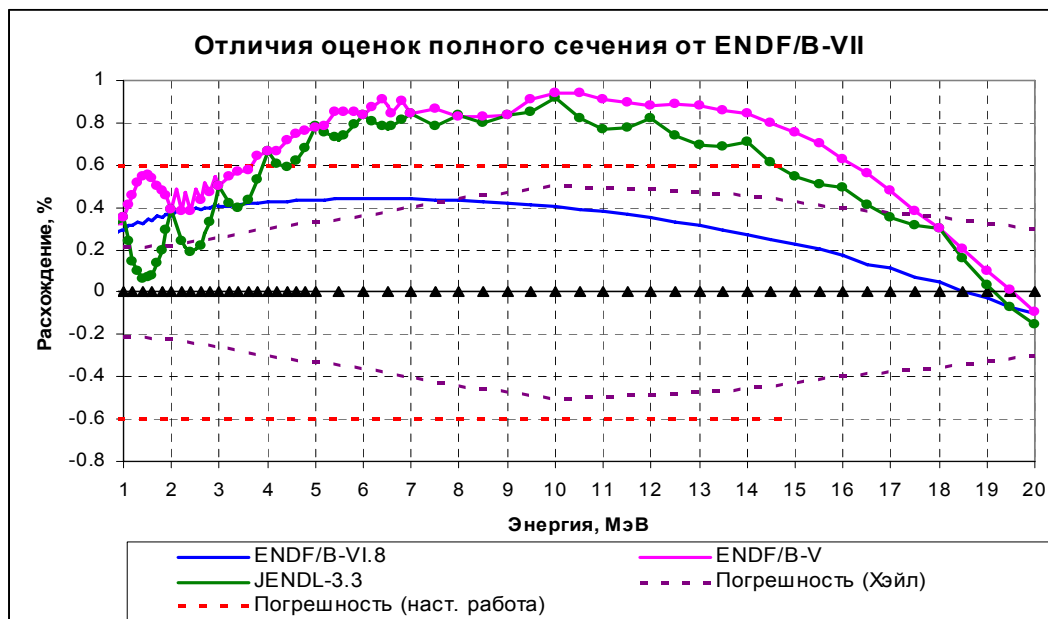


Рис.1а. Расхождения в полном сечении водорода в области мегаэлектронвольт

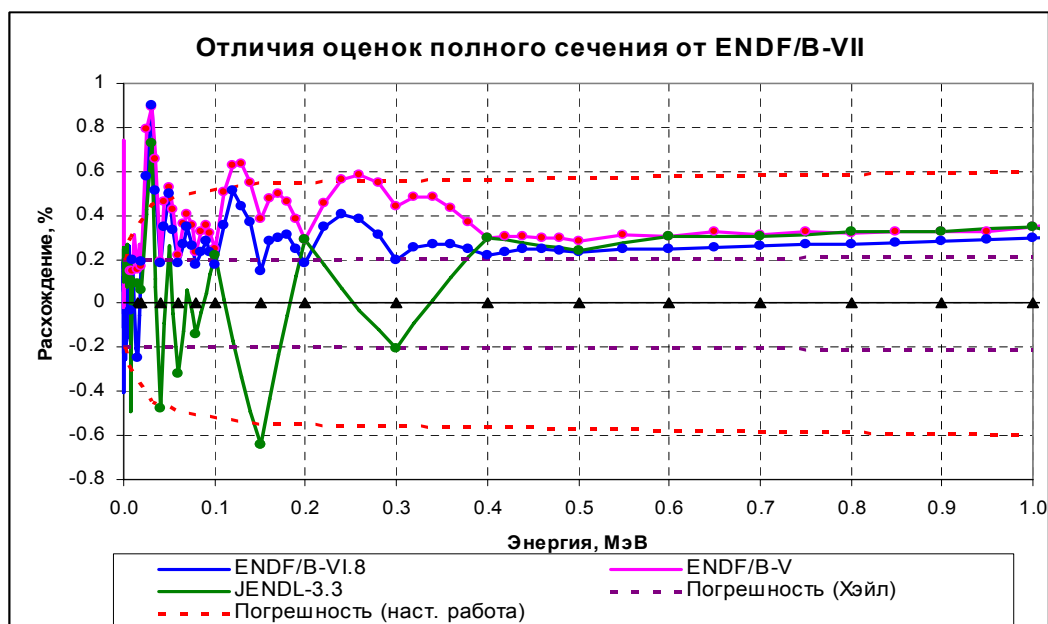


Рис.1б. Расхождения в полном сечении водорода в области сотен килоэлектронвольт

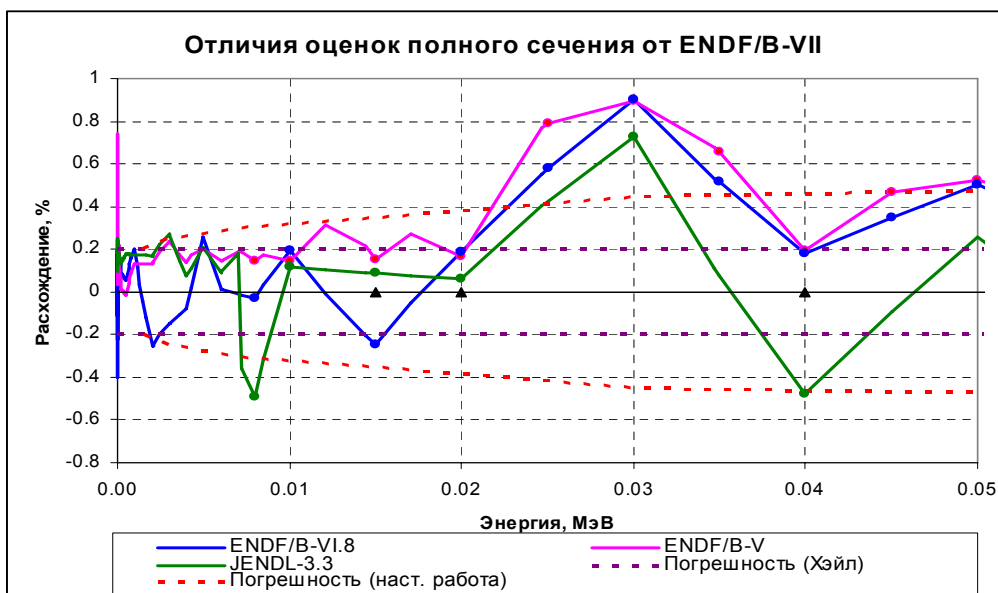


Рис.1в. Расхождения в полном сечении водорода в области десятков килоэлектронвольт

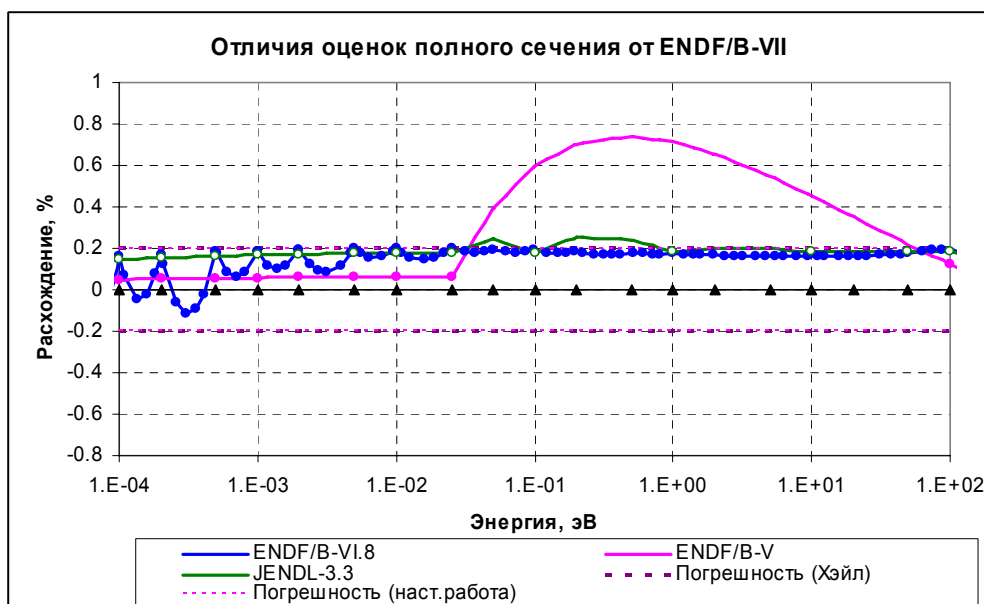


Рис.1г. Расхождения в полном сечении водорода в электронвольной области.

Приведенные данные показывают, что погрешности в оцененных полных сечениях, обусловленные несовершенством принятых интерполяционных схем, оказываются сравнимыми, а порой и превосходящими погрешности оцененных сечений в узлах интерполяционных сеток. Можно полагать, однако, что интерполяционная схема, принятая в ENDF/B-VII, не ведет к погрешностям, превосходящим погрешность оценки сечения в узловых точках.

3.1. Полное сечение (MT=1).

Во всех файлах оцененных данных, естественно, обеспечено равенство $\sigma_t = \sigma_c + \sigma_e$. Погрешность полного сечения оценивается как 0.2%. При 10 эВ вклад сечения захвата в полное сечение составляет 0.08%, а при 100 эВ - менее 0.03%. Поскольку никаких сомнений в форме энергетической зависимости сечений в области ниже 100 эВ не

имеется, целесообразно рассматривать лишь составляющие полного сечения – сечение рассеяния и сечение захвата.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

3.2.1. Сравнение результатов различных оценок.

Сечение рассеяния нейтронов на водороде является одним из основных стандартов при измерениях нейтронных сечений. При энергиях выше 10 эВ оно практически совпадает с полным сечением. Поэтому сравнение оцененных полных сечений, проведенное на рис. 1а-1г, является и сравнением сечений упругого рассеяния. Как видно из рис. 1а, 1б в мегаэлектронвольтовой области новая оценка сечения рассеяния понижена до 0.3 – 0.4%, что при энергиях ниже 8 МэВ превышает погрешность, приписанную результату оценки ее автором – Хэйлом (являющимся соавтором и предыдущей оценки, принятой в ENDF/B-VI). Даже в тепловой области (рис. 1г) расхождение между последними оценками составляет 0.2 %, откуда можно заключить, что эта погрешность отнюдь не завышена.

3.2.2. Сравнение с экспериментальными данными

На рис. 2а – г результаты принятой оценки РОСФОНД=ENDF/B-VII сравниваются с экспериментальными данными. Сравнение проводится для полного сечения, которое в области энергий выше 10 эВ практически неотличимо от сечения упругого рассеяния. При более низких энергиях результаты эксперимента всё более заметно превышают данные, оцененные для взаимодействия нейтронов со свободными протонами, за счет теплового движения и влияния связи водорода в молекулах образца. На рис. 2а красным пунктиром указано значение потенциального рассеяния, определенное как $4\pi R^2$, где R – радиус, указанный в разделе 2.2.

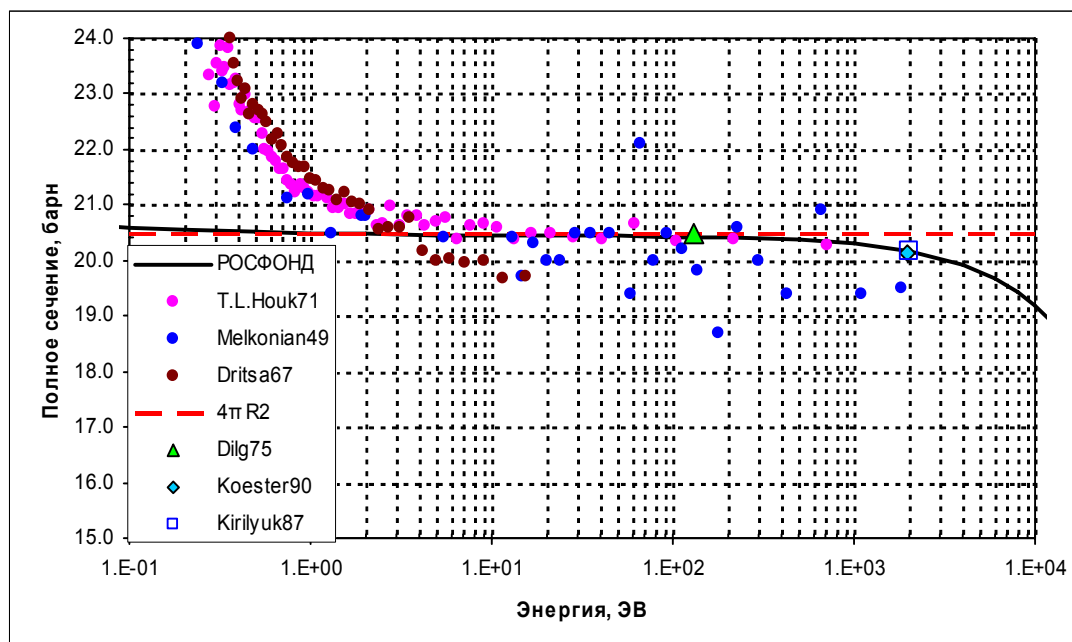


Рис.2а. Сравнение оцененных и экспериментальных данных.

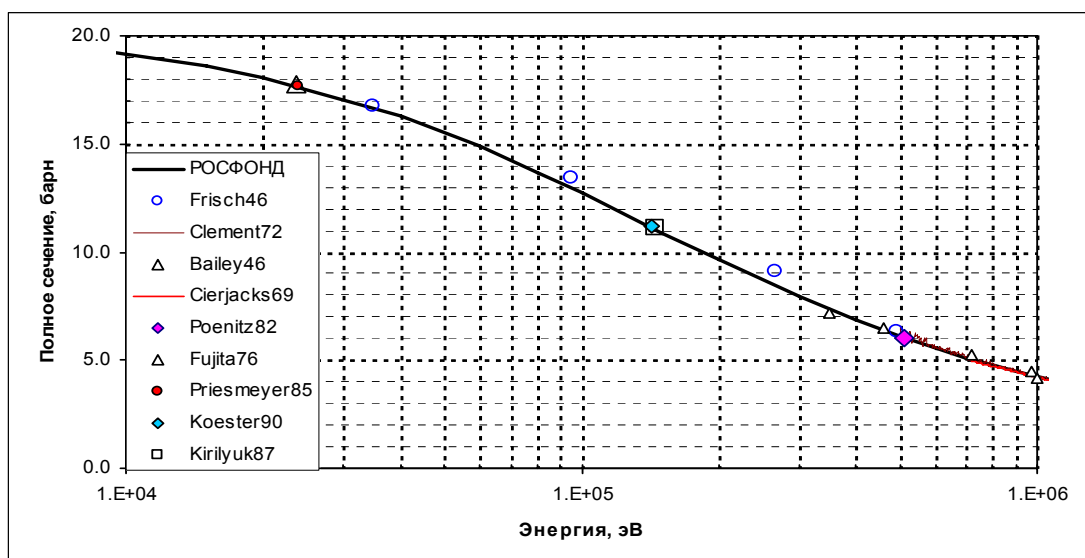


Рис.2б. Сравнение оцененных и экспериментальных данных.

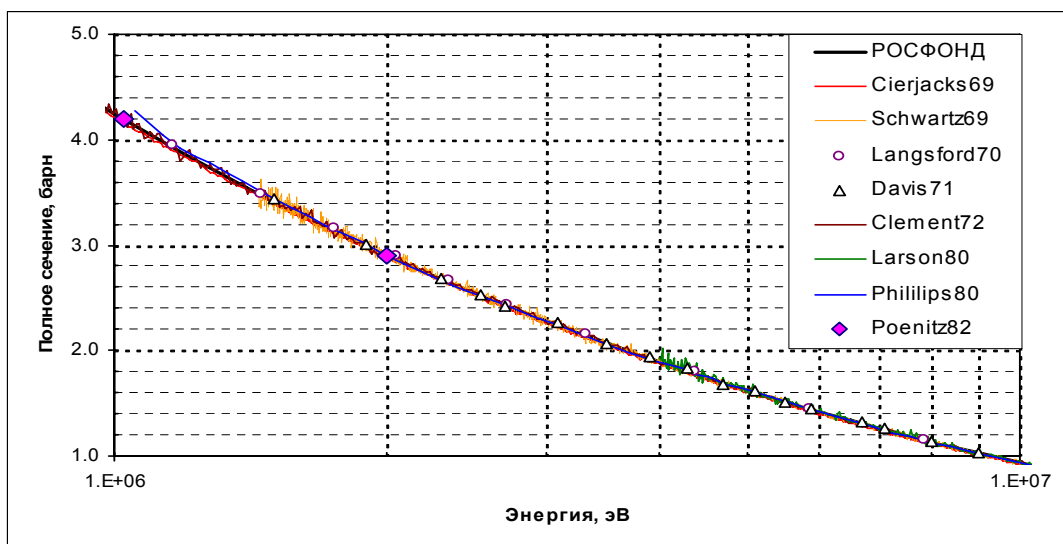


Рис.2в Сравнение оцененных и экспериментальных данных.

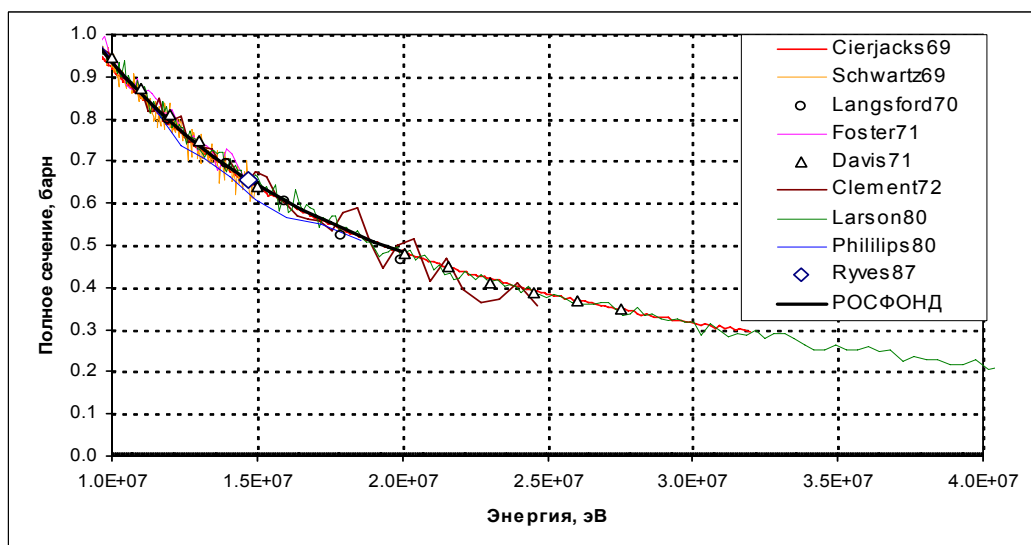


Рис.2г Сравнение оцененных и экспериментальных данных.

Как видно, из рис. 2, принятая оценка хорошо согласуется с экспериментальными данными. Напомним, однако, что экспериментальные данные, изображенные на рис. 2 представляют собой лишь часть массива экспериментальной информации, учитывавшейся при оценке сечения рассеяния нейтронов на водороде. В этот массив входили и данные для рассеяния протонов на протонах и данные о рассеянии нейтронов со значительно более высокими энергиями (как сечения, так и угловые распределения). Эта экспериментальная информация позволила уточнить параметры теоретической модели и тем самым уточнить сечения в рассматриваемой здесь энергетической области. Поэтому малая плотность экспериментальных точек в области десятков и первых сотен килоэлектронвольт, не означает, что сечения в этой области плохо известны: они достаточно надежно экстраполируются из области более низких и более высоких энергий.

3.3. Сечение радиационного захвата (MT=102)

3.3.1. Оцененные данные.

Сечение радиационного захвата при энергии 0.0253 эВ в большинстве принятых в настоящее время оценок (включая последнюю, принятую в РОСФОНД) принято одним и тем же: равным 0.3320 барн. В ENDF/B-VI (Rev.1) это сечение было заменено на 0.3326 – величину, рекомендуемую в компиляции Мухабхаба¹³ (0.3326 ± 0.0007). Такое же значение сечения захвата было принято и в библиотеке ФОНД-2.2. В ENDF/B-VII, а, следовательно, в РОСФОНДе, сечение захвата тепловых нейтронов вновь принято равным 0.3320 барна (точнее 0.3320126 барна).

Что касается энергетического поведения сечения захвата, то во всех оценках, кроме последней оно принималось одинаковым. В последней оценке Хэйла ход сечения захвата существенно изменен под влиянием новых экспериментальных данных и более корректного учета информации о фоторасщеплении дейтона. На рис.3а, 3б показаны отклонения прежних оценок сечения захвата от новых.

Треугольниками на оси энергий показаны узловые точки, в интерполяционной схеме, принятой в последней оценке. Выше 10 кэВ в ENDF/B-VII рекомендован линейно-линейный закон интерполяции, ниже - линейный закон интерполяции в дважды логарифмическом масштабе. В этой области треугольники зачернены.

Точками на кривой показаны узловые точки в предыдущих оценках, в которых во всей области рекомендован линейный закон интерполяции в дважды логарифмическом масштабе. В тех интервалах, в которых интерполяционная сетка новой оценки разрежена, различие законов интерполяции привело к появлению заметных “фестонов” в энергетической зависимости расхождений. На краях этих интервалов узловые точки прежних оценок, совпадающие по энергии с точками на сетке ENDF/B-VII, выделены цветом.

Представляется, что загромождение интерполяционной схемы в ENDF/B-VII не вполне оправдано. Однако поскольку различие схем интерполяции значительно менее существенно, чем пересмотр оценки сечения захвата в целом, никаких уточнений в интерполяционную схему при формировании библиотеки РОСФОНД решено не вносить.

¹³ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-factors. INDC(IND)-440 Feb. 2003.

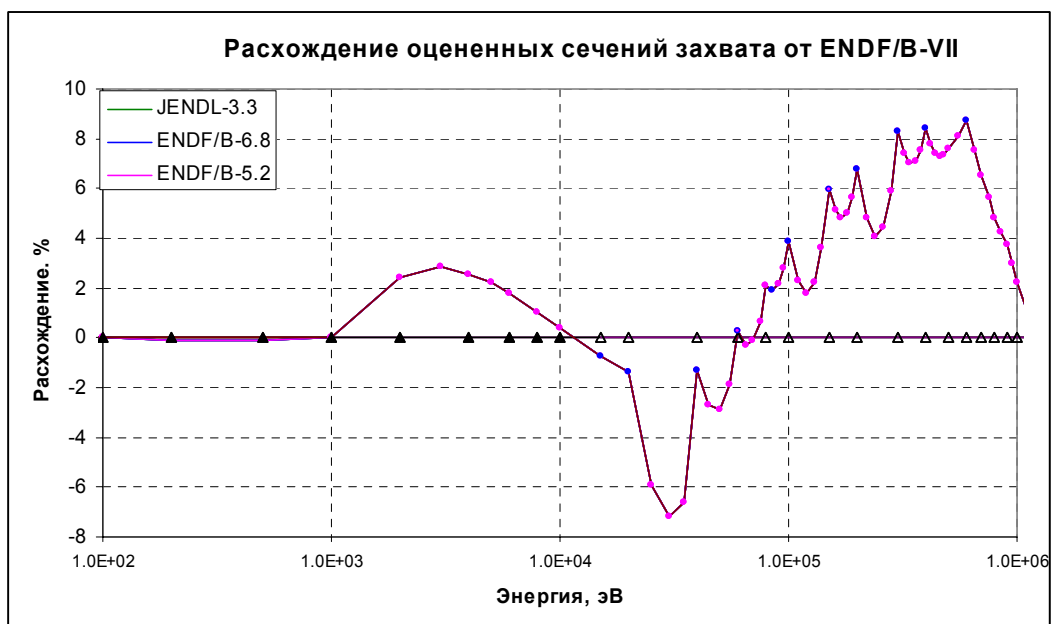


Рис. 3а. Отклонение оцененных сечений захвата от оценки Хэйла

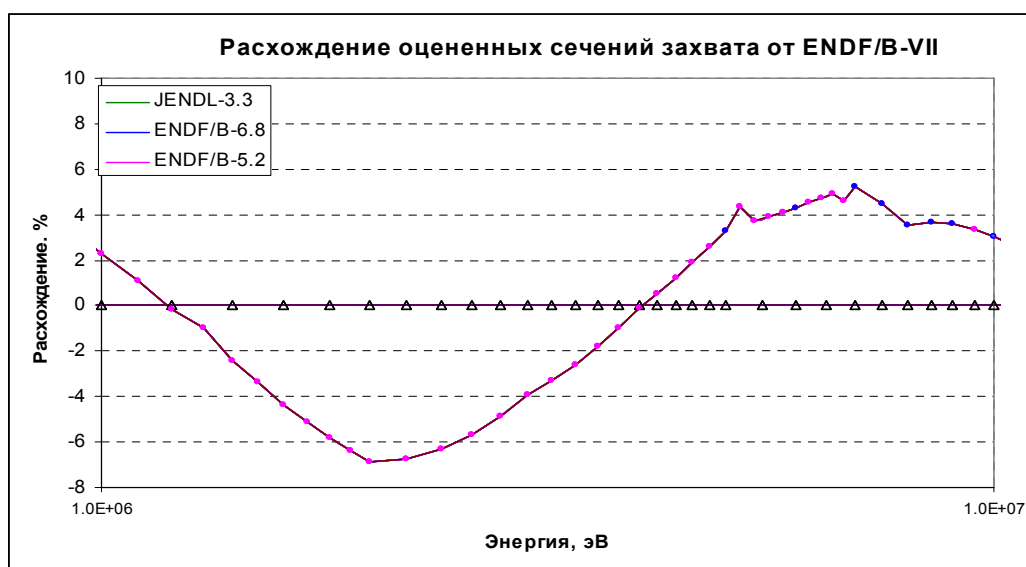


Рис. 3б. Отклонение оцененных сечений захвата от оценки Хэйла

3.3.2. Сравнение с экспериментальными данными.

Совокупность экспериментальных данных о сечении радиационного захвата была оценена Мухабхабом в цитированной выше работе; полученное им среднее значение 0.3326 ± 0.0007 барн сохранилось (включая погрешность) точно таким же, как и предыдущей его оценке¹⁴. Это вполне естественно, т.к. за 23 года, прошедших между этими оценками было опубликовано лишь 3 новых экспериментальных работы, из которых две привели к результатам совпадающим с оценкой Мухабхаба в пределах погрешностей ($\text{Albrild86: } \sigma_c^H = 0.3325 \pm 0.0040$ - среднее из измеренных сечений

¹⁴ Mughabghab S.F., Divadeenam M., Holden N.E. Neutron Cross Sections, Vol.1. Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross sections. Part A, Z=1 – 60. Academic Press. N-Y, 1981.

поглощения в водороде к сечениям поглощения в природном боре, в природной сере и в марганце, давших совпадающие результаты; Kudo80: $\sigma_c^H = 0.3315 \pm 0.0011$ из отношения сечений захвата в водороде и в марганце). Третий, несколько более низкий результат (Lolich80: $\sigma_c^H = 0.329 \pm 0.002$), был получен не прямым методом – из анализа полного сечения в области от 0.001 эВ до 225 эВ и, естественно, не мог повлиять на результат усреднения 34 остальных независимых измерений и на его погрешность. Следует заметить, что оценка Акстона¹⁵, выполненная независимо от Мухабхаба, привела к тому же результату: $\sigma_c^H = 0.3325 \pm 0.0007$ барна. Все эти оценки согласуются с последней оценкой Хэйла $\sigma_c^H = 0.3320$ барна в пределах погрешности. Причина понижения сечения захвата на 0.18% в описании оценки, данном в ENDF/B-VII, явно не указана. Можно полагать, что эта причина кроется в учете результатов дополнительной информации, почерпнутой из анализа экспериментов по фоторасщеплению дейтрона.

Сечение захвата быстрых нейтронов в области энергий ниже 20 МэВ измерялось всего тремя авторами. В работе Suzuki95 было измерено сечение захвата на водороде при 20 кэВ, 40 кэВ и 64 кэВ с использованием образцов разной толщины – 1, 2, 3 и 4 мм. Результаты сравнения с оценкой, принятой в РОСФОНДе, приведены на рис. 4.

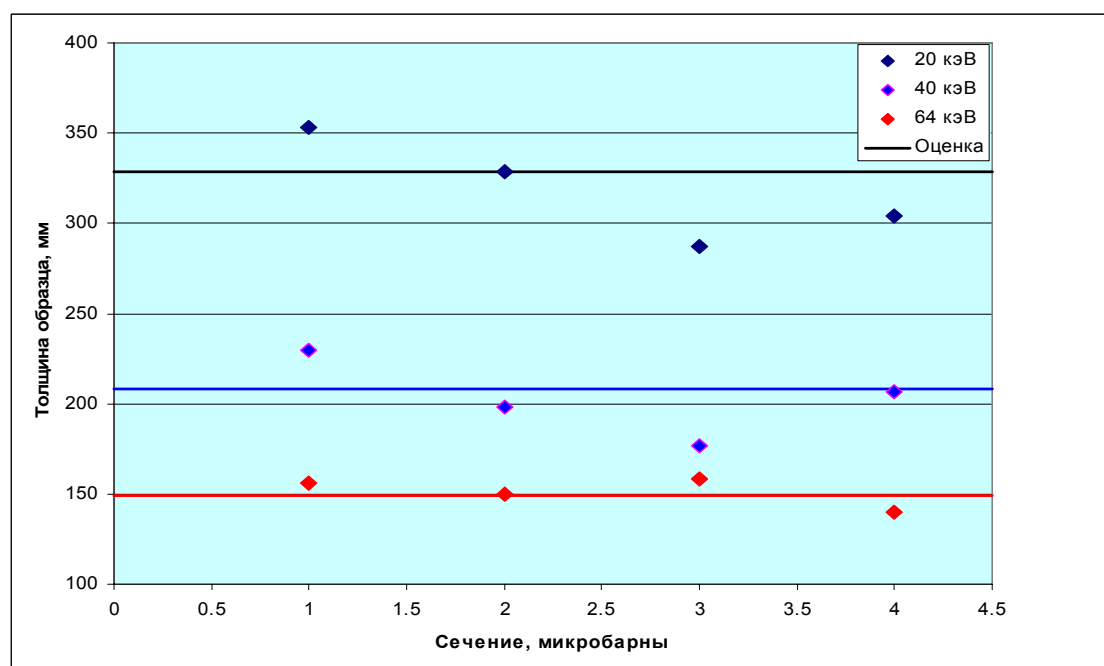


Рис. 4. Сравнение принятых сечений захвата с измеренными в работе Suzuki95

В работе Nagai97 было измерено сечение захвата в водороде нейтронов с энергией 550 кэВ (относительно сечений захвата золота и углерода). Полученное значение 35.2 ± 2.4 микробарна совпадает в пределах погрешности с результатом, следующим из принятой в РОСФОНД оценки: 34.6 микробарн.

В работе Cerineo61 было измерено сечение захвата в водороде нейтронов с энергией 14.4 МэВ (относительно сечения рассеяния на водороде же). Полученное

¹⁵ E.J.Axton, Ann. of Nucl. Energy, v.13, p.622 (1986)

значение 31.6 ± 3.1 микробарн также прекрасно согласуется с принятым оцененным значением (29.6 микробарн). $\left(\sigma(180^\circ) / \sigma(0^\circ) - 1 \right) * 100$

Таким образом, экспериментальных данных, противоречащих принятой оценке, не имеется.

4. Анизотропия упругого рассеяния (MF=4, MT=2))

4.1. Оцененные данные.

Во всех современных оценках данные представлены в виде энергетических зависимостей коэффициентов разложения $a_n(E)$ дифференциального сечения рассеяния по полиномам Лежандра,

$$\sigma_e(\mu, E) = \frac{\sigma_e(E)}{2\pi} \sum_{n=0}^{NL} \frac{2n+1}{2} a_n P_n(\mu)$$

Из условия нормировки $a_0=1$. Величина $a_1=\langle\mu\rangle$ - средний косинус угла рассеяния в системе центра инерции. В ENDF/B-VII, ENDF/B-VI, JEFF-3.1 NL=6. В JEFF-3.1 NL=4. В ENDF/B-V анизотропия рассеяния описывается заданием углового распределения при 11 (а выше 10 МэВ – при 12) значениях угла рассеяния в системе центра инерции.

На рис.5 показана энергетическая зависимость коэффициентов разложения в оценках ENDF/B-VI и ENDF/B-VII. Как видно, характер анизотропии в результате переоценки заметно изменился. То, как это сказалось на форме угловых распределений, показано на рис.6.

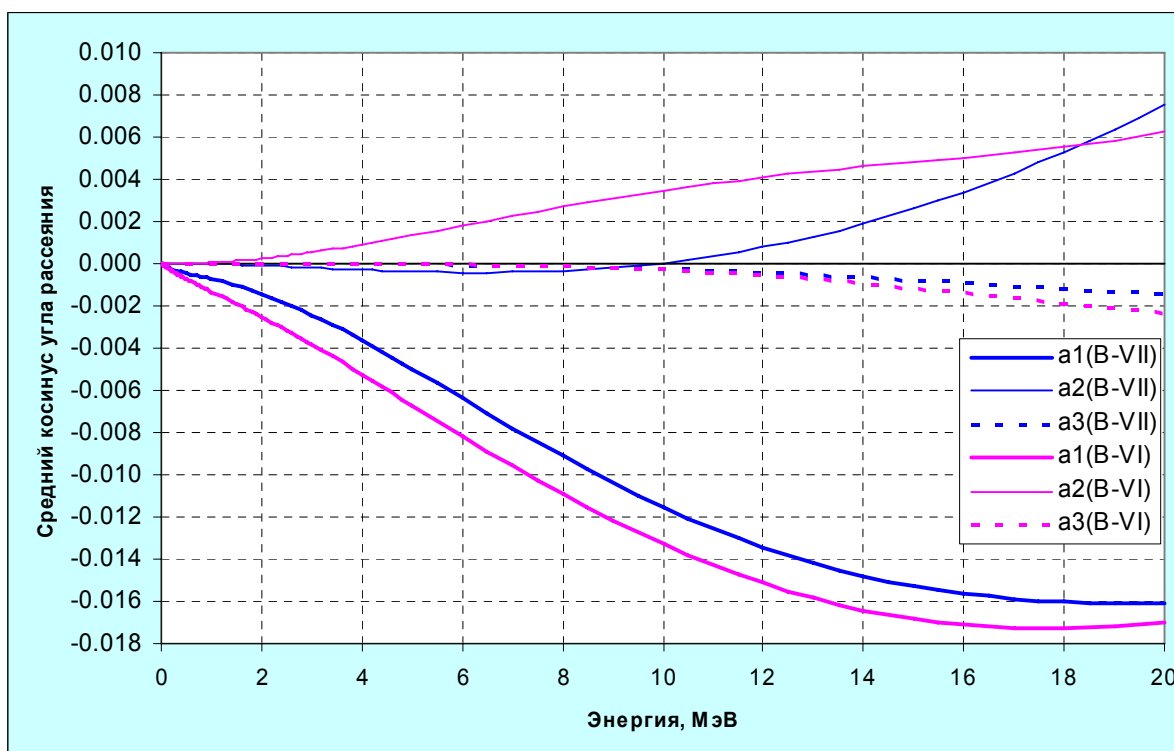


Рис.5. Энергетическая зависимость параметров анизотропии упругого рассеяния нейтронов на протонах по оценкам, принятым в ENDF/B-VI и в ENDF/B-VII.

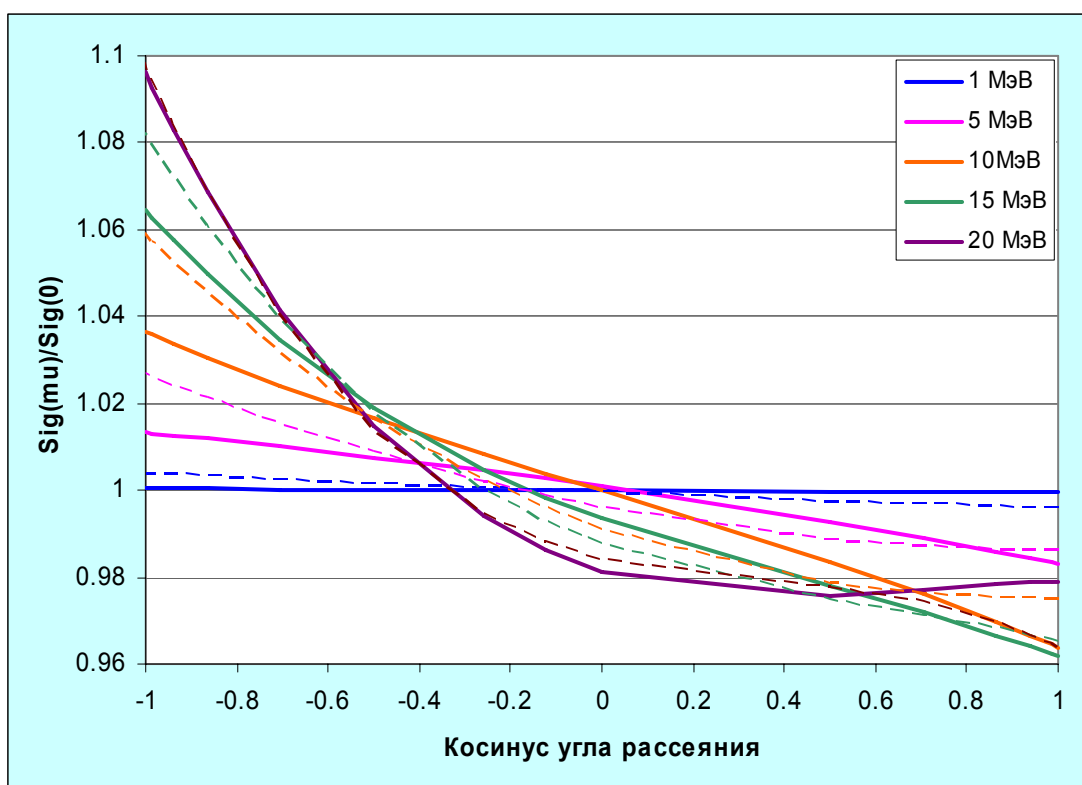


Рис.6. Угловые распределения (n,p)-рассеяния по оценкам ENDF/B-VII (жирные линии) и ENDF/B-VI (тонкие прерывистые линии)

Различие в оценке второго углового момента при переходе к новой оценке оказалось существенным, что проявилось в характере угловых распределений при 5, 10, 15 МэВ (см.рис 6). При 20 МэВ оценки формы углового распределения сближаются. При низких (2 МэВ и ниже) различие обусловлено, главным образом, различием в оценке среднего косинуса угла рассеяния. Анизотропия рассеяния при этих энергиях слаба и на перенос нейтронов этих энергий практически не сказывается.

4.2. Сравнение с экспериментальными данными.

В ранней работе Ода измерялось угловое распределение нейтронов с энергией 3.1 МэВ. На рис.7 полученные в этой работе данные сравниваются с результатами последних оценок. Погрешности результатов измерений велики и не позволяют отдать предпочтение какой-либо из оценок.

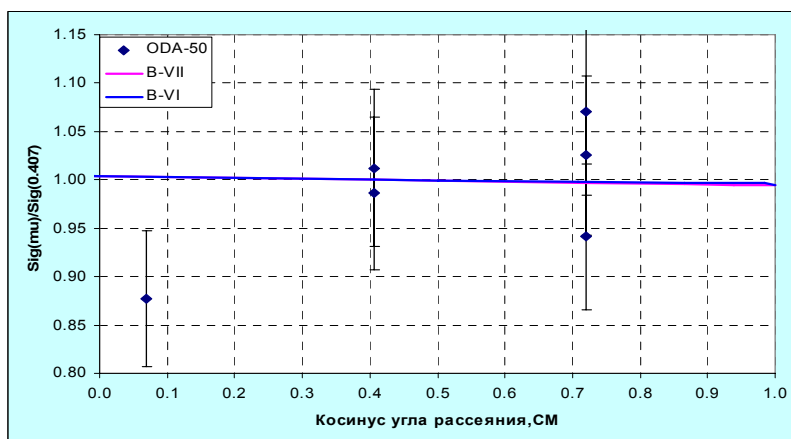


Рис.7. Угловое распределение нейтронов с энергией 3.1 МэВ

На рис. 8 приведена энергетическая зависимость отношения сечений рассеяния на угол 10° к сечению рассеяния на угол 45° (в системе центра инерции). Экспериментальные данные получены в работе Paulsen69, целью которой являлось выяснение наличия энергетических флуктуаций в сечении рассеяния. Вывод, сделанный авторами, состоит в том, что если такие флуктуации и существуют, они не связаны с флуктуациями рассеяния под малыми углами.

Жирной синей точкой показан результат усреднения данных, полученных при энергиях выше 3.2 МэВ, с погрешностью, оцененной в предположении о независимости погрешностей результатов отдельных измерений. Можно рассматривать этот результат как подтверждающий более сильную анизотропию рассеяния, следующую из новой оценки.

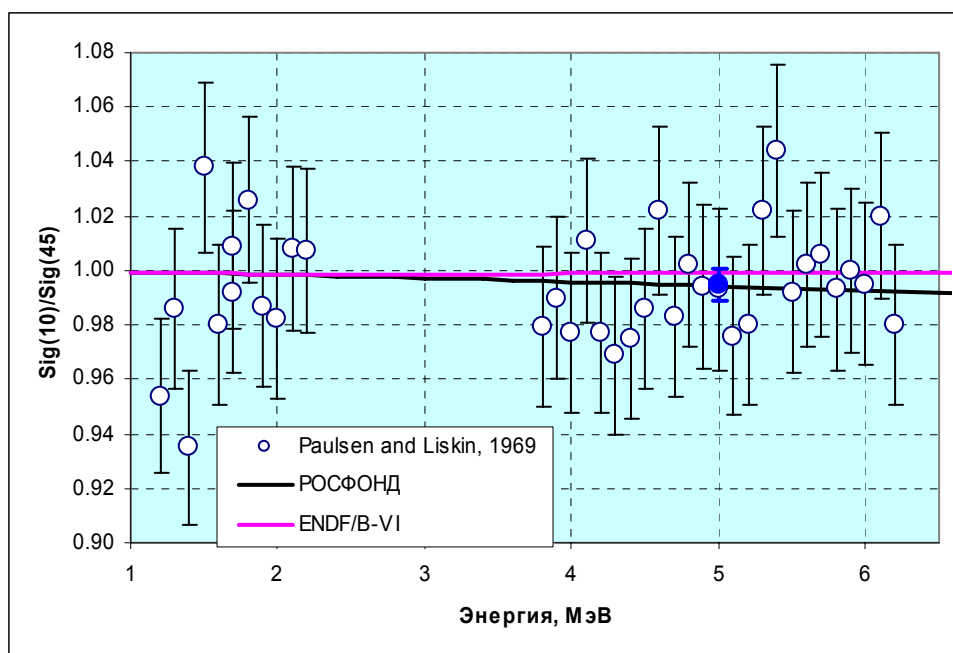


Рис.8. Сравнение экспериментальных отношений вероятностей рассеяния на угол 10° и на угол 45° с расчетными данными.

В работе Szibok69 при энергии нейтронов 2.46 МэВ было измерено отношение вероятности рассеяния под углом 0° к вероятности рассеяния под углом 15° в лабораторной системе координат (30° в системе центра инерции), которое было найдено равным 1.070 ± 0.024 . Этот результат существенно расходится с оцененной величиной измерявшегося отношения, варьирующегося в разных оценках от 0.9990 до 0.9995. Результат Szibok69 невозможно согласовать и с результатами, полученными в работе Paulsen69, которые были рассмотрены выше.

На рис. 9 оцененные угловые распределения сравниваются с недавними экспериментальными результатами Boukharouba -2002, полученными при энергии 10.4 МэВ. Оцененные данные при этой энергии в рассматриваемом диапазоне углов рассеяния неразличимы. Согласие между оценкой и экспериментом весьма удовлетворительно.

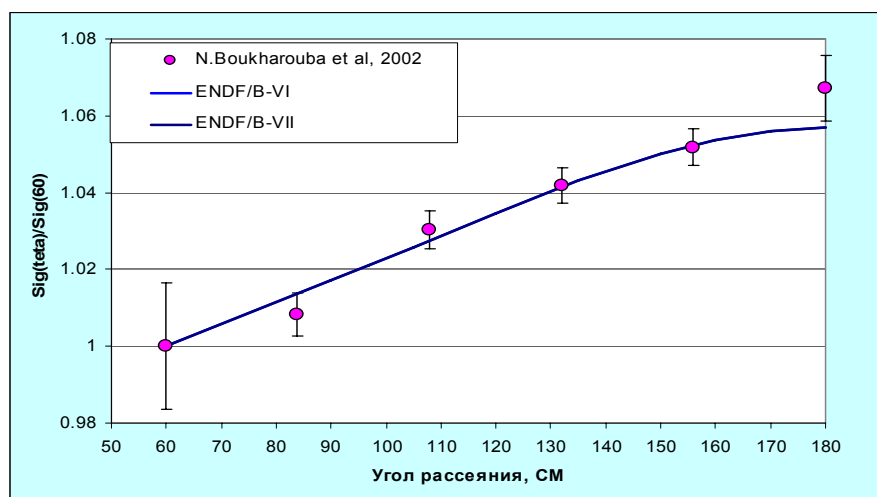


Рис.9. Угловое распределение нейтронов с энергией 10.4 МэВ.

На рис. 10 оцененное угловое распределение нейтронов с энергией 14.2 МэВ сравниваются с экспериментальными данными, полученными при этой энергии или очень близких к ней энергиях. Как видно, экспериментальные данные лучше согласуются с результатом новой оценки. Ясно, что из всей совокупности экспериментальных, имеющихся при этой энергии, следует более низкое отношение вероятности рассеяния назад, чем это следует из оценки ENDF/B-VI: примерно 1.07. Согласно новой оценке это отношение равно 1.065. Заметим, что, что предварительные результаты измерения рассматриваемого отношения Ривсом и Колковским¹⁶, привели к значению 1.053 ± 0.015 , еще более низкому, чем следует из новой оценки. Данные Ривса и Колковского не вошли в базу данных EXFOR-2002 и неизвестно, учитывались ли они Хэйлом при его последней оценке. Как бы то ни было, результат этой работы согласуется с новой оценкой в пределах погрешности.

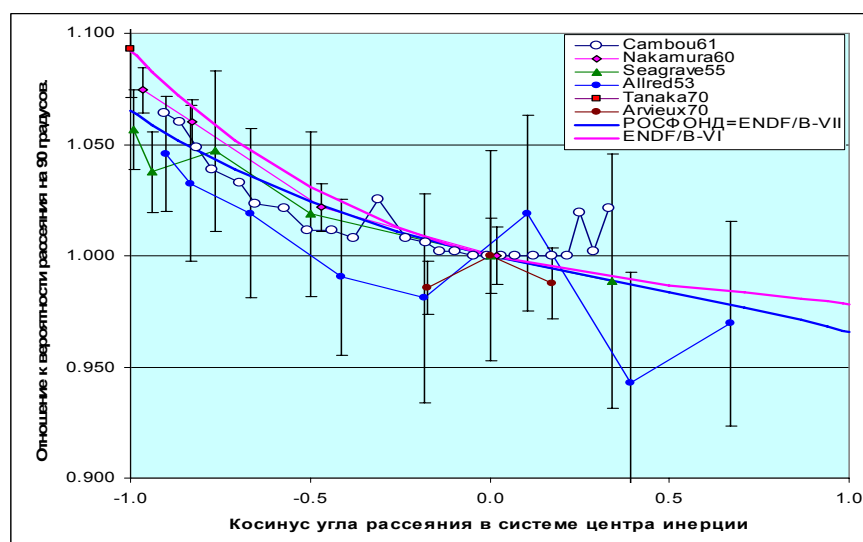


Рис. 7. Угловое распределение рассеянных нейтронов при 14.2 МэВ.

Таким образом, данные по угловым распределениям при низких энергиях не позволяют отдать предпочтение одной из оценок, тогда как результаты измерений при 14 МэВ, говорят в пользу последней оценки, принятой в РОСФОНД.

¹⁶ Ryves T.B. and Kolkowski P. "The Differential Cross Section for Neutron-Proton Scattering at 14.5 MeV". Preliminary draft, National Physical Laboratory, Middlesex, UK (March 1990)

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Единственной реакцией, в результате которой образуются фотоны при взаимодействии нейтронов с водородом является радиационный захват. Энергия этой реакции равна $Q=2.224566$ МэВ (см. п. 1.5). Энергия фотона при захвате теплового нейтрона (E_{phot}^0) чуть ниже этой энергии за счет отдачи дейтрона, испускающего фотон. Энергия отдачи равна

$$E_D = \frac{Q^2}{M_D m_n c^2},$$

где $M_D=1.996800$ – отношение массы дейтрона к массе нейтрона, $m_n c^2=939.5653$ МэВ – энергетический эквивалент массы покоя нейтрона. Расчеты дают $E_D=0.002638$ МэВ. Таким образом, на энергию фотона, испускаемого при захвате теплового нейтрона в водороде приходится $E_{\text{phot}}^0=Q-E_D=2.221928$ МэВ. При захвате нейтронов с большей энергией, энергия испускаемых фотонов меняется линейно с энергией нейтрона:

$$E_{\text{phot}}(E_n) = E_{\text{phot}}^0 + \frac{Aw}{(Aw+1)} E_n$$

Заметим, что в первых версиях библиотеки ENDF/B-VI энергия отдачи дейтрона не учитывалась. В версии ENDF/B-VI.8 она учтена с точностью до 10кэВ: энергия фотона принята равной 2.2233 МэВ. В ENDF/B-VII данные об испускании фотона радиационного захвата представлены в формате файла MF=6. Для представления данных о фотоне использован закон LAW=2 (реакция двух тел с фиксированными энергетическими состояниями продуктов реакции). Это позволило учесть слабую анизотропию испускания фотонов в системе центра инерции. Анизотропия учитывается в P_2 -приближении. При низких энергиях она пренебрежимо мала (средний косинус угла рассеяния равен $-6 \cdot 10^{-8}$). С ростом энергии анизотропия увеличивается и при энергии нейтрона выше 100 кэВ становится весьма существенной (см. рис.8). Зависимость энергии фотона от энергии нейтрона при использовании закона LAW=2 явно не задаётся, а рассчитывается.

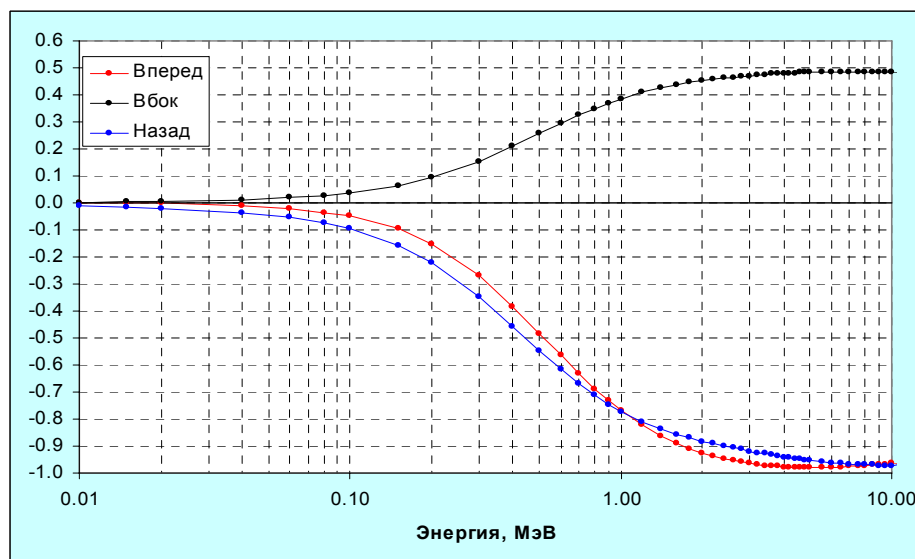


Рис.8. Анизотропия вылета фотонов радиационного захвата.

Приведены отношения плотности вероятности вылета в указанном направлении к средней плотности вероятности, равной единице.

6. Погрешности нейтронных сечений.

6.1. Погрешности сечения рассеяния.

Погрешности сечения рассеяния, оцененные на основе R-матричного анализа совокупности экспериментальных данных Хэйлом и Янгом оказались весьма низкими – одна десятая процента и ниже. В мае 1990 г. Standard Subcommittee of the US Cross Section and Evaluation Working Group пересмотрел эти оценки и принял более осторожные оценки, а именно такие, что по мнению экспертов 2/3 результатов новых измерений, если таковые будут выполнены, будут отличаться от принятой оценки менее чем на вновь принятую погрешность. Для водорода эта уточненная погрешность равна 0.2% во всей области энергии до 20 МэВ. О ковариационных свойствах этих погрешностей ничего сказано не было.

Как было отмечено выше, в текстовом описании оценки ENDF/B-VII указаны погрешности полного сечения, рекомендуемые автором оценки Хэйлом. Методика оценки этих погрешностей не сообщается.

Данные о ковариациях погрешностей n-р рассеяния приводятся в библиотеках оцененных данных ENDF/B-V, JENDL-3.3 и JEF-2. Эти данные различаются между собой весьма сильно (см. рис.9).

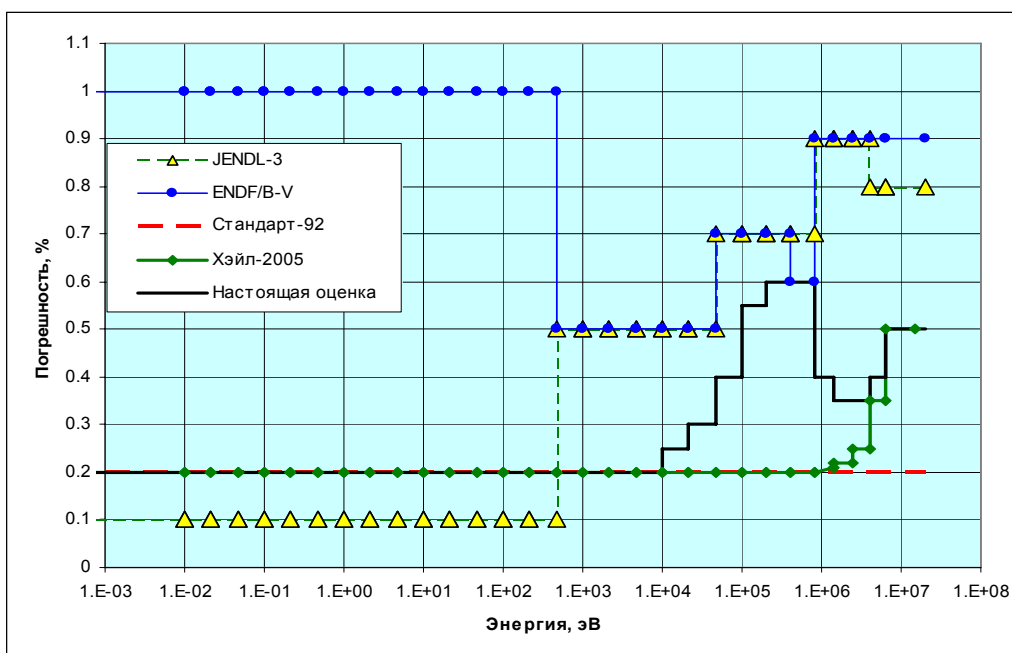


Рис.9. Сравнение оценок погрешностей сечения рассеяния.

Данные представлены после их перевода в 30-групповое представление. Символы проставлены на границах групп. Данные, обозначенные «Настоящая оценка», описываются ниже.

В области энергий ниже 500 кэВ разброс мнений экспертов чрезвычайно велик.

В таблице 1 для каждого энергетического диапазона, соответствующего одной из частей рис. 2, приводится перечень экспериментов, в которых измерялось полное сечение, указано число точек N_k по энергии, в которых проводились измерения и

усредненные по всем этим точкам отклонения Δ_k результатов эксперимента k от оцененных данных:

$$\Delta_k = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} \Delta_{k,i} = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} [\sigma_{\text{tot}}^{\text{exp},k}(E_i) - \sigma_{\text{tot}}^{\text{eval}}(E_i)].$$

В случаях, когда измерения выполнялись методом времени пролета в большом числе точек по энергии, результаты измерений усреднялись по интервалам, в пределах которых оцененное сечение меняется практически линейно, и результат усреднения сравнивался с оцененным сечением при средней энергии. Для этих случаев в качестве N фигурировало число интервалов усреднения.

Кроме среднего расхождения в таблице для каждого эксперимента приводятся погрешности среднего расхождения, оцененные, как правило, по средне-квадратичному разбросу расхождений:

$$\delta_k = \sqrt{\frac{1}{N_k * (N_k - 1)} \sum_{n=1}^{N_k} (\Delta_{k,i} - \Delta_k)^2}$$

Исключением являлись эксперименты, в которых сечение измерялось при одной энергии. В этих случаях в качестве погрешности использовалось значение, указанное экспериментаторами.

Далее для каждого энергетического диапазона вычислялось среднее расхождение между экспериментальными и оцененными данными

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_k \Delta_k / \delta_k^2}{\sum_k 1 / \delta_k^2}$$

и его погрешность:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_k (\Delta_k - \bar{\Delta})^2 / \delta_k^2}{\sum_k 1 / \delta_k^2}.$$

Расчеты были выполнены при сравнении с оценкой из ENDF/B-VI и с оценкой из ENDF/B-VII (принятой в РОСФОНД).

При низких энергиях среднее расхождение между экспериментальными и оцененными данными, и прежде весьма малое, ещё более сократилось. Даже с учетом погрешностей расхождения не противоречат достаточно оптимистичной оценке Хэйла (но всё же превышают предел погрешности, принятый в JENDL-3.1).

В диапазоне 0.01 – 1 МэВ среднее расхождения при использовании новой оценки существенно сократилось и также лежит в пределах оценки погрешности Хэйла. Однако разброс расхождений данных различных экспериментов почти не сократился и существенно превышает оцененную Хэйлом погрешность оцененных данных.

Использование новой оценки привело к сокращению среднего расчетно-экспериментального расхождения и в диапазоне 1 -10 МэВ. Это среднее расхождение

заметно ниже погрешности оценки Хэйлом, а разброс расхождений данных различных экспериментов близок к ожидаемому из оценки Хэйла.

В диапазоне 10 – 20 МэВ использование новой оценки привело к незначительному возрастанию среднего расхождения, но средне-квадратичный разброс расхождений данных различных экспериментов существенно сократился. Таким образом, и здесь анализ разброса расчетно-экспериментальных расхождений согласуется с оценкой погрешности оцененных данных Хэйлом.

Подводя итоги, отметим, что переход от прежней оценки к новой во всех диапазонах привел к сокращению среднего расхождения между оцененными и измеренными данными и, как правило, к сокращению средне-квадратичного отклонения расхождений.

Таблица1. Отклонения экспериментальных данных от прежней и новой оценки

Область энергий от 100 эВ до 10 кэВ							
Эксперимент	Диапазон энергий, эВ		Число экспериментальных точек ^а	Среднее отклонение от оцененных данных		Погрешность среднего отклонения	
	от	до		ENDF/B-VI	ENDF/B-VII	ENDF/B-VI	ENDF/B-VII
Melkonian49	100	1000	много	-1.44	-1.59	0.52	0.72
T.L.Houk71	5	700	14	0.02	0.15	0.17	0.17
Dilg75	132	132	1	0.12	0.00	0.12	0.1
Kirilyuk87	2000	2000	1	0.29	-0.04	0.10	0.1
Koester90	1970	1970	1	-0.01	-0.12	0.15	0.15
Среднее отклонение по всем экспериментальным работам				0.13	-0.03	0.14	0.15
Область энергий от 10 кэВ до 1 МэВ							
Эксперимент	Диапазон энергий, кэВ		Число экспериментальных точек	Среднее отклонение от оцененных данных		Погрешность среднего отклонения	
	от	до		ENDF/B-VI	ENDF/B-VII	ENDF/B-VI	ENDF/B-VII
Frisch46	35	490	4	3.38	3.04	1.61	1.62
Bailey46	350	1000	5	0.51	0.34	0.30	0.29
Cierjacks69	700	1000	много	-1.34	-1.07	0.14	0.14
Clement72	500	100	много	0.57	0.39	0.31	0.29
Fujita76	24	24	1	0.04	-0.26	0.13	0.13
Poenitz82	500	1000	2	-0.45	-0.19	0.20	0.2
Priesmeyer85	24	24	1	-0.04	0.45	0.13	0.13
Koester90	143	143	1	0.44	0.14	0.27	0.27
Среднее отклонение по всем экспериментальным работам				-0.31	-0.08	0.70	0.64
Область энергий от 1 МэВ до 10 МэВ							
Эксперимент	Диапазон энергий, эВ		Число экспериментальных точек	Среднее отклонение от оцененных данных		Погрешность среднего отклонения	
	от	до		ENDF/B-VI	ENDF/B-VII	ENDF/B-VI	ENDF/B-VII
Bailey46	1	6	11	1.08	1.08	1.16	1.16
Cierjacks69	1	10	много	-1.34	-1.01	0.33	0.26
Schwartz69	1.4	10	много	0.43	0.2	0.31	0.28
Langsford70	1	10	много	0.10	-0.22	0.43	0.36
Davis71	1.5	10	много	0.25	0.18	0.2	0.12
Foster71	2.3	10	много	0.00	0.01	0.60	0.47
Clement72	1	10	много	0.78	0.39	0.16	0.16
Larson80	4	10	много	0.25	-0.04	0.13	0.12
Phillips80	1	10	много	0.63	0.51	1.87	1.28
Poenitz82	1	2	2	-0.3	-0.05	0.2	0.3
Среднее отклонение по всем экспериментальным работам				0.17	0.05	0.55	0.33
Область энергий от 10 МэВ до 20 МэВ							

^а Слово «много» в этой графе означает, что данные, полученные методом времени пролета в большом числе каналов, были усреднены по интервалам, в пределах которых оцененное сечение меняется практически линейно, и сравнены со значением оцененного сечения при средней энергии интервала.

Эксперимент	Диапазон энергий, эВ		Число экспериментальных точек	Среднее отклонение от оцененных данных		Погрешность среднего отклонения	
	от	до		ENDF/B-VI	ENDF/B-VII	ENDF/B-VI	ENDF/B-VII
Cierjacks69	10	20	много	-0.76	-0.54	0.30	0.25
Schwartz69	10	16	много	-1.29	-0.96	0.69	0.71
Langsford70	10	20	много	-1.54	-1.54	0.96	0.94
Davis71	10	20	много	0.51	0.33	0.50	0.41
Clement72	10	18	много	1.55	1.32	0.77	0.81
Larson80	10	20	много	-0.26	-0.54	0.69	0.62
Phillips80	10	16	много	0.3	-1.41	0.5	1.29
Ryves87	14.7	14.7	1	0.54	-0.31	1.38	1.38
Среднее отклонение по всем экспериментальным работам				-0.27	-0.35	0.61	0.35

Исходя из принципа, что в пределах погрешности должно лежать 2/3 результатов измерений последних лет, можно принять, что погрешность сечения n-р рассеяния области энергий ниже 10 кэВ не превышает 0.2%, что согласуется с оценкой этой погрешности Хэйлом. Эта оценка не противоречит и различиям между результатами оценок полного сечения водорода, принятыми в различных библиотеках: как видно из рис.1в, полные сечения, принятые в ENDF/B-VI.8, отличаются от новой оценки максимум на $\pm 0.25\%$; разброс различий в оценке полного сечения в JENDL-3.1 от новой оценки Хэйла больше – от +0.25% до -0.49%, но и в этом случае среднее расхождение менее 0.2%.

В диапазоне от 10 кэВ до 1 МэВ разброс результатов непосредственных измерений полного сечения значительно больше, что нашло отражение и в разбросе результатов оценок (полученных, заметим, с учетом всех других источников информации) – см. рис.1б и 1в. Правда, наиболее сильно оцененные данные разбросаны лишь в половине этого диапазона – от 100 до 400 кэВ, где расхождения достигают 0.6 и даже 0.8%. Это и естественно, поскольку полное сечение в этом поддиапазоне измерялось при отдельных дискретных энергиях. В интервале 0.4 – 1 МэВ, где имеются результаты детальных измерений полного сечения методом времени пролета (Sierjacks-69, Clement-72), различия между оценками резко сокращаются и снова возрастает лишь в при более высоких энергиях (рис.1а), где число экспериментов, выполненных методом пролета, возросло в несколько раз. Исходя из результатов проведенного анализа можно полагать, что в области от 0.1 до 0.4 МэВ, погрешность оцененных данных следует увеличить до 0.6%, что близко к оценкам погрешностей, принятым в JENDL-3.3. и ENDF/B-V. Оценка погрешности Хэйлом в этом энергетическом диапазоне, основана, очевидно, на интерполяции оценок погрешностей при более низких и более высоких энергиях.

Как видно из проведенного анализа расхождений между результатами непосредственных измерений полного сечения и результатов его оценок, оценка погрешностей Хэйлом в мегаэлектронвольтовой области удовлетворительно согласуется с оценкой, учитывающей результаты только прямых измерений, и вполне может быть принятой.

До 1 кэВ погрешности следует считать строго скоррелированными. При более высоких энергиях корреляции погрешностей точек, различающихся по энергии более, чем на порядок, можно считать практически независимыми.

6.2 Погрешность сечения захвата

Погрешность сечения захвата тепловых нейтронов оценена Мухабхабом³ в 70 микробарн, что составляет 0.2%. Почти таково же различие в сечениях захвата, принятых в ENDF/B-VI и ENDF/B-VII. В используемых ныне библиотеках оцененных данных этому сечению приписывается значительно большая погрешность: 0.5 - 0.6%. Из рис. 4 видно, что это значение погрешности может быть распространено на всю область энергий ниже 10 кэВ, где сечение захвата весьма строго подчиняется закону $1/v$. При более высоких энергиях сечение захвата весьма мало. В библиотеках оцененных данных JENDL-3.3 и ENDF/B-V погрешность сечения захвата в этой области постепенно возрастает достигая при 10 МэВ 2 – 5%. Заметим, что прямые экспериментальные данные, как видно из рис. 5, имеют погрешность порядка 10%. Однако, учитывая, что оценка сечения захвата проводилась с учетом данных по фоторасщеплению дейтронов, можно надеяться, что 5%-я погрешность при 10 МэВ является реалистичной. Однако автор принятой в РОСФОНД оценки – Хэйл – к настоящему времени не опубликовал оценки погрешности сечения захвата нейтронов на водороде. В этих условиях представляется целесообразным принять более осторожную оценку, следующую из погрешностей экспериментальных данных.

7. Валидация нейтронных данных по интегральным экспериментам.

Экспериментами, наиболее чувствительными к сечению рассеяния на водороде являются критические параметры высококонцентрированных водных растворов высокообогащенного урана (порядка килограмма урана на литр раствора). Неточность знания сечения рассеяния водорода приводит¹⁷ к дополнительной погрешности в коэффициенте размножения подобных растворов 0.3% при использовании ковариационной матрицы погрешностей, основанной на описанной выше оценке и приведенной в Приложении, 0.4% при использовании ковариационной матрицы погрешностей, оцененной по данным JENDL-3.3, и 0.6% при использовании наиболее пессимистической оценки ENDF/B-V. Таким образом, предлагаемая здесь оценка погрешностей является наиболее оптимистичной (за счет снижения погрешностей в области быстрых нейтронов, ответственной за утечку нейтронов из размножающей системы). Погрешности экспериментального определения критических параметров водных растворов высокообогащенного урана, собранных в международном справочнике¹⁸ обычно близки к 0.5%, но порой достигают и 0.2%. Поскольку погрешность расчета критичности определяется не только (и не столько) погрешностями сечений водорода, сколько погрешностями сечений урана-235 (дающими в погрешность коэффициента размножения высококонцентрированных растворов по крайней мере вдвое больший вклад, чем погрешности сечений водорода), ясно, что уточнить сечения водорода путем учета данных интегральных экспериментов такого рода практически невозможно. С другой стороны, ясно, что при использовании этих экспериментов для уточнения сечений урана-235 учет погрешностей водорода, необходим: вносимые им вклады в погрешности коэффициентов размножения сравнимы или даже превосходят погрешности самих критических экспериментов.

¹⁷ При расчетах использовались коэффициенты чувствительности коэффициентов размножения к полному сечению водорода из диссертации Т.Е.Ивановой «Оценка погрешностей расчетного предсказания размножающих систем с высокообогащенным ураном», ФЭИ, 2005 г.

¹⁸ International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NDC/DOC(95). Sept. 2004 Ed.

8. Перечень цитированных экспериментальных работ

8.1. Полное сечение

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
				от	до	
Schwartz69	R.B.Schwartz,	J,PL/B,30,36	10005	1.4+06	1.5+07	1652
Foster71	D.G.Foster Jr,	J,PR/C,3,576	10047	2.3+06	1.5+07	238
Davis71	J.C.Davis,	J,PR/C,3,1798	10099	1.5+06	2.8+07	27
Houk71	T.L.Houk	J,PR/C,3,1886	10139	2.8-01	7.1+02	64
Clement72	J.M.Clement,	J,NP/A,183,51	10173	5.0+05	2.5+07	425
Phillips80	T.W.Phillips,	J,PR/C,22,384	10945	1.1+06	1.9+07	57
Bailey46	C.L.Bailey,	J,PR,70,583	11140	3.5+05	6.0+06	15
Frich46	D.H.Frisch	J,PR,70,589	11141	3.5+04	4.9+05	4
Melkonian49	E.Melkonian	J,PR,76,1750	11150	3.3-03	1.8+03	62
Lagsford70	A.Lagsford,	C,70ANL,51	21497	8.4+05	2.0+07	17
Poenitz82	W.P.Poenitz,	J,NP/A,383,224	12715	5.1+05	2.0+06	3
Larson82	D.C.Larson,	C,80BNL,277	12882	4.0+06	5.0+07	412
Cierjacks69	S.Cierjacks,	J,PRL,23,866	20015	7.0+05	3.2+07	1066
Dilg75	W.Dilg	J,PR/C,11,103	20597	1.3+02	1.3+02	4
Fulita76	Y.Fujita,	J,NP/A,258,(1)	20700	2.4+04	2.4+04	1
Priesmeier85	H.G.Priesmeyer,	C,85SANTA,2,1463	22021	2.4+04	2.4+04	1
Koester90	L.Koester,	J,ZP/A,337,341	22217	2.0+03	1.4+05	2
Dritsa67	M.Dritsa,	R,EANDC(OR)-63L	22613	1.0-02	1.5+01	243
Kirilyuk87	A.L.Kirilyuk,	C,87KIEV,2,298	40980	2.0+03	1.5+05	2
Ryves87						

8.2. Сечение радиационного захвата

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
				от	до	
Suzuki95	T.S.Suzuki,	J,AJ,439,(L),59	22310	2.0+04	6.4+04	3
Arbildo86	A.Arbildo,	J,ANE,13,679,8612	12819	2.53-02		1
Nagai97	Y.Nagai,	J,PR/C,56,(6),3173,199712	22417	2.53-02		1
Kudo80	K.Kudo	P,NEANDC(J)-83/U,5,8209	21866	2.53-02		1
Lolich80	J.V.Lolich,	J,AKE,35,(1),23,80	30551	2.53-02		1
Cerineo61	M.Cerineo,	J,PR,124,(6),1947	30005	1.4+07	1.4+07	1

8.3. Анизотропия упругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
				от	до	
Paulsen69	A.Paulsen,	J,PL/B,29,562,6908	20389	1.2+6	6.2+6	36
Szibok69	T.Czibok,	J,PL/B,29,105,6904	30327	2.46+6		1
Cambou61	F.Cambou	R,CEA-2002,6102	21223	1.46+7		1
Nakamura60	T.Nakamura	J,JPJ,15,1359,6008	20287	1.41+7		1
Seagrave55	J.D.Seagrave	J,PR,97,757,5502	11084	1.41+7		1
Allerd53	J.C.Allerd,	J,PR,91,90,5307	11066	1.41+7		1
Tanaka70	M.Tanaka,	J,JPJ,28,11,7001	20296	1.41+7		1
Arvieux70	J.Arvieux,	J,PL/B,32,468,7008	21852	1.4+7		1
Ryves90	T.B.Rives,	J,ANE,17,(12),657,90	22225	1.45+7		1

9. Заключение

9.1. Выводы.

В библиотеку РОСФОНД включается файл оцененных нейтронных данных из библиотеки ENDF/B-VII со следующими изменениями:

1. Файлу присвоен номер MAT=101.
2. Энергия реакции радиационного захвата принята равной $Q=2.224566$ МэВ (в ENDF/B-VII указано $Q=2.224631$ МэВ).
3. Значение AWR для дейтона в файле MF=6 принято равным 1.996800 (в ENDF/B-VII указано 1.996256).

9.2. Тепловые и интегральные сечения

Реакция	$\sigma(0.0253 \text{ эВ})$	RI	$\langle\sigma\rangle$ спектр Максвелла с $T=1.35$ МэВ
Упругое рассеяние	20.4363 б	239.45 б	3.9882 б
Рад. захват	332.013 мб	148.88 мб	0.0396 мб

9.3 Авторы проведенного отбора оцененных данных

М.Н.Николаев, В.Н.Кошечев

ПРИЛОЖЕНИЕ:
Ковариационные матрицы погрешностей нейтронных данных для водорода
(30-групповое представление)

1. Погрешности полного сечения и коэффициенты корреляции между ними

Gr.	Погр., %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18-30
1	0.5	100	90	80	50	20													
2	0.4	90	100	95	80	50	20												
3	0.35	80	95	100	90	80	50	30											
4	0.35	50	80	90	100	80	70	40	20										
5	0.40	20	50	80	80	100	60	40	20	10	10								
6	0.60		20	50	70	60	100	60	40	20	10	10							
7	0.60			30	40	40	60	100	60	40	20	10	10						
8	0.55				20	20	40	60	100	80	50	40	30	20	10				
9	0.40					10	20	40	80	100	95	80	50	30	20	15	10	10	10
10	0.30					10	10	20	50	95	100	95	80	50	30	20	15	15	15
11	0.25						10	10	40	80	95	100	95	80	50	30	20	20	20
12	0.20							10	30	50	80	95	100	95	80	50	30	30	30
13	0.20								20	30	50	80	95	100	95	80	50	40	40
14	0.20								10	20	30	50	80	95	100	95	80	70	70
15	0.20									15	20	30	50	80	95	100	95	90	90
16	0.20									10	15	20	30	50	80	95	100	100	95
17	0.20									10	15	20	30	40	70	90	100	100	100
18-30	0.20									10	15	20	30	40	70	90	95	100	100

2. Погрешности сечения радиационного захвата и коэффициенты корреляции между ними

	,%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12-30
1	10.0	1.00	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00
2	8.0	0.80	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.20	0.00	0.00	0.00
3	7.0	0.70	0.90	1.00	0.90	0.80	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.00	0.00
4	5.0	0.60	0.80	0.90	1.00	0.90	0.80	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.10
5	4.0	0.50	0.70	0.80	0.90	1.00	0.95	0.90	0.80	0.70	0.50	0.40	0.30
6	3.0	0.40	0.60	0.50	0.80	0.95	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.60	0.60
7	2.5	0.30	0.50	0.40	0.50	0.90	0.95	1.00	0.97	0.93	0.90	0.80	0.80
8	2.0	0.20	0.40	0.30	0.40	0.80	0.90	0.97	1.00	0.98	0.95	0.93	0.90
9	1.0	0.10	0.20	0.20	0.30	0.70	0.85	0.93	0.98	1.00	0.98	0.95	0.90
10	0.6	0.00	0.00	0.10	0.20	0.50	0.80	0.90	0.95	0.98	1.00	0.99	0.95
11	0.5	0.00	0.00	0.00	0.10	0.40	0.60	0.80	0.93	0.95	0.99	1.00	1.00
12-30	0.5	0.00	0.00	0.00	0.10	0.30	0.60	0.80	0.90	0.90	0.95	1.00	1.00

1.2. Дейтерий

1. Общие характеристики

$Z=1$

$A=2.01410177785 \pm 0.00000000036$

$A_w=1.9967996769 \pm 0.0000000012$

Содержание в естественной смеси: 0.015 ат%;
0.030 вес%

Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$, МэВ	Ядро-продукт ^{*)}
16	(n,2n)	-2.224566±0.000015	3.336317	H
102	(n,γ)	6.257232±0.000015	-	T

Схема уровней: возбужденные состояния невозможны.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^{\pi}=1^{+}$;

2.2. Радиус рассеяния: $R=0.519770 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область неразрешенных резонансов отсутствует.

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

При отборе оцененных нейтронных данных для библиотеки РОСФОНД рассматривались следующие оценки, используемые в современных библиотеках оцененных данных:

- оценка Стюарта и Хорсли 1968 г.¹⁹, включенная в библиотеки ENDF/B-V и JEF-3;
- оценка Николаева, Базазянц и др. 1980 г.²⁰, включенная в библиотеку БРОНД;
- компиляция Зуанга Йоксянга²¹, принятая в библиотеке CENDL, практически совпадающая по полному сечению с данными из ENDF/B-V, но отличающаяся сечением реакции (n,2n), которое принято в соответствии с рекомендациями Данджю²²;

¹⁹ Stewart L. and Horsley A. LA-3271 (1968);

²⁰ Николаев М.Н., Базазянц Н.О., Забродская А.С., Кошечев В.Н., Ларина А.Ф. Нейтронные данные для дейтерия. Обзорная информация. Обнинск, ФЭИ. 1980.

²¹ Zhou Enchen "Chinese Evaluated Nuclear Data Library, Version-1" P. 38, 1980

²² Cai Dunjiu et al. CNDP, 4. 1990

- оценка Чедвика, Янга и Хэйла 1997 г.²³, принятая в библиотеках ENDF/B-VI.7, ENDF/B-VII и ФОНД-2.2;
- оценка Шибата, Нарита и Игараси²⁴, принятая в библиотеке JENDL-3.3.

3.1. Полное сечение (MT=1).

На рис. 1. сравниваются экспериментальные и оцененные данные для области энергии выше 6 МэВ. На рис. 2 оцененные данные в этой области сравниваются с оценкой Чедвика, Янга и Хэйла, принятой за основу. Заметим, что в библиотеках JEF-2, JEFF и CENDL принята оценка ENDF/B-V.

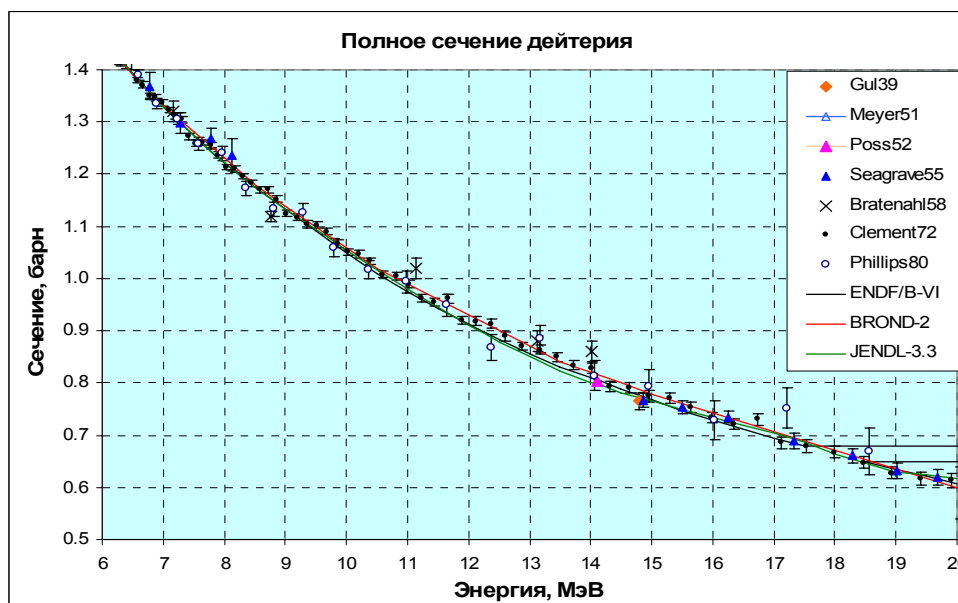


Рис. 1. Экспериментальные и оцененные данные в области первой группы.

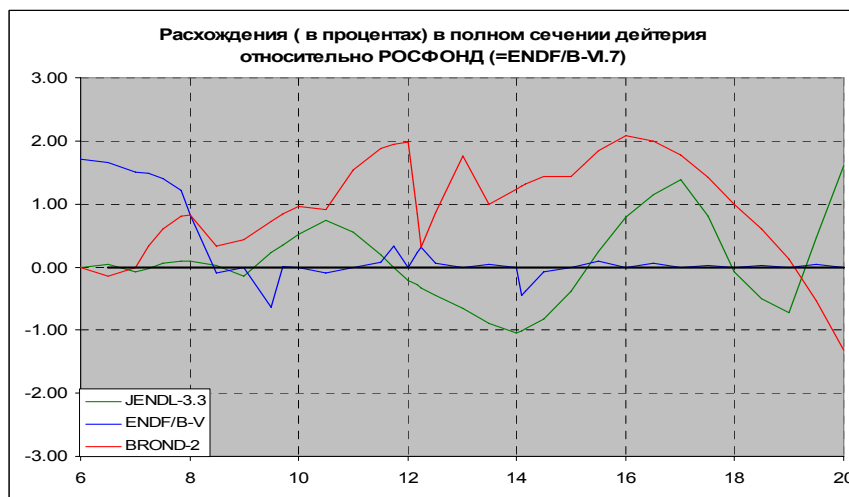


Рис.2. Расхождения в оцененных данных по полному сечению

Все оценки в равной мере согласуются с экспериментальными данными. Основной набор экспериментальных данных получен в работе Дж.М.Клемента и др. (Clement72) методом времени пролета. Более поздние данные Филиппса и др. (Phillips80)

²³ Chadwick M.B., Young P.G, and Hale G.M. "Evaluation of $n+^2\text{H}$ Cross Section", Group T-2 Progress Report for the Accelerator Production of Tritium Programm. Jan.-Feb. 1997.

²⁴ K.Shibata et al.JAERI-M 83-006 (1983)

согласуются с данными Клемента и др. в пределах погрешностей (заметно больших, чем у Клемента и др.).

В целом, погрешность полного сечения в области выше 6 МэВ едва ли превышает 1%.

На рис. 3. сравниваются экспериментальные и оцененные данные в интервале от 2.5 МэВ до 6.5 МэВ. На рис. 4 оцененные данные в этом энергетическом интервале сравниваются с оценкой Чедвика, Янга и Хэйла, принятой за основу. Данные JENDL-3 на Рис.3. не изображены т.к. они практически совпадают с оценкой БРОНД-2 (См. Рис.4).

Результаты, полученные Клементом и др. и в этой области являются определяющими. Данные Филиппса и др. подтверждают их, равно, как и совокупность остальных экспериментальных данных.

Сечение, принятое в ENDF/B-V (и в JEF-2, и в CENDL) при энергиях 3.5 – 6.5 МэВ неоправданно завышено. БРОНД и ENDF/B согласуются друг с другом в пределах 1 %.

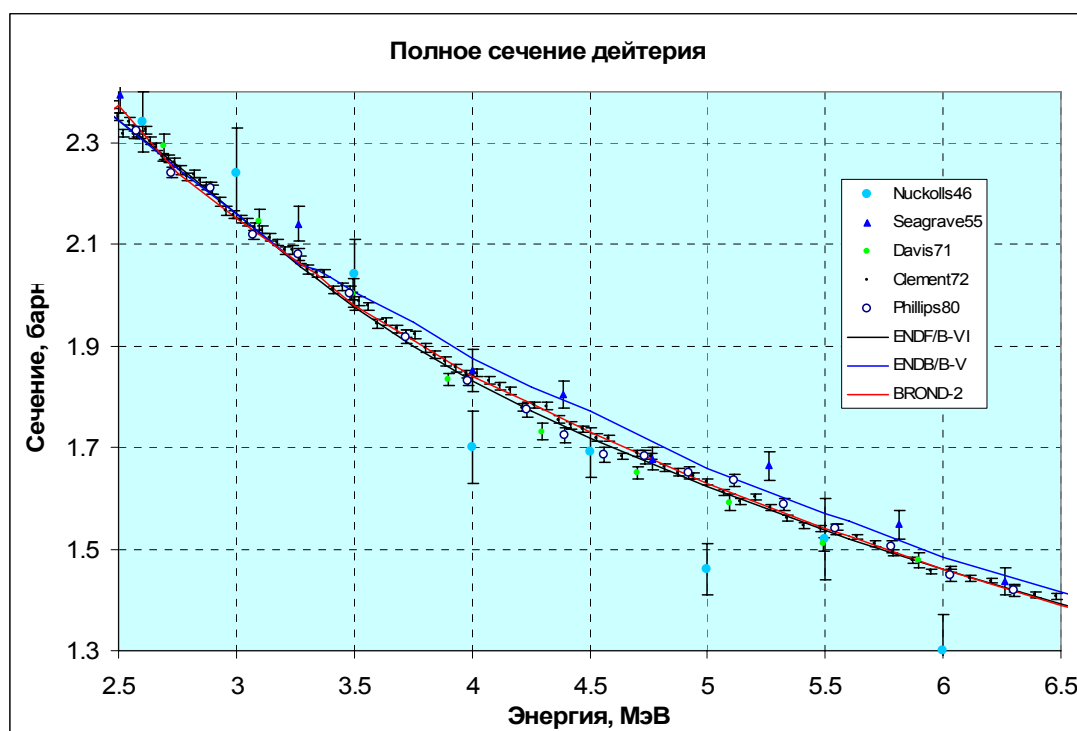


Рис. 3. Экспериментальные и оцененные данные в области 2-й и 3-й групп.

Примем, что погрешности сечений при 20 МэВ, 10 МэВ и 6.5 МэВ составляют 1%, а при 4 МэВ и 2.5 МэВ – 0.7% и что эти погрешности независимы, т.е. не коррелируют между собой (поскольку систематические погрешности, согласно описаниям, существенно ниже приведенных статистических погрешностей). В этом случае погрешности сечений, усредненных по интервалам между первыми тремя энергиями составят 1.4%; по интервалу от 4 до 6.5 МэВ – 1.2%, по интервалу 2.5 – 4 МэВ - 1%.

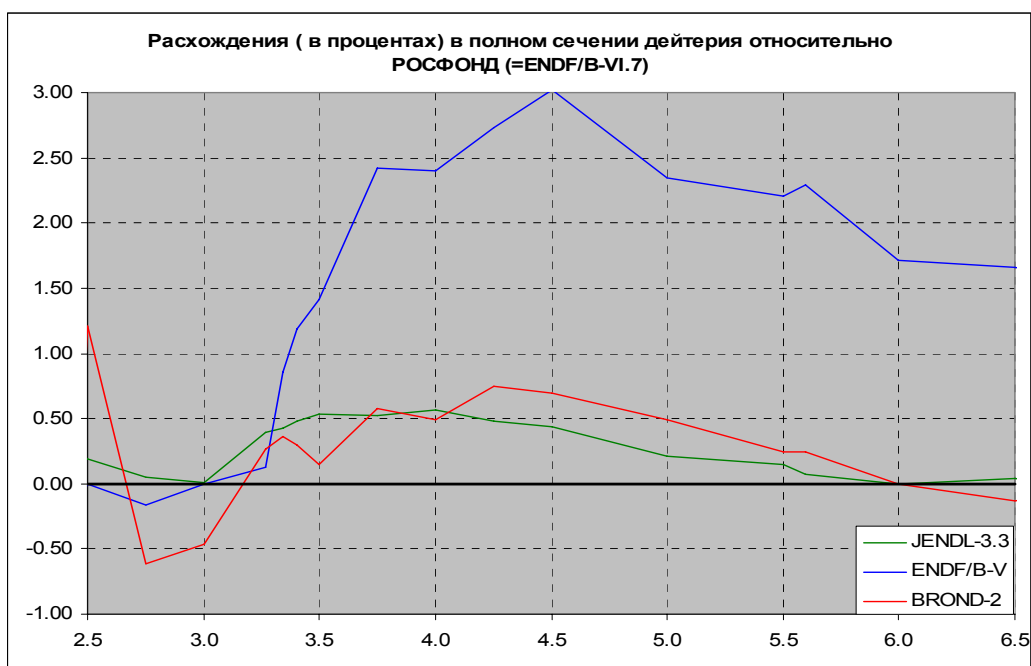


Рис.4. Расхождения в оцененных данных по полному сечению

На рис. 5. сравниваются экспериментальные и оцененные данные в интервале от 0.8 МэВ до 2.5 МэВ. На рис. 6 оцененные данные в этом энергетическом интервале сравниваются с оценкой Чедвика, Янга и Хэйла, принятой за основу. Данные ENDF/B-V на Рис.5. не изображены т.к. они практически совпадают с оценкой ENDF/B-VI.7 (См. Рис.6).

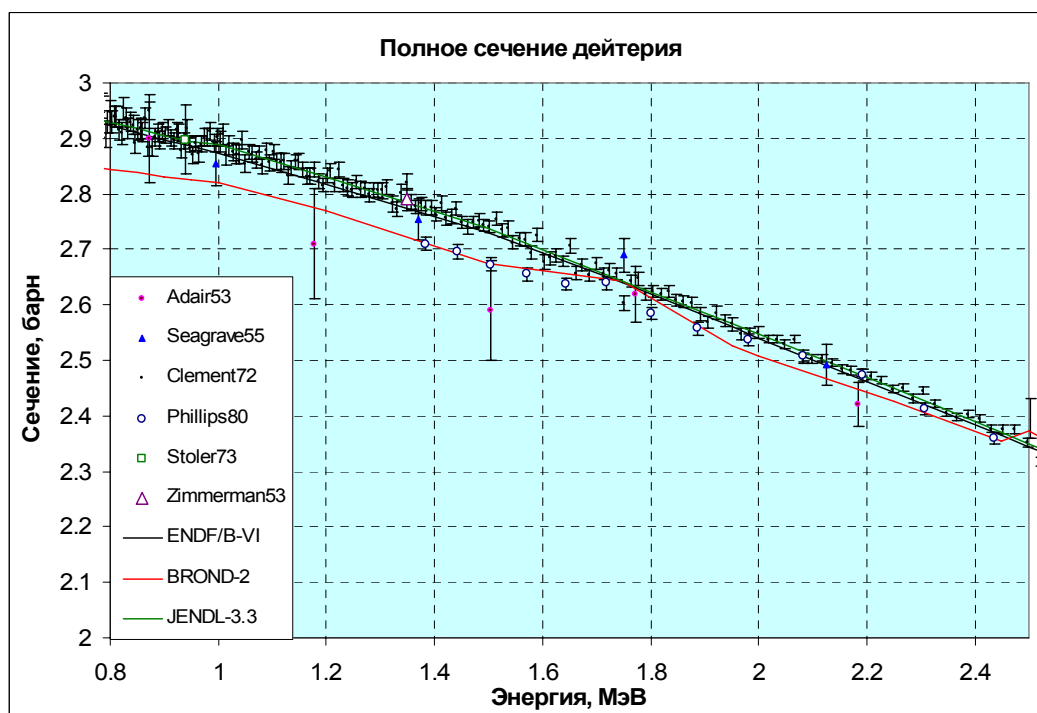


Рис. 5. Полное сечение дейтерия в области 4-й и 5-й групп.

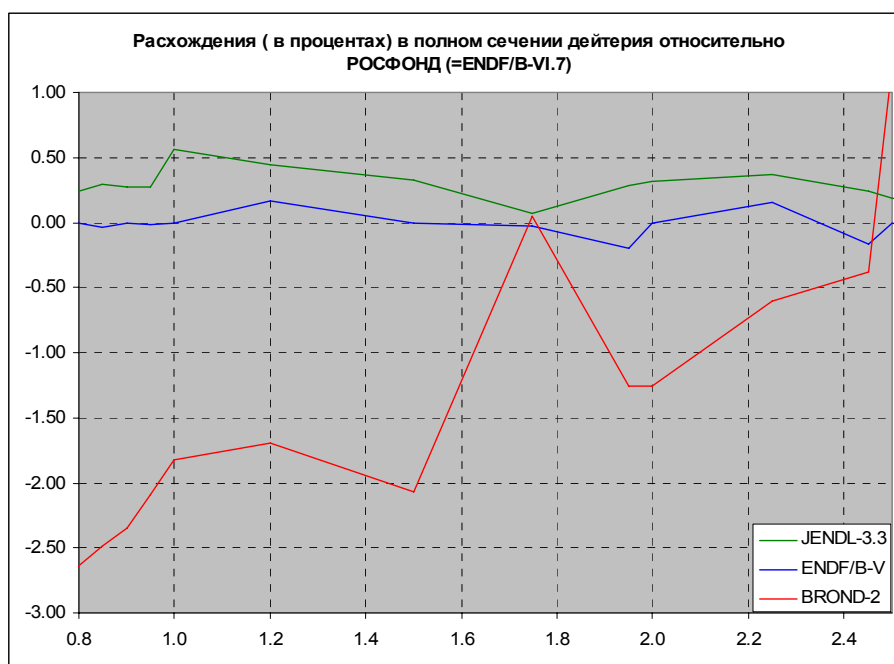


Рис. 6. Расхождения в оцененных данных по полному сечению.

Аномальное поведение полного сечения в оценке, принятой в БРОНД-2, обусловлено, очевидно, данными Филиппса и др. (Phillips80). Однако, именно труднообъяснимый излом в ходе полного сечения, проявившийся в этих данных и противоречащий плавному ходу сечения, следующему из совокупности данных всех других авторов (в частности, П. Столера и др. (Stoler73) и Р. Л. Циммермана и др. (Zimmerman53) заставляет признать этот излом артефактом.

На рис. 7. сравниваются экспериментальные и оцененные данные в интервале от 0.1 МэВ до 0.8 МэВ. На рис. 8 оцененные данные в этом энергетическом интервале сравниваются с оценкой Чедвика, Янга и Хэйла, принятой за основу. Данные ENDF/B-V на Рис.7. не изображены т.к. они практически совпадают с оценкой ENDF/B-VI.7 (см. Рис.8).

Еще раз подтверждается, что оценка, принятая в БРОНД-2, опирается исключительно на данные Филиппса (Phillips80) с полным игнорированием всех остальных результатов.

В то же время, в области 0.1 МэВ - 0.5 МэВ полное сечение, принятое в ENDF/B-VI.7 представляется несколько завышенным. **Было бы целесообразным в этой энергетической области под влиянием данных работ Столера (Stoler73) и Филиппса (Phillips80), подтверждаемых и данными Дж.Сигрейва(Seagrave55) прогнуть ход сечения так, как показано на рис. 7. При этом максимальный прогиб – при 0.25 МэВ составляет лишь 0.8%. Именно такой ход сечения принят в библиотеке РОСФОНД.**

Примем, что погрешности полного сечения при энергиях 0.8, 0.4, 0.2 и 0.1 МэВ независимы и составляют по 1 %. Тогда погрешности средних сечений в интервалах, ограниченных этими энергиями будут составлять по 1.4% а коэффициенты корреляции между ними $\rho = 0.7$.

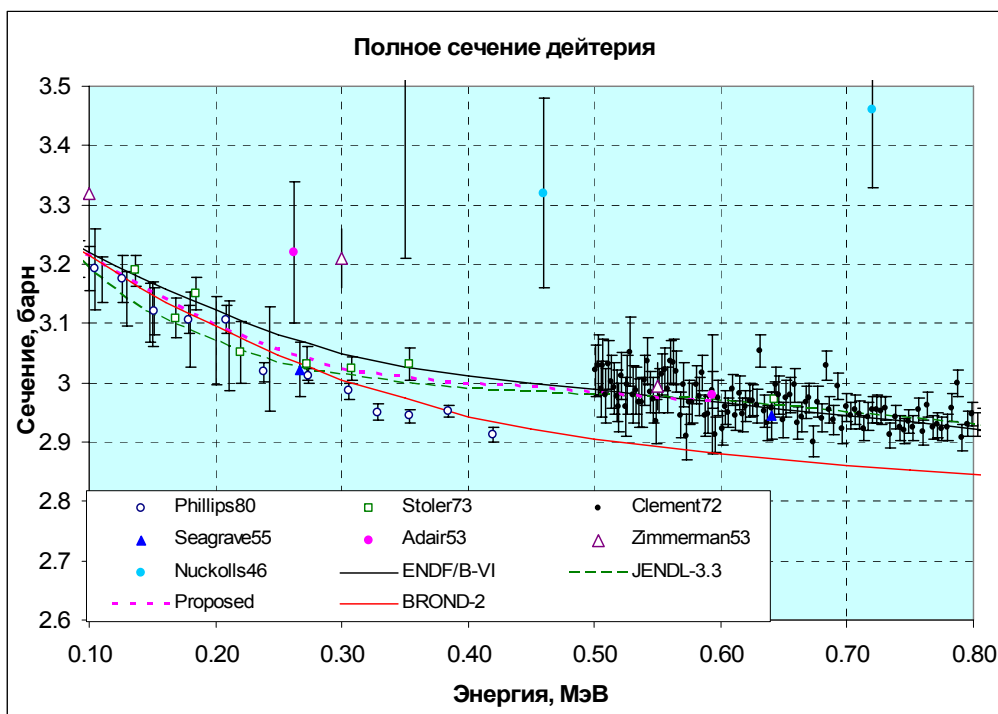


Рис.7. Полное сечение в области 6-й, 7-й и 8-й групп

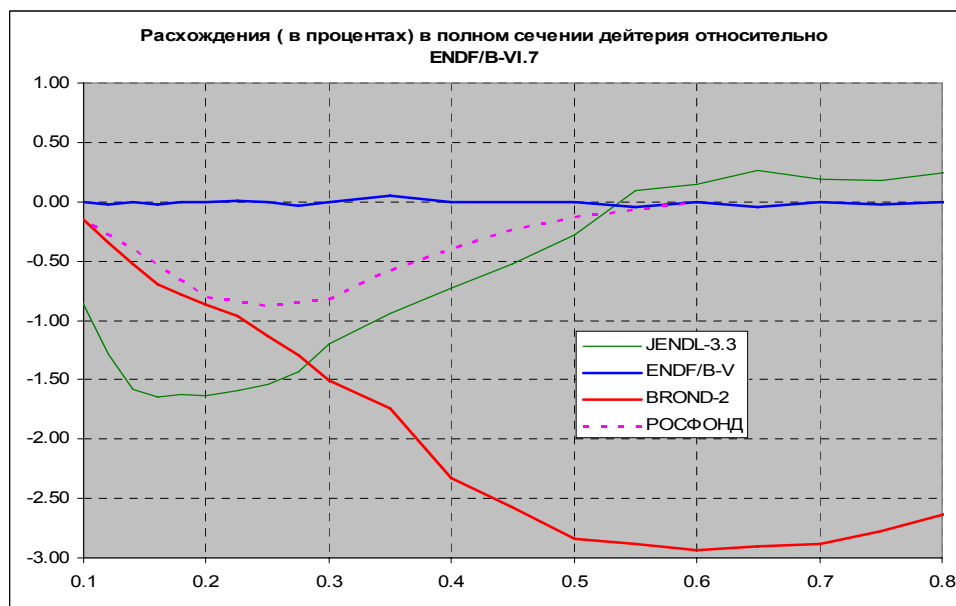


Рис.8. Расхождения в оцененных данных по полному сечению

Экспериментальные и оцененные данные в области энергий от 100 эВ до 100 кэВ приведены на Рис. 9. Экспериментальных данных в этом энергетическом диапазоне мало и они не согласуются между собой в пределах погрешностей. В работе Hibdon50 погрешности вообще не указаны. В этих условиях принимать столь сложный ход кривой энергетической зависимости сечения, как это сделано в библиотеке JENDL-3.3, или соглашаться с изломом этой кривой при 1 кэВ, проявившемуся в оценке Чедвика, Янга и Хэйла²⁵, не представляется обоснованным.

²⁵ Принявших в этой энергетической области старую оценку Стюарта и Хорсли¹.

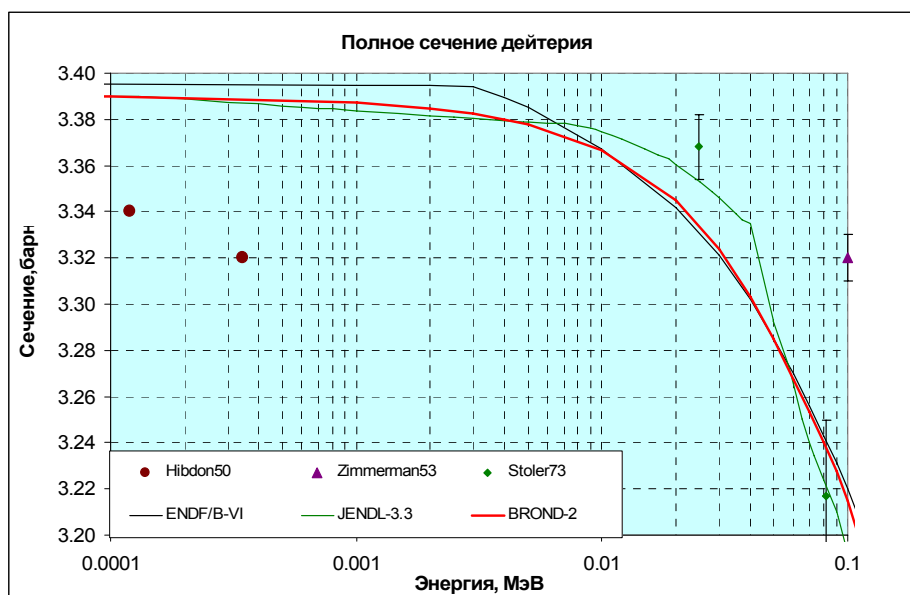


Рис.9. Полное сечение дейтерия в области низких энергий.

Как видно из рис.8, предлагаемое изменение хода сечений при энергиях 0.1 – 0.5 МэВ как раз таково, что предлагаемая для включения в РОСФОНД кривая при 100 кэВ плавно соединяется с кривой хода сечения, рекомендованной Николаевым и др.². При 50кэВ эта кривая очень плавно пересекает кривую, принятую в библиотеке ENDF/B-VI (см. рис.10). **Представляется рациональным при энергиях ниже 50 кэВ включить в РОСФОНД, кривую, рекомендованную Николаевым и др.², линейно интерполирующую сечение к значению, рекомендуемому Мухабхабом и др.²⁶**

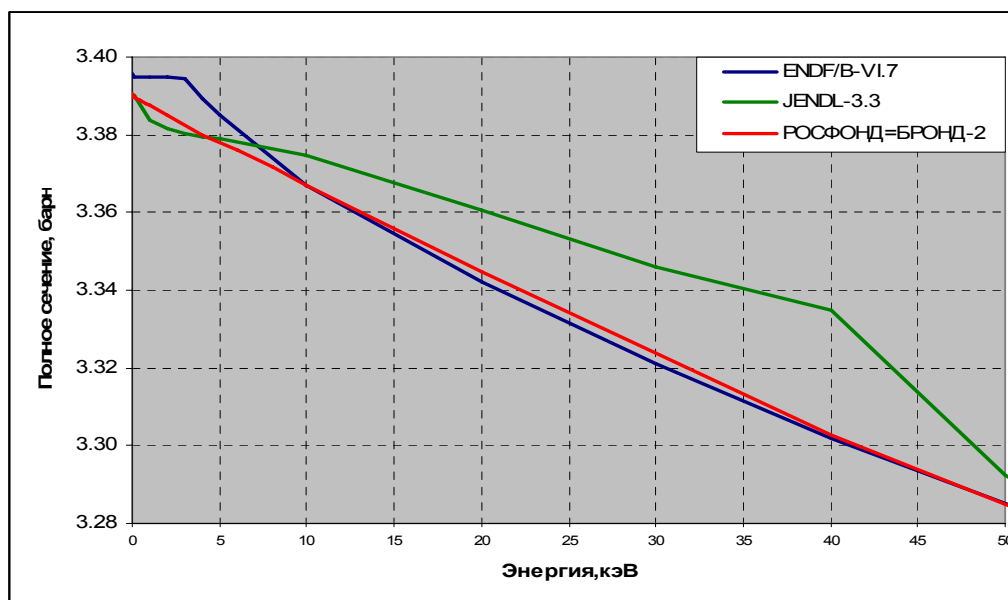


Рис.10. Оцененные данные по полному сечению в области низких энергий.

Согласно Мухабхабу, полное сечение при 0.0235 эВ равно $\sigma_0 = 3.3905 \pm 0.012$ барна, из них 0.00052 барна – захват.

²⁶ Mughabghab S.F., Divadeenam M., Holden N.E. Neutron Cross Sections, Vol.1. neutron Resonance Parameters and Thermal Cross sections. Part A, Z=1 – 60. Academic Press. N-Y, 1981.

3.2. Сечения упругого рассеяния (MT=2) и реакции (n,2n) (MT=16)

Ниже порога реакции (n,2n) отличие сечения рассеяния от полного сечения обусловлено только радиационным захватом, сечение которого даже при 0.0253 эВ составляет менее 0.02% от сечения рассеяния. Что касается области энергий выше порога реакции (n,2n), то здесь данные по сечению упругого рассеяния необходимо рассматривать совместно с данными по конкурирующему процессу.

На рис. 11 оцененные данные по сечению упругого рассеяния в области энергий выше порога реакции (n,2n) сравниваются с имеющимися экспериментальными данными; на рис.12 такое же сравнение делается для сечения реакции (n,2n).

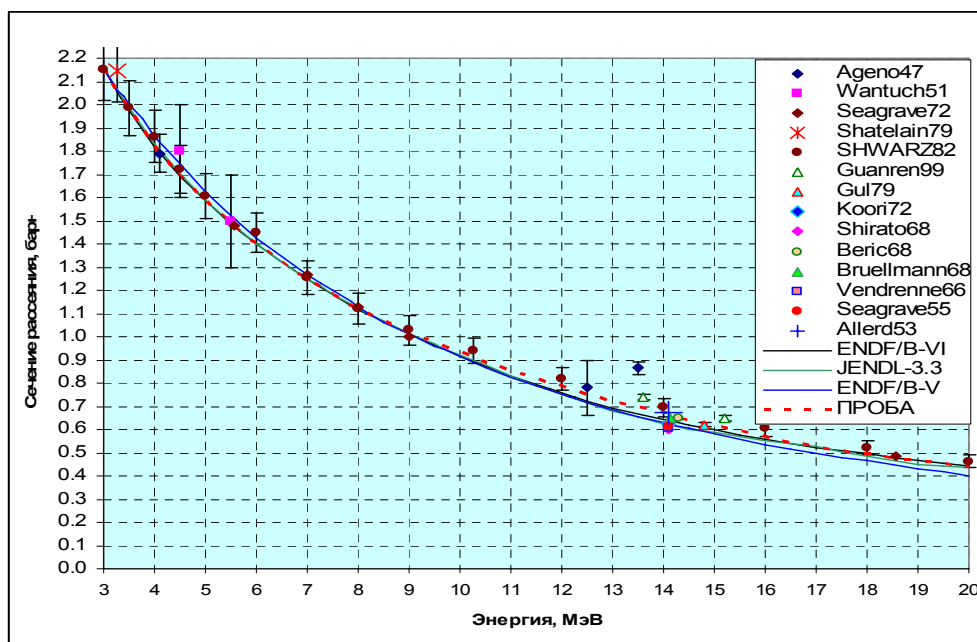


Рис.11. Сечение упругого рассеяния.

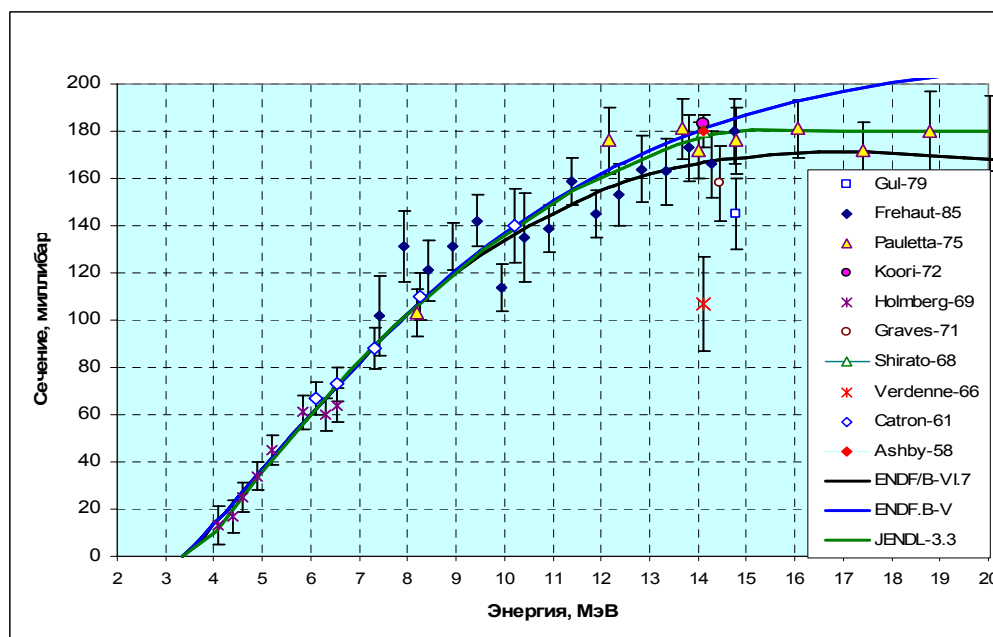


Рис.12. Сечение реакции (n,2n)

Из приведенных данных видно, что принимаемые во всех оценках сечения упругого рассеяния в области энергий 12 – 16 МэВ заметно ниже результатов последних экспериментов Guanirei99, Swarz82, Gul79. Расхождения достигают 70 миллибарн, т.е. 10%. Из рис. 12 видно, что столь большие расхождения не могут быть отнесены за счет переоценки сечения реакции (n,2n). Была предпринята попытка несколько улучшить согласие между результатами оценки сечения упругого рассеяния и недавними экспериментальными данными. Соответствующая кривая показана на рис.11 красным. То к чему приводит это изменение в сечении упругого рассеяния в полном сечении показано на рис. 13. Видно, что даже небольшое увеличение сечения упругого рассеяния в области около 14 МэВ, далеко не «дотягивающее» до результатов Guanirei99, приводит к тому, что полное сечение превышает результаты большинства измерений.

С учетом этого обстоятельства было решено в этой энергетической области не вносить никаких изменений в оценки сечений упругого рассеяния и реакции (n,2n), принятые в библиотеке ФОНД-2.2, и включить их без изменений в РОСФОНД. Заметим, что в ENDF/B-VII сечение упругого рассеяния при 0.0253 эВ принято чуть более высоким: 3.395 барна. Разумеется, разница в 1.5% намного меньше погрешности, с которой известно это сечение.

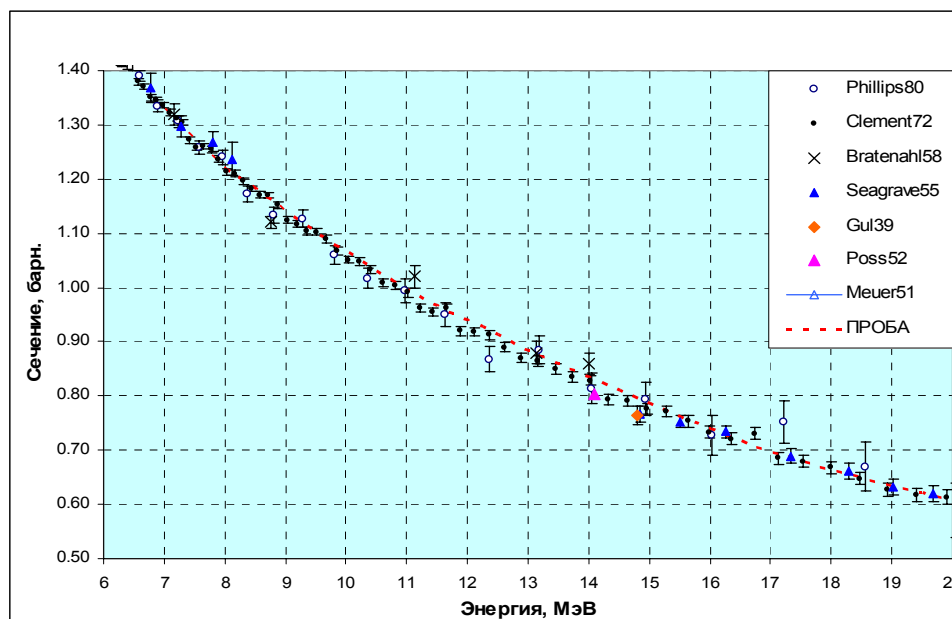


Рис. 13. Влияние увеличения сечения рассеяния на величину полного сечения.

3.3. Сечение радиационного захвата

Экспериментальные данные по сечению захвата нейтронов в дейтерии малочисленны и потому оценки, принятые в разных библиотеках близки. Как ни странно, сильнее всего различаются значения сечения в «тепловой» точке – при 0.0253 эВ: от 0.550 миллибарн, принятых в JENDL-3.3 до 0.506 миллибарн, принятых в ENDF/B-VI. В БРОНД-2 принято рекомендованное Мухабхабом значение – 0.519 миллибарн (± 0.007 миллибарн).

Сечение подчиняется закону $1/v$ вплоть до 1 – 3 кэВ, после чего начинает расти. Этот рост опирается на экспериментальные данные Mitev86 при 7 – 14 МэВ и Cerineo61 при 14.4 МэВ (см. рис.14).

В РОСФОНДе сечение захвата в тепловой области принято соответствующим оценке Мухабхаба, заново рассмотревшему в 2003 г. имеющиеся экспериментальные данные и сохранившем свою прежнюю оценку. Выше 1 кэВ сечение принято таким, как в ENDF/B-VI (и в других файлах оцененных данных).

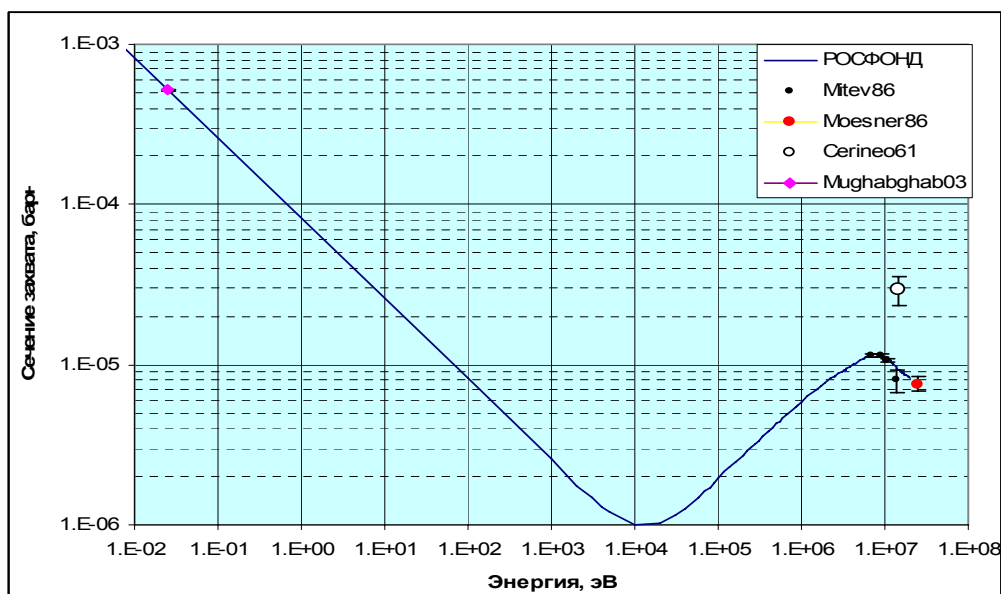


Рис.14. Сечение захвата

4. Энерго-угловые распределения

4.1. Анизотропия упругого рассеяния.

На приводимых ниже рисунках экспериментальные данные по дифференциальным сечениям упругого рассеяния сравниваются с результатами принятой для библиотеки РОСФОНД оценки⁵ и, с некоторыми другими из перечисленных выше оценок. Последние приводятся на графиках лишь в тех случаях, когда они заметно отличаются от принятой оценки.

На серии рисунков 15 приводятся данные для области энергии выше 6 МэВ. Экспериментальных данных в этой области достаточно много, принятая в РОСФОНД оценка хорошо с ними согласуется, а результаты остальных оценок в этой области практически неотличимы от принятой.

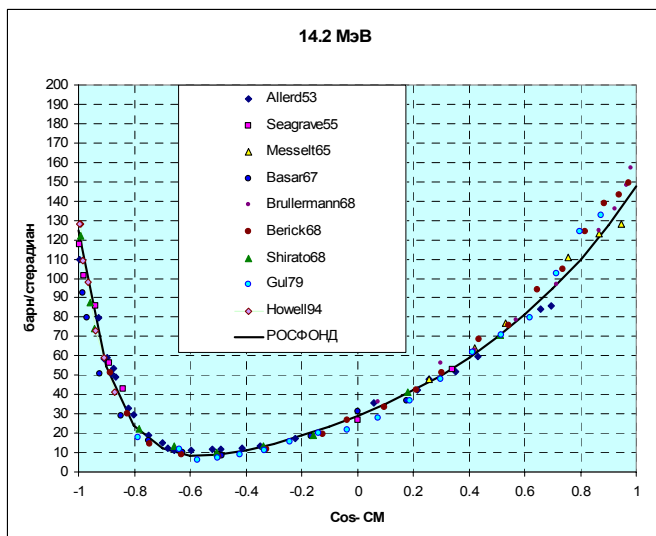


Рис.15а.

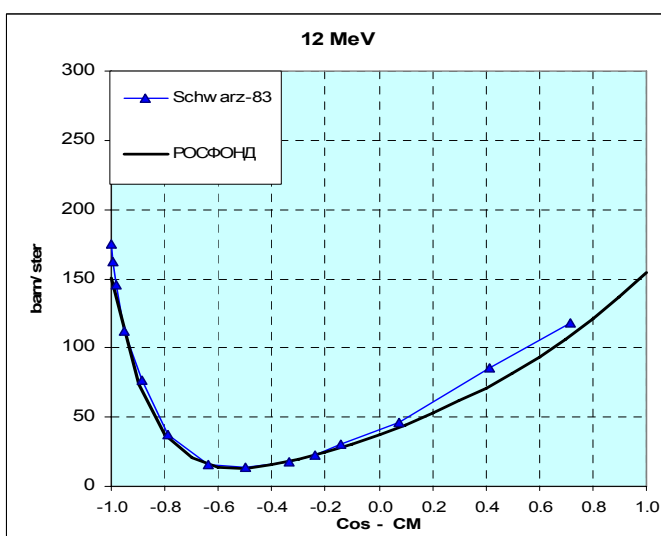


Рис.15б.

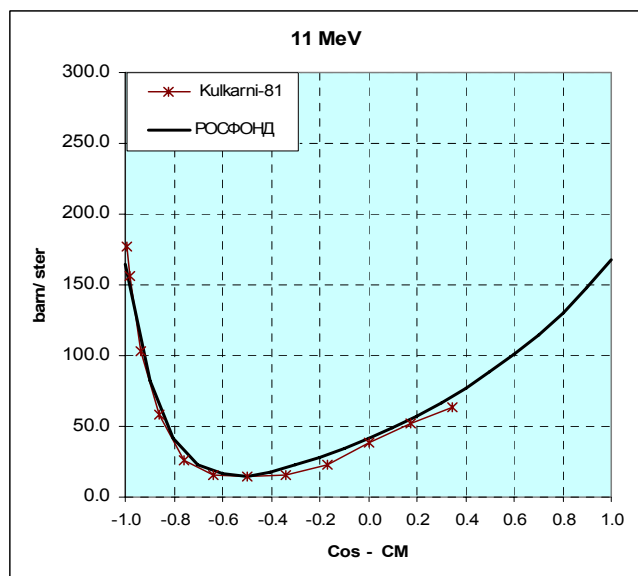


Рис.15в.

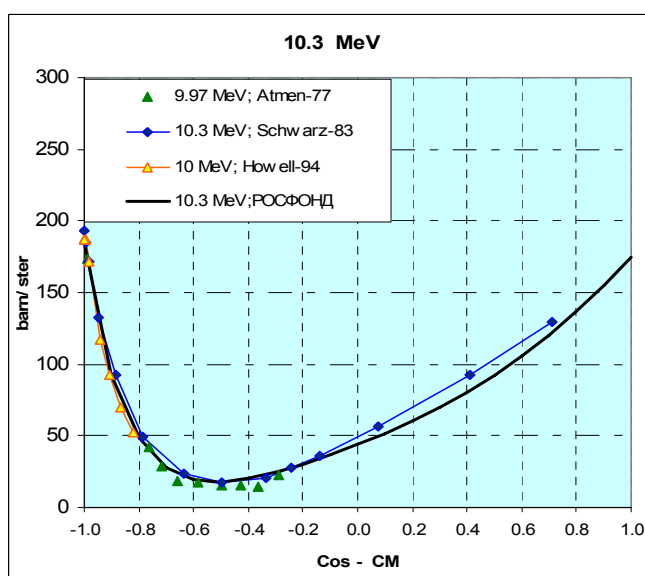


Рис.15г.

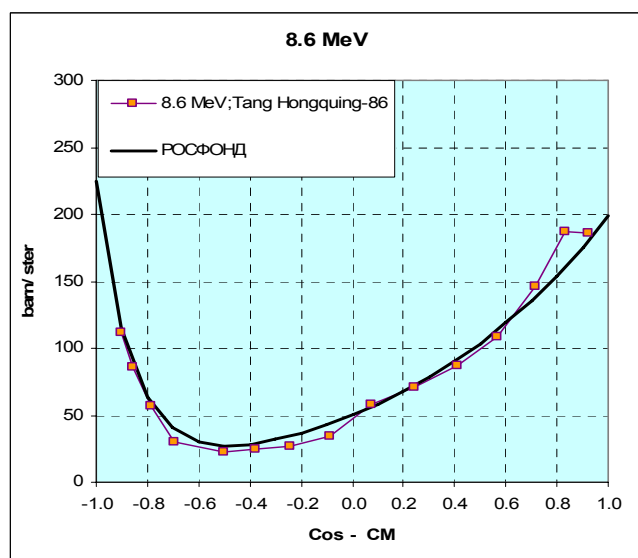


Рис. 15д.

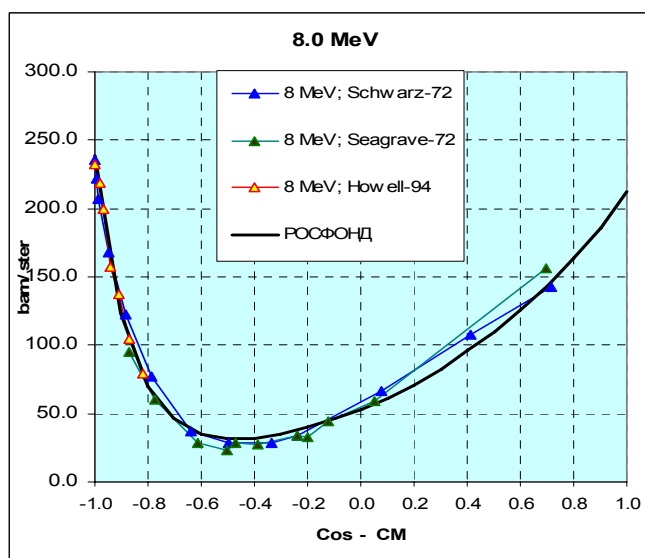


Рис.15е.

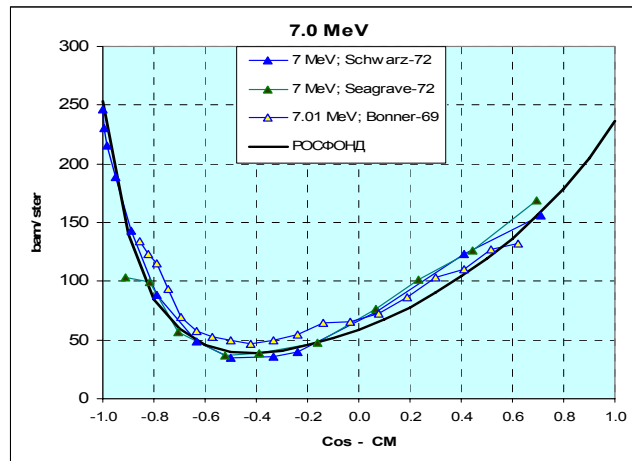


Рис.15ж.

На серии рисунков 16 приводятся экспериментальные данные для области энергий от 1.5 МэВ до 6 МэВ. И в этом энергетическом диапазоне оцененные данные по анизотропии упругого рассеяния опираются на достаточно большое число экспериментальных данных. Однако, нельзя не обратить внимание на то, что степень согласия между данными различных авторов здесь значительно хуже, чем при более высоких энергиях.

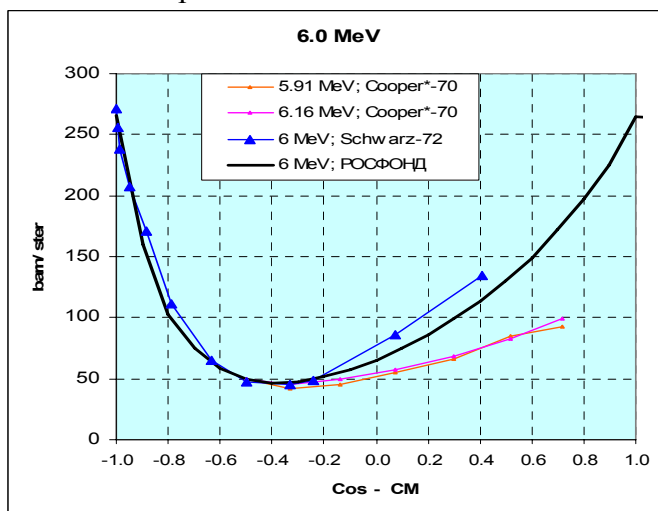


Рис.16а.

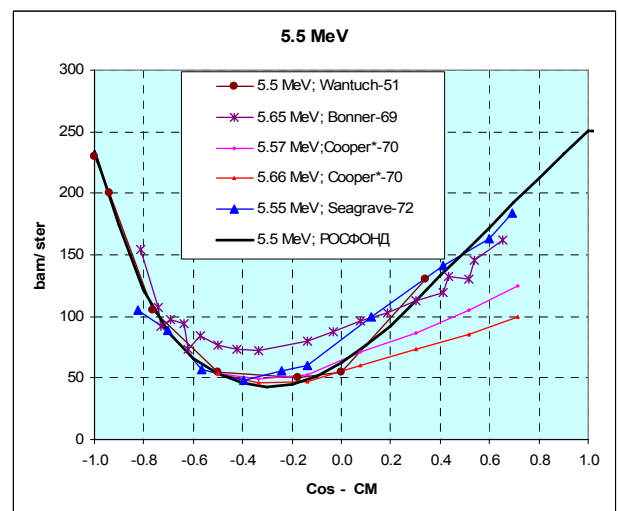


Рис.16б.

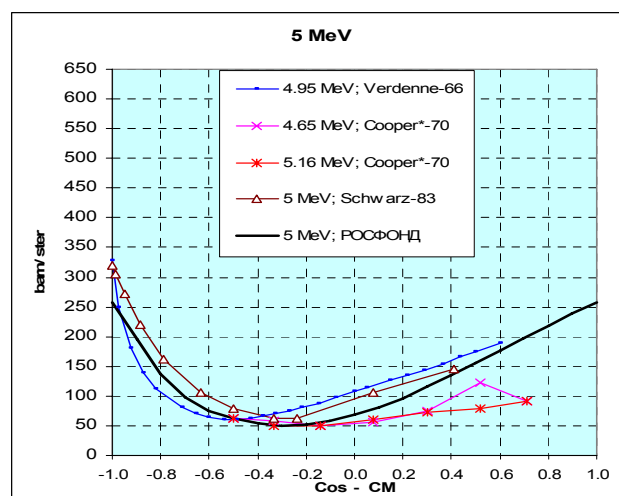


Рис.16в.

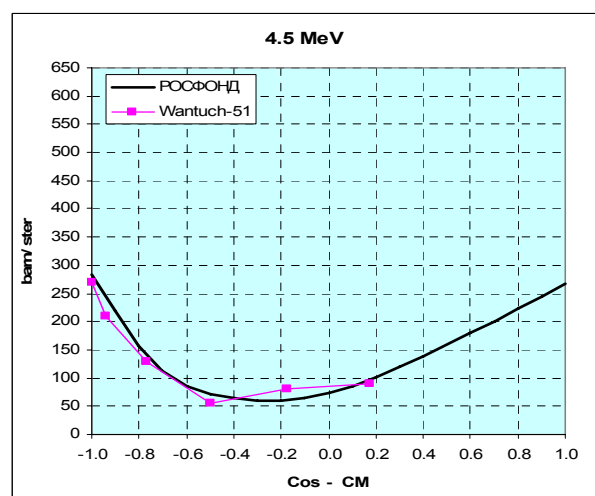


Рис.16г.

*) Данные Cooper70 отнормированы на сечение РОСФОНД при $\cos \theta_{CM}=0.5$

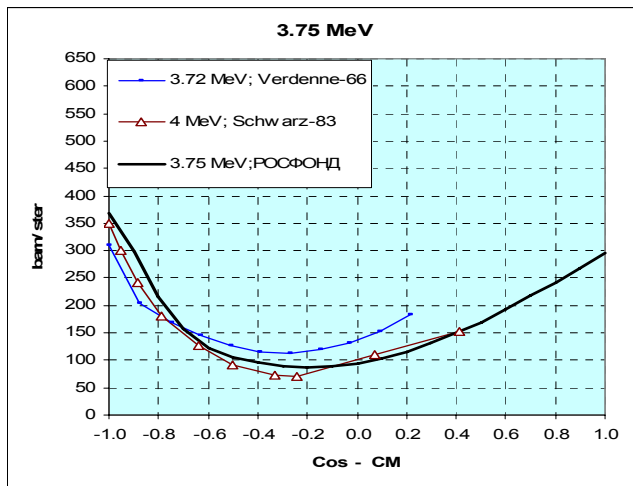


Рис.16д.

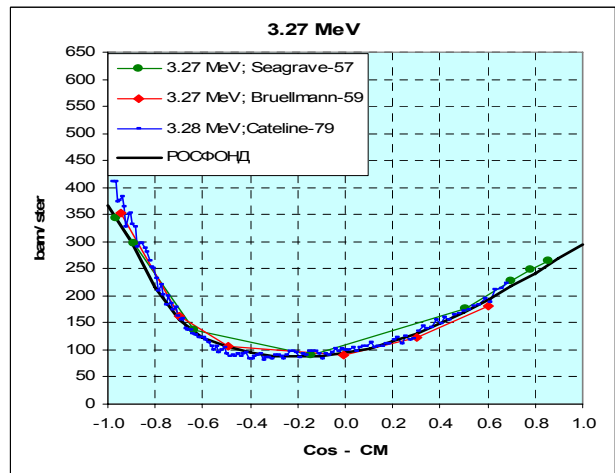


Рис.16е.

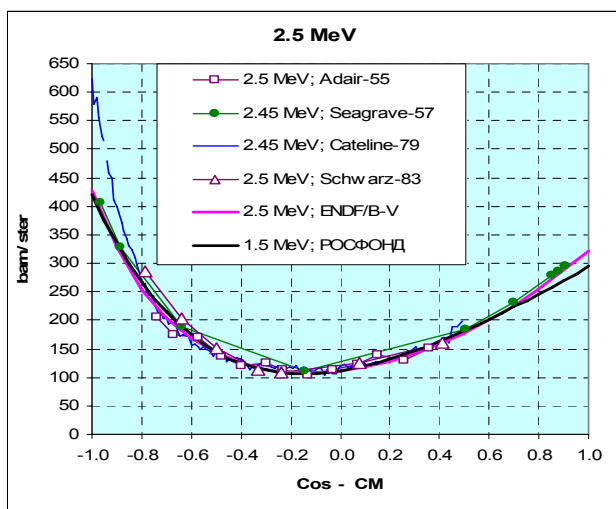


Рис.16ж.

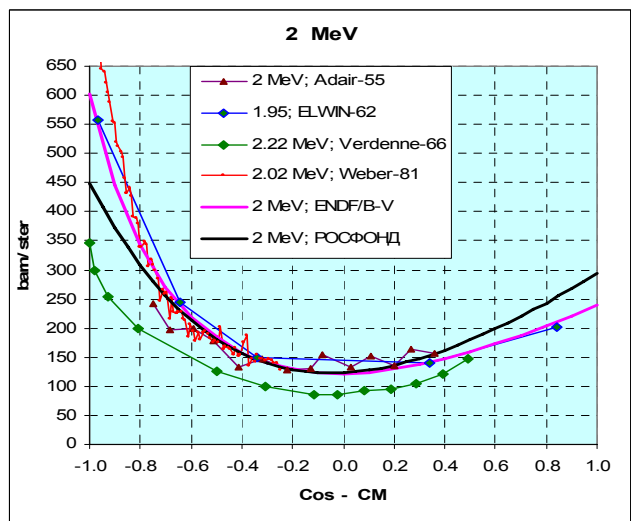


Рис.16з.

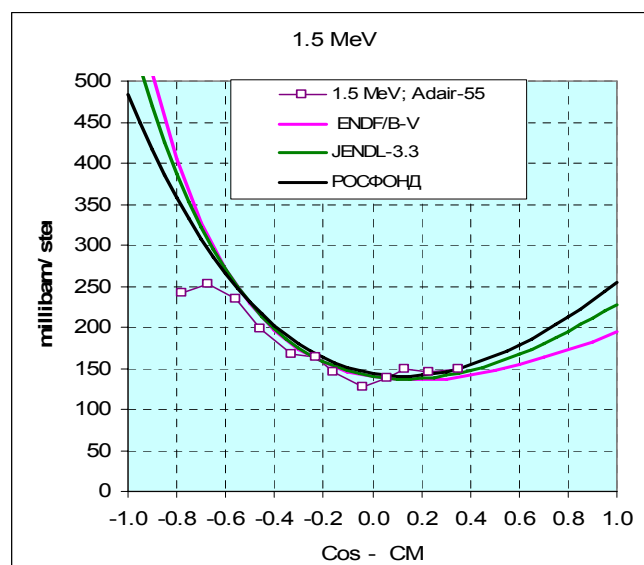


Рис.16и.

На серии рисунков 17 приводятся экспериментальные данные по угловым распределениям нейтронов с энергиями ниже 1.5 МэВ. Несмотря на то, что в этой важной с практической точки зрения области анизотропия рассеяния весьма существенна, экспериментальных данных мало, они неполны и порой противоречивы.

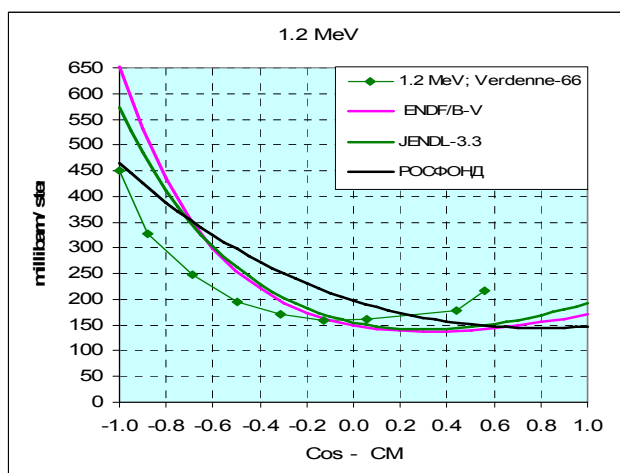


Рис.17а

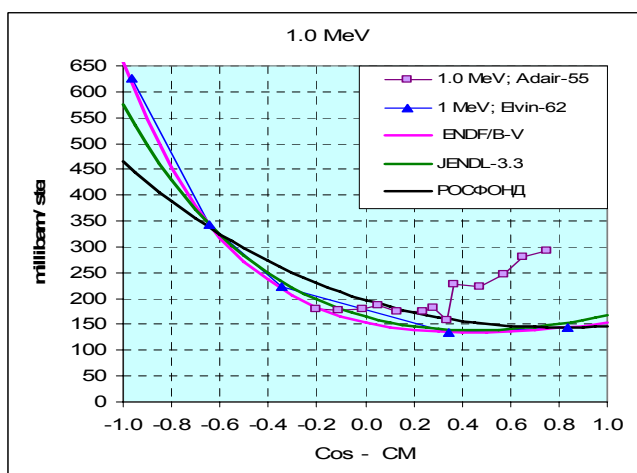


Рис.17б.

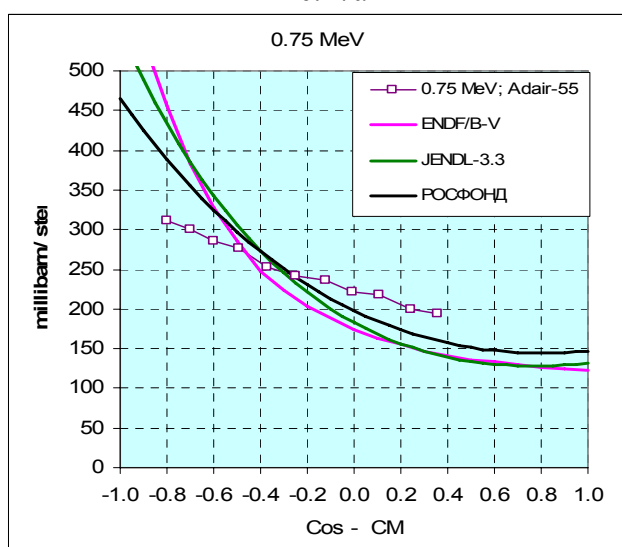


Рис.17в.

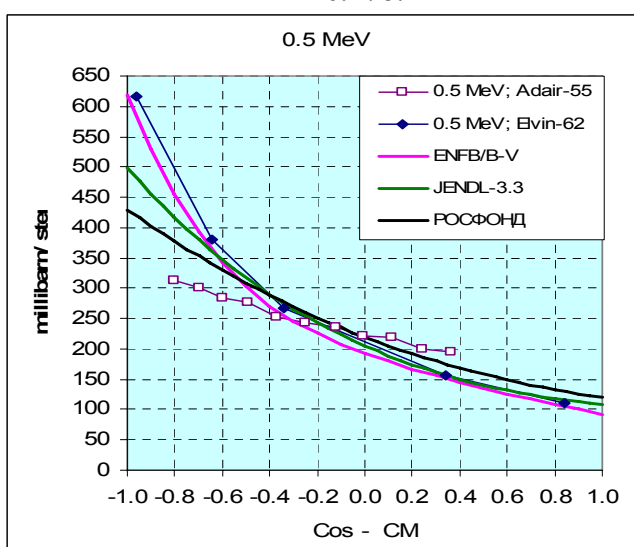


Рис.17г.

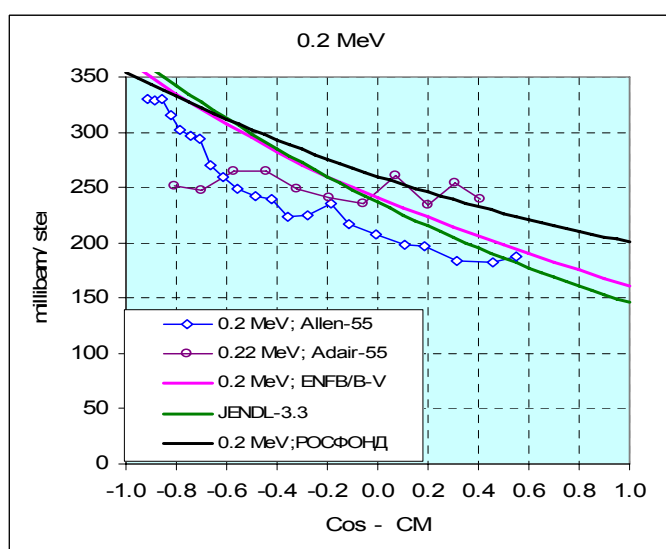


Рис.17д.

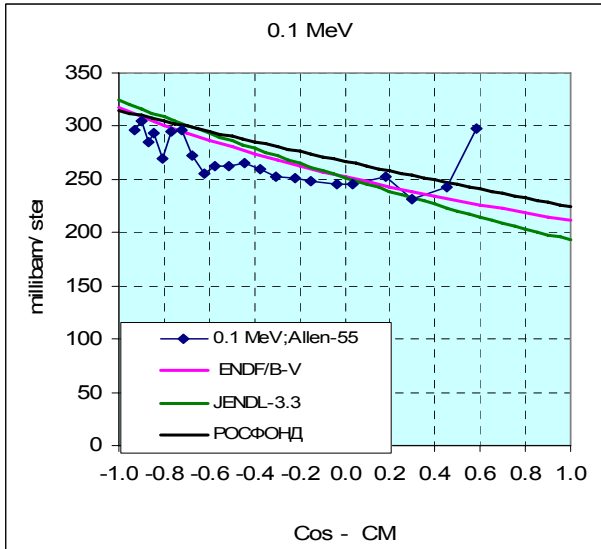


Рис.17е.

В области энергии ниже 1.5 МэВ оценка⁵, принятая в ENDF/B-VII и в ФОНД-2.2, которую решено сохранить и в РОСФОНДе, описывает несколько более

изотропные угловые распределения, чем это следует из оценки, принятой в JENDL-3.3. Угловые распределения, следующие из библиотеки ENDF/B-V, ещё более анизотропны. При 1 МэВ и при 0.5 МэВ эти более анизотропные распределения опираются на данные Elvin62. Однако данные Verdenne66, согласующиеся с ранними экспериментами Allen55 и Adair55, не подтверждают сильной анизотропии.

В этих условиях изменять в библиотеке РОСФОНД принятые в ФОНД-2.2 данные по анизотропии упругого рассеяния признано нецелесообразным.

4.2. Энерго-угловые распределения продуктов реакции (n,2n)

В современных библиотеках используются три несколько различных описания энерго-угловых распределений продуктов развала составного ядра – трития – на протон и два нейтрона. Первым и главным из них является описание по модели развала на три частицы равномерно в фазовом пространстве параметров – энергий и углов вылета – каждой из частиц с соблюдением законов сохранения энергии и импульса. В конкретном случае, когда развал происходит на три частицы это распределение в лабораторной системе координат имеет вид

$$P_i(\mu, E, E') = C(E') \sqrt{E[E_i^{\max}(E', \mu) - E]},$$

где E' – начальная, E – конечная энергия частицы, μ – косинус угла вылета по отношению к направлению нейтрона, вызвавшего реакцию. $E_i^{\max}(E', \mu)$ – максимально возможная энергия частицы, вылетающего под углом $\arccos \mu$. Эта энергия достигается если две другие частицы в системе центра инерции вылетают в направлении, противоположном направлению движения рассматриваемой частицы, т.е. если рассматриваемая частица – нейтрон, две другие частицы – протон и другой нейтрон – должны вылетать как несвязанный дейтрон. В этом случае

$$E_n^{\max}(E', \mu) = E' \frac{2\mu^2 + \frac{M^2}{m^2} \left(1 + \frac{M+m}{M} \frac{Q}{E'}\right) - 1 \pm 2\mu \sqrt{\mu^2 + \frac{M^2}{m^2} \left(1 + \frac{M+m}{M} \frac{Q}{E'}\right) - 1}}{\left(\frac{M}{m} + 1\right)^2}$$

Здесь Q – энергия реакции - энергия связи дейтона ($Q = -2.22457$ МэВ);

M – масса дейтона;

m – масса нейтрона (если рассматривается нейтрон) или протона (если рассматривается протон).

Если $E' > E_{\text{обр}} = QM/(M-m)$, то нейтроны могут наблюдаться под любыми углами вылета ($-1 < \mu < 1$) и знак минус в вышенаписанной формуле следует отбросить. Вблизи порога реакции, при $E_{\text{пор}} < E < E_{\text{обр}}$ нейтроны вылетают в лабораторной системе координат только под углами с косинусом

$$\mu < \mu_{\min} = \sqrt{(M^2 - 1) \left(-\frac{Q}{E'} \frac{M}{M-m} - 1 \right)}.$$

В этом интервале необходимо рассматривать две группы нейтронов – те, которые в системе координат центра инерции летят вперед и те, что летят назад. Этим группам нейтронов и соответствуют разные знаки в формуле для максимальной энергии.

Константа C определяется из условия нормировки плотности вероятности на единицу и равна при $E > E_{\text{обр}}$:

$$C(E') = \frac{2(M+m)^4}{\pi^2 E'^2 m^4 (a^2 + 8a/3 + 8/5)};$$

при $E_{\text{пор}} < E < E_{\text{обр}}$:

$$C(E') = \frac{2(M+m)^4}{\pi^2 E'^2 m^4 [a^2 (1 - \mu_{\min}) + 8a(1 - \mu_{\min}^3)/3 + 8(1 - \mu_{\min}^5)/5]}.$$

$$a(E') = \frac{M^2}{m^2} \left(1 + \frac{M+m}{M} \frac{Q}{E'} \right) - 1.$$

Задание энерго-углового распределения в такой форме предусмотрено в формате ENDF/B-VI (LAW=6) и вычисления, например, вероятностей и угловых моментов межгрупповых переходов производятся автоматически программой NJOY по заданным в файле данных значениям M/m , Q и числу частиц $n=3$. Тем самым достигается весьма компактная запись сложного энерго-углового распределения. Такая форма представления данных использована в библиотеках ENDF/B-VI, ФОНД-2 и JEF-3.

В ряде экспериментов по исследованию спектров нейтронов реакции $D(n,n')$; $D(p,n)$; $H(d,n)$ выяснилось, что в спектрах нейтронов и протонов, вылетающих под малыми углами, наблюдаются заметные отклонения от формы, определенной описанной выше моделью развала. Именно, наблюдаются пики в области $E \approx E^{\text{max}}$ и $E \approx E^{\text{max}}/2$. Поскольку энергия E^{max} достигается когда оставшийся нейтрон и протон летят назад, пик при $E \approx E^{\text{max}}$ означает, что подобных случаев наблюдается заметно больше, чем это следует из модели развала на несвязанные частицы, что указывает, на взаимодействие между летящими назад нейтроном и протоном, т.е. действительно, назад вылетает несвязанный дейтрон $-D^*$. В спектре нейтронов, вылетающих назад, при этом с необходимостью будет наблюдаться пик при энергии $E \approx E^{\text{max}}/2$ от нейтронов, образовавшихся при развале несвязанного дейтона.

Пик при $E \approx E^{\text{max}}/2$ у нейтронов, летящих вперед, указывает на то, что вылет в переднем направлении обоих нейтронов также более вероятен, чем следует из модели развала, что можно интерпретировать как реакцию с вылетом несвязанного дейтона или несвязанного бинейтрона $-B^*$.

В работе² пики вблизи $E \approx E^{\text{max}}$ и $E \approx E^{\text{max}}/2$ для нейтронов, летящих под малыми углами вперед и при $E \approx E^{\text{max}}/2$ для нейтронов, летящими под малыми углами назад, оценены на основе экспериментальных данных. Принято, что в результате реакции $D(n,D^*)n$, когда несвязанный дейтрон вылетает вперед, угловые распределения нейтронов линейно меняются от максимального значения при $\mu=1$ до нуля при $\mu=0.955$ ($E \approx E^{\text{max}}(1)/2$) и от нуля при $\mu=-0.955$ до максимального значения при $\mu=-1$ ($E \approx E^{\text{max}}(-1)$). В результате реакции $D(n,B^*)p$, когда вперед вылетает несвязанный бинейтрон, вероятность вылета меняется от максимальной при $\mu=1$ до нуля при $\mu=0.94$ ($E \approx E^{\text{max}}(1)/2$). В результате реакции $D(n,p)B^*$, когда несвязанный бинейтрон вылетает назад, вероятность вылета меняется от нуля при $\mu=-0.94$ до максимальной при $\mu=-1$ ($E \approx E^{\text{max}}(1)/2$). Из анализа экспериментальных данных²⁷ следует, что вероятность вылета несвязанного бинейтрона назад маловероятна.

Вероятность осуществления реакции $(n,2n)$ по описанным механизмам, согласно оценке², равна нулю ниже 5 МэВ, составляет 9.2% при 14.2 МэВ и 14.6 % при 20 МэВ.

²⁷ Комаров В.В., Попова А.М. ЖЭТФ. 1960. т.38. с.1559.

Принято, что сечения реакций $D(n,p)B^*$ и $D(n,B^*)p$ одинаковы. Отношение сечений реакций $D(n,D^*)n$ и $D(n,B^*)p$ принято равным 1.5. Таким образом, энерго-угловое распределение вторичных нейтронов оказывается состоящим из 4-х ветвей: механизма развала, имеющего определяющее значение, и трех описанных выше механизмов, учитывающих взаимодействие частиц в конечном состоянии. Такой способ описания энерго-угловых распределений нейтронов реакции $(n,2n)$ принят в библиотеке БРОНД-2.

Более сложное теоретическое описание энерго-углового распределения нейтронов реакции $(n,2n)$ принято в библиотеках JENDL-3 и CENDL. Оно основано на решении уравнения Фаддеева, параметры которого подбираются под экспериментальные данные по угловым распределениям вторичных частиц, образующихся в реакциях $D(n,2n)p$ и $D(p, 2n)p$. В библиотеке JENDL-3 при этом дается ссылка на работу²⁸; CENDL – на работу²⁹. В обоих случаях энерго-угловые распределения в файлах задаются трижды-дифференциальными вероятностями вылета вторичных частиц и в этом виде трудно поддаются осознанию. В библиотеке JENDL-3 представление этих данных потребовало 10943 записи (образов перфокарт); в библиотеке CENDL – 30484 записи.

Для сравнения результатов разных оценок целесообразно рассмотреть среднегрупповые характеристики. В таблице 1 приводятся для 5 энергетических групп БНАБ средняя энергия нейтронов, испускаемых в реакции $(n,2n)$, и средний косинус угла их вылета (в лабораторной системе координат).

Таблица 1. Среднегрупповые характеристики энерго-угловых распределений нейтронов, испускаемых в реакции $(n,2n)$

№ группы	Нижняя граница, МэВ	Средняя энергия, МэВ	БРОНД-2		ENDF/B-6		JENDL-3.3		CENDL	
			$\langle E \rangle$, МэВ	$\langle \cos \mu \rangle$	$\langle E \rangle$, МэВ	$\langle \cos \mu \rangle$	$\langle E \rangle$, МэВ	$\langle \cos \mu \rangle$	$\langle E \rangle$, МэВ	$\langle \cos \mu \rangle$
-1	13.98	14.5	2.02	0.60	1.95	0.58	1.85	0.55	1.79	0.54
0	10.5	11.5	1.57	0.62	1.54	0.60	1.50	0.59	1.46	0.57
1	6.5	7.61	0.96	0.66	0.94	0.65	0.99	0.67	0.95	0.65
2	4	4.90	0.51	0.77	0.51	0.77	0.59	0.80	0.58	0.76
3	2.5	3.14	0.31	1.00	0.31	1.00	0.31	1.00	0.32	1.00

Обращает на себя внимание следующее.

1. При высоких энергиях (-1-я и 0-я группы) учет взаимодействия частиц в конечном состоянии по данным² ведет к увеличению энергии вторичных нейтронов относительно модели развала, а по данным^{10,11} – к понижению этой энергии.
2. Средний косинус угла вылета по данным² слегка возрастает, тогда как по данным^{10,11} – слегка падает.
3. Согласно данным^{10,11} взаимодействие частиц в конечном состоянии проявляется и в области энергий ниже $E_{обр}$, но имеет противоположный знак: средняя энергия вторичных нейтронов несколько увеличивается.
4. В -1й группе различие между средними энергиями вторичных нейтронов, следующими из работ^{10 и 11}, основанных на одинаковом теоретическом базисе, составляет 3.3%, т.е. ровно столько же, сколько различие между средними

²⁸ Enebhoh W. The $n+d$ Break-up Reaction with Separable Potential. Nucl.Phys. A191 (1972), p.97

²⁹ Cpr Liangyuan, Wang Cuilan and Lu Dinghui. Commun.Theor.Phys. 11. p.411 (1989).

энергиями вторичных нейтронов, рассчитанными по модели развала и с учетом взаимодействия частиц согласно работе².

Таким образом, надежность современных оценок учета взаимодействия частиц в конечном состоянии оставляет желать лучшего. В то же время, при энергиях ниже 20 МэВ, это влияние при всех сделанных оценках сравнительно невелико и едва ли может проявиться при использовании нейтронных данных для дейтерия в каких-либо практических расчетах. Тем не менее, решено в библиотеке РОСФОНД учесть влияние взаимодействия частиц в конечном состоянии так, как это рекомендовано в работе² (и как принято в библиотеке БРОНД-2). Выбор именно этой оценки обусловлен тем, что ее данные представлены в достаточно простой и легко контролируемой форме. В то же время сам факт введения учета частиц в конечном состоянии в будущем будет способствовать уточнению влияния этого эффекта тогда, когда к тому появятся достаточные расчетно-экспериментальные основания.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Единственной реакцией, в результате которой образуются фотоны при взаимодействии нейтронов с дейтерием является радиационный захват. Энергия этой реакции равна $Q=6.257232$ МэВ (см. п. 1.5). Энергия фотона при захвате теплового нейтрона (E_{phot}^0) чуть ниже этой энергии за счет отдачи тритона, испускающего фотон. Энергия отдачи равна

$$E_D = \frac{Q^2}{M_T m_n c^2},$$

где $M_T=2.99014$ – отношение массы тритона к массе нейтрона, $m_n c^2=939.55$ МэВ – энергетический эквивалент массы покоя нейтрона. Расчеты дают $E_T=0.013936$ МэВ. Таким образом, на энергию фотона, испускаемого при захвате теплового нейтрона в водороде приходится $E_{\text{phot}}^0=Q-E_D=6.243296$ МэВ. **Погрешность этой величины не более двойки в последнем знаке. Эта величина и принята в библиотеке РОСФОНД.**

При захвате нейтронов с большей энергией, энергия испускаемых фотонов меняется линейно с энергией нейтрона:

$$E_{\text{phot}}(E_n) = E_{\text{phot}}^0 + \frac{Aw}{(Aw+1)} E_n$$

Данные об образовании фотонов в библиотеке РОСФОНД представлены в файле MF=12 (множественность образования фотонов, равная в данном случае единице) для MT= 102 (радиационный захват). Угловое распределение – изотропное – определено в файле MF=14 для MT=102.

6. Погрешности нейтронных сечений.

6.1. Погрешность полного сечения.

Погрешность полного сечения варьируется от 1 - 1.4% при высоких энергиях до 0.35%, рекомендованных Мухабхабом при низких. Ход погрешности полного сечения с энергией и корреляционные свойства этих погрешностей обсуждались в разделе 3.1..

Из данных раздела 3.2, в частности из рис. 12, видно, что погрешности сечения реакции $(n,2n)$ едва ли лучше 5%. При этом погрешности достаточно сильно скоррелированы, поскольку энергетическое поведение сечения с энергией установлено до 10 МэВ весьма точно. При более высоких энергиях возможные вариации хода сечений (скажем, отношение сечений при 20 и при 10 МэВ) близки к погрешности абсолютных значений сечения.

6.2. Погрешность сечения захвата

Погрешность сечения захвата тепловых нейтронов, оцененная Мухабхабом (1.3%) в свете значительного разброса принятых оцененных данных представляется слишком оптимистичной. Усреднение всех имеющихся экспериментальных данных о сечении захвата нейтронов в дейтерии с весом обратно пропорциональным квадратам указанных авторами погрешностей, дает 534 микробарна с погрешностью этого среднего, оцененного из авторских погрешностей, равной 2%. При этом средне-квадратичный разброс данных составляет 6%. Учитывая изложенное и высокую компетентность Мухабхаба, детально исследовавшего обоснованность погрешностей, приписываемых авторами своим данным, полагаем, что принятому в оценке сечению 519 микробарн можно приписать погрешность ± 10 микробарн (2%). Эта погрешность полностью скоррелирована в области энергии до 100 эВ, где нет оснований сомневаться в том, что сечение подчиняется закону $1/v$. (см. рис.14). В интервале от 100 эВ до 1 МэВ, где экспериментальные данные отсутствуют, погрешность сечения может быть очень большой, порядка 20 -30%. В области от 1 эВ до 20 МэВ, где ход сечения опирается на экспериментальные данные, которым приписана погрешность не хуже 10%, сечению можно приписать именно такую погрешность.

6.3. Погрешность среднего косинуса угла рассеяния

Из данных раздела 4.1 видно, экспериментальные данные по анизотропии упругого рассеяния нейтронов на дейтерии недостаточно полны и порой противоречивы. Это нашло отражение в значительном разбросе результатов оценок. На рис. 18 показана энергетическая зависимость среднего косинуса угла упругого рассеяния в системе координат центра инерции, следующая из разных оценок.

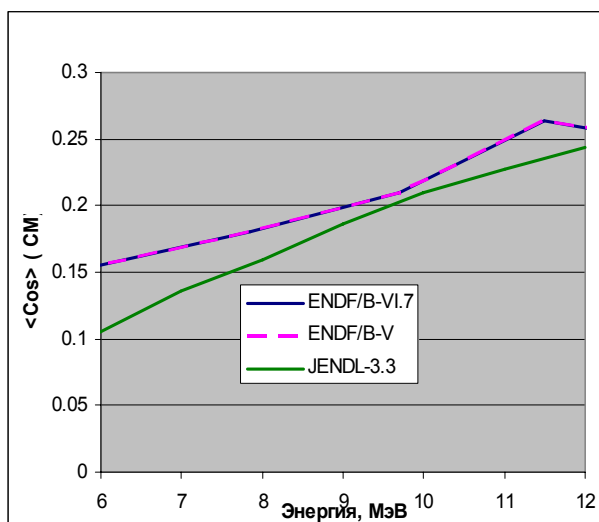


Рис.18а

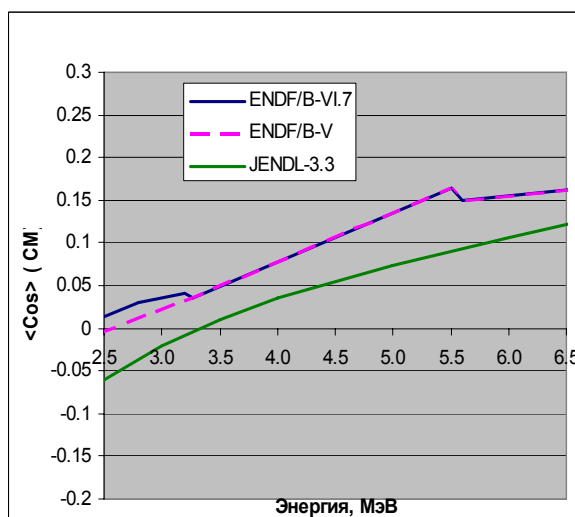


Рис.18б

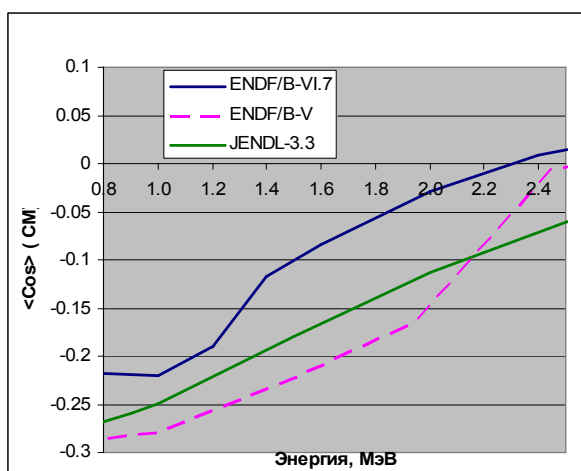


Рис.18в

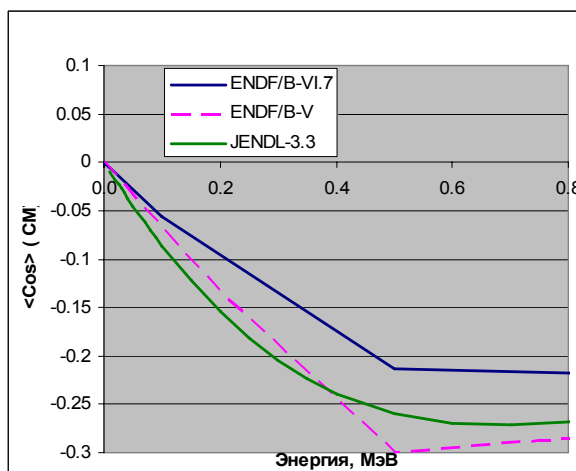


Рис.18г.

Из рассмотрения данных, представленных на рис. 18, можно прийти к следующим заключениям относительно погрешностей среднего косинуса угла упругого рассеяния: Выше 6 МэВ ~ 25%; от 2.5 до 6 МэВ (где средний косинус очень мал) – 80%; от 1.0 до 2.5 МэВ – 60%; от 0.8 до 1.4 МэВ – 35%; от 0.4 до 0.8 МэВ – 50%; ниже 0.4 МэВ – 60%. Более детальные оценки погрешностей даны в Приложении.

7. Валидация нейтронных данных по интегральным экспериментам.

Экспериментами, наиболее чувствительными к сечению рассеяния на водороде являются критические параметры высококонцентрированных тяжеловодных растворов высокообогащенного урана. В Справочнике³⁰ приводятся результаты двух серий таких экспериментов, выполненных в 50-х годах в Лос-Аламосской Лаборатории США – серия HEU-SOL-THERM-004 (6 критических сфер с раствором уранил-фторида в D₂O в тяжеловодном отражателе с атомарным отношением D/²³⁵U от 34.2 до 431) и серия HEU-SOL-THERM-020 (5 критических цилиндров с раствором уранил-фторида в D₂O без отражателя с атомарным отношением D/²³⁵U от 230 до 2081). Погрешности коэффициента размножения, приписанные авторами своим результатам варьируются от

³⁰ International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NSC/DOC(095)03, Sept.2004 ed.

0.7% до 1.2%. Эти погрешности чрезвычайно сильно скоррелированы. Расчеты, основанные на вычисленных коэффициентах чувствительности коэффициентов размножения этих сборок к использованным при расчете полным сечениям дейтерия и оцененных здесь погрешностям этих сечений и корреляций между ними (см. Приложение) показали, что учет неточности современного знания сечений дейтерия вносит в результаты этих экспериментов дополнительные погрешности от 0.16% до 0.22% в зависимости от отношения $D/^{235}U$. К сожалению, оценить чувствительности к среднему косинусу угла рассеяния на дейтерии не удалось и оценить погрешность, вносимую за счет неточности знания анизотропии упругого рассеяния на дейтерии, не удалось. Возможно, она имеет тот же порядок величины, что и погрешность за счет неточности полного сечения. Как бы то ни было, погрешности, вносимые неточностью знания нейтронных данных дейтерия в критичность обсуждаемых размножающих систем, заметно ниже, чем погрешности, с которыми определены соответствующие коэффициенты размножения. Поэтому провести валидацию нейтронных данных дейтерия на этих экспериментах не представляется возможным.

8. Перечень цитированных экспериментальных работ

8.1. Полное сечение

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
				от	до	
Davis71	J.C.Davis	J,PR/C,3,1798,197105	10099002	1.5+06	2.8+07	27
Clement72	J.M.Clement	J,NP/A,183,51,197203	10173002	5.0+05	3.0+07	432
Stoler73	P.Stoler	J,PR/C,8,1539,197310	10335003	2.2+04	9.9+05	446
Phillips80	T.W.Phillips	J,PR/C,22,384,8008	10945003	7.1+04	4.3+07	71
Poss52	H.L.Poss	J,PR,87,11,52	11053003	1.4+07	1.4+07	1
Adair53	R.K.Adair	J,PR,89,1165,5303	11061002	2.6+05	3.0+06	9
Zimmerman53	C.L.Zimmerman	J,PR,90,339(C5),5304	11063002	1.0+05	1.3+06	4
Seagrave55	J.D.Seagrave	J,PR,98,666,5505	11086002	2.7+05	2.2+07	29
Nuckolls46	R.G.Nuckolls	J,PR,70,805,4612	11142002	3.5+05	6.0+06	15
Dratenahl58	A.Bratenahl	J,PR,110,927,5805	11155003	7.2+06	1.4+07	5
Meyer51	D.I.Meyer	R,LA-1279,5107	12641003	1.4+07	1.4+07	1
Hibdon50	C.T.Hibdon	J,PR,79,747,5009	13041003	1.2+02	3.5+02	2
Gul79	K.Gul	C,79KNOX,,39(AB2),7910	30538005	1.5+07	1.5+07	1

8.2. Сечение упругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
				от	до	
Seagrave72	J.D.Seagrave,	J,AP,74,250,1972	10159010	5.6+06	2.3+07	7
Wantuch51	E.Wantuch	J,PR,84,169,51	11050002	4.5+06	5.5+06	2
Allerd53	J.C.Allred,	J,PR,91,90,5307	11066004	1.4+07	1.4+07	1
Seagrave55	J.D.Seagrave	J,PR,97,757,5502	11084003	1.4+07	1.4+07	1
Berick68	A.C.Berick,	J,PR,174,1105,68	11126003	1.4+07	1.4+07	1
Koori72	N.Koori	J,JPJ,32,306,7202	20332002	1.4+07	1.4+07	1
Shirato68	S.Shirato,	J,NP/A,120,387,6811	20334002	1.4+07	1.4+07	1
Verdenne66	G.Vedrenne	J,JPR/C,27,(1),71,6603	21148022	1.4+07	1.4+07	1
Bruellmann68	M.Bruellmann,	J,HPA,41,435,6804	21173003	1.4+07	1.4+07	1
Chatelain79	P.Chatelain,	J,NP/A,319,1,71,790430	21623004	2.5+06	3.3+06	2

Ageno47	M.Ageno,	J,PR,71,20,47	21787003	4.1+06	1.4+07	3
Schwarz83	P.Schwarz,	J,NP/A,398,(1),1,8304	21845003	2.5+06	3.0+07	20
Gul79	K.Gul,	C,79KNOX,,39(AB2),7910	30538004	1.5+07	1.5+07	1
Guanren90	Shen Guanren,	J,CNP,12,(3),241,9008	30997002	1.4+07	1.5+07	2

8.3. Сечение реакции (n,2n)

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
				от	до	
Graves71	E.R.Graves,	R,NCSAC-42,158,7111	10970002	1.4+07	1.4+07	1
Ashby58	V.J.Ashby,	J,PR,111,616,58	11097003	1.4+07	1.4+07	1
Catron61	H.C.Catron,	J,PR,123,218,61	11111002	6.1+06	1.0+07	5
Holmberg69	M.Holmberg	J,NP/A,129,327,6912	20068002	4.1+06	6.6+06	8
Koori72	N.Koori	J,JPJ,32,306,7202	20332004	1.4+07	1.4+07	1
Shirato68	S.Shirato,	J,NP/A,120,387,6811	20334005	1.4+07	1.4+07	1
Verdenne66	G.Vedrenne	J,JPR/C,27,(1),71,6603	21148025	1.4+07	1.4+07	1
Frehaut85	J.Frehaut,	C,85SANTA,,(IB06),85	21971002	7.4+06	1.5+07	16
Pauletta75	G.Pauletta,	J,NP/A,255,267,7512	30331002	8.2+06	2.2+07	11
Gul79	K.Gul,	J,JP/G,5,(8),1107,7908	30470004	1.5+07	1.5+07	1

8.4.Сечение радиационного захвата

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
				от	до	
Mitev86	G.Mitev,	J,PR/C,34,389,8608	13121003	6.9+06	1.4+07	4
Cerineo61	M.Cerineo,	J,PR,124,(6),1947,1961	30005003	1.4+07	1.4+07	1
Moester86	J.Moesner,	J,FBS,1,83,86	30973002	2.5+07	2.5+07	1

8.5. Анизотропия упругого рассеяния

Указатель	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число точек
				от	до	
Seagrave72	J.D.Seagrave,	J,AP,74,250,1972	10159010	5.6+06	2.3+07	7
Wantuch51	E.Wantuch	J,PR,84,169,51	11050002	4.5+06	5.5+06	2
Allerd53	J.C.Allred,	J,PR,91,90,5307	11066004	1.4+07	1.4+07	1
Seagrave55	J.D.Seagrave	J,PR,97,757,5502	11084003	1.4+07	1.4+07	1
Berick68	A.C.Berick,	J,PR,174,1105,68	11126003	1.4+07	1.4+07	1
Koori72	N.Koori	J,JPJ,32,306,7202	20332002	1.4+07	1.4+07	1
Shirato68	S.Shirato,	J,NP/A,120,387,6811	20334002	1.4+07	1.4+07	1
Verdenne66	G.Vedrenne	J,JPR/C,27,(1),71,6603	21148022	1.4+07	1.4+07	1
Bruellmann68	M.Bruellmann,	J,HPA,41,435,6804	21173003	1.4+07	1.4+07	1
Chatelain79	P.Chatelain,	J,NP/A,319,1,71,790430	21623004	2.5+06	3.3+06	2
Ageno47	M.Ageno,	J,PR,71,20,47	21787003	4.1+06	1.4+07	3
Schwarz83	P.Schwarz,	J,NP/A,398,(1),1,8304	21845003	2.5+06	3.0+07	20
Gul79	K.Gul,	C,79KNOX,,39(AB2),7910	30538004	1.5+07	1.5+07	1
Guanren90	Shen Guanren,	J,CNP,12,(3),241,9008	30997002	1.4+07	1.5+07	2

9. Заключение

9.1 Выводы.

Файл оцененных данных, принятый в РОСФОНД, несколько отличается от файла, содержащегося в ENDF/B-VI и принятого в ENDF/B-VII. Отличия состоят в следующем.

1. Сечение упругого рассеяния ниже 100 эВ постоянно и равно 3.3900 барн. Полное сечение в этой области определено как сумма сечений упругого рассеяния и радиационного захвата.
2. Полное сечение от 100 эВ до 50кэВ принято из оценки Николаева и др. из библиотеки БРОНД-2.
3. Полное сечение от 50 кэВ до 600 кэВ принято в соответствии с настоящей оценкой.
4. Сечение радиационного захвата в области энергии ниже 1 кэВ задано в том же числе точек, что и полное сечение. Закон интерполяции везде – дважды логарифмический.
5. Устранен ряд мелких ошибок в задании значения энергии.
6. Уточнены энергии реакций (n,2n): $Q=2.224566\text{E}+6$ и (n, γ): $Q=6.257232\text{E}+6$. Соответственно изменен порог реакции (n,2n) и энергия фотона, испускаемого при радиационном захвате.
7. Энерго-угловые распределения нейтронов реакции (n,2n) приняты в соответствии с оценкой Николаева и др. из библиотеки БРОНД.
8. В файле MF=3 исключены секции MT=204 и MT=205 повторяющие уже содержащиеся в файле данные.
9. Исключены файлы MF=8 и MF=9.
10. Файлу присвоен номер MAT=102.

9.2. Тепловые и интегральные сечения

Реакция	$\sigma(0.0253 \text{ эВ})$	RI	$\langle\sigma\rangle$ спектр Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$
Упругое рассеяние	3.3900 б	41.172 б	2.5324 б
Рад. захват	0.515 мб	0.2416 мб	0.007 мб
Реакция (n,2n)	0	0	5.797 мб

9.3. Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ
Ковариационные матрицы погрешностей нейтронных данных для дейтерия
(30-групповое представление)

3. Погрешности полного сечения и коэффициенты корреляции между ними

4.

№ группы	Погреш-ность, %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15-30
1	1.4	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.2	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.4	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	1.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	1.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	1.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	1.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	1.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	1.00	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	1.00	0.88	0.57	0.35	0.25	0.20	0.18
10	0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	1.00	0.89	0.76	0.68	0.65	0.63
11	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.89	1.00	0.97	0.94	0.92	0.91
12	0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.76	0.97	1.00	0.99	0.98	0.97
13	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.68	0.94	0.99	1.00	1.00	1.00
14	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.65	0.92	0.98	1.00	1.00	1.00
15-30	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.63	0.91	0.97	1.00	1.00	1.00

2. Погрешности сечения реакции (n,2n) и коэффициенты корреляции между ними

№ группы	Погрешн., %	1	2	3
1	5	1.00	0.50	0.00
2	5	0.50	1.00	0.80
3	5	0.00	0.80	1.00

5. Погрешности сечения радиационного захвата и коэффициенты корреляции между ними

	,%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19-30
1	10	1.00	0.50	0.30	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
2	20	0.50	1.00	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
3	20	0.30	0.70	1.00	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
4	30	0.10	0.60	0.70	1.00	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5	30	0.00	0.50	0.60	0.70	1.00	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	40	0.00	0.40	0.50	0.60	0.70	1.00	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	50	0.00	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	1.00	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	50	0.00	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	1.00	0.50	0.30	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	50	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.00	0.50	1.00	0.50	0.30	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	50	0.00	0.00	0.00	0.20	0.30	0.40	0.00	0.30	0.50	1.00	0.50	0.30	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.30	0.00	0.20	0.30	0.50	1.00	0.50	0.30	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
12	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.10	0.20	0.30	0.50	1.00	0.50	0.30	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00
13	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20	0.30	0.50	1.00	0.50	0.30	0.20	0.10	0.00	0.00
14	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20	0.30	0.50	1.00	0.50	0.30	0.20	0.10	0.00
15	40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20	0.30	0.50	1.00	0.50	0.30	0.20	0.10
16	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20	0.30	0.50	1.00	0.70	0.50	0.20
17	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20	0.30	0.70	1.00	0.90	0.80
18	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20	0.50	0.90	1.00	1.00
19-30	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20	0.80	1.00	1.00

4. Погрешности среднегрупповых значений среднего косинуса угла упругого рассеяния в системе центра инерции и коэффициенты корреляции между ними

№ группы	погр.,%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-30
1	26	1.00	0.70	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	80	0.70	1.00	0.50	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	80	0.20	0.5	1.00	0.30	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	60	0.00	0.1	0.30	1.00	0.40	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
5	35	0.00	0.00	0.10	0.40	1.00	0.30	0.10	0.00	0.00	0.00
6	40	0.00	0.00	0.00	0.10	0.30	1.00	0.30	0.10	0.10	0.10
7	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.30	1.00	0.60	0.40	0.40
8	60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.60	1.00	0.80	0.80
9	60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.40	0.80	1.00	1.00
10-30	60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.40	0.80	1.00	1.00

1.3. Тритий

1. Нейтронные сечения

Полные наборы оцененных нейтронных данных для трития содержатся в библиотеках ФОНД-2.2 (оценка 1988 г., принятая и в БРОНД-2), в ENDF-B-VII.b1 (оценка 1965 г., взятая из ENDF/B-V) и в CENDL-2 (оценка 1991 г., взятая и в JEFF-3.1). В ENDF/B-VII.0 включена новая оценка Хэйла (G.M.Hale-2001). Эта оценка основана на R-матричном анализе данных по рассеянию протонов на ^3He с учетом того, что составное ядро ^4Li отличается от составного ядра 4H , образующегося при n-t-рассеянии, кулоновским сдвигом энергетическим собственными чисел на 0.86 МэВ. Полученные R-матричные параметры использовались для расчета полного сечения и угловых распределений.

Все оценки содержат данные о полном сечении, сечении упругого рассеяния и реакции (n,2n). Сечение реакции (n,2n) содержится также в EAF-99. Хэйл отмечает, что его оценка сечения этой реакции, вероятно, несколько завышена. В оценках из ФОНД-2.2 и CENDL-2 приводятся также данные о реакции (n,3n). Хэйл отмечает, что из его анализа следует, что сечение этой реакции должно быть равно нулю.

Все оценки сечений реакций (n,2n) и (n, 3n), кроме оценки Хэйла, основаны на результатах работ^{31, 32}. Оценки полного сечения основаны на результатах работы³³, на которую ссылается и Хэйл. Энергетические зависимости сечений приведены на Рис. 1, 2 и 3. На рис. 1 кроме данных Филиппса, на которой основаны результаты большинства оценок, приведены результаты более поздней работы Кирилюка, выполненной с низким разрешением на фильтрованных пучках. По расхождению этих результатов можно судить о погрешностях полного сечения.

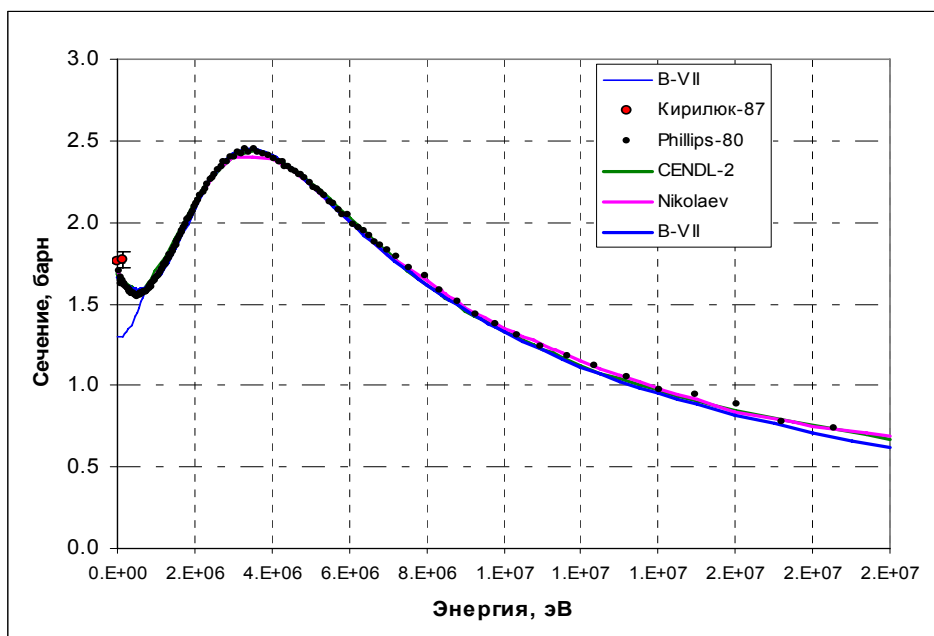


Рис. 1а. Полное сечение трития.

³¹ Mather D.S., Pain L.F. PR/B, 133, 1403(1964) EXFOR 20794.

³² Aldacic et al. PRL et.14, 144(1965) EXFOR 30131.

³³ Phillips T.W., Berman B.L., Seagrave J.D. PR/C, 22, 384.(1980) EXFOR 10945.

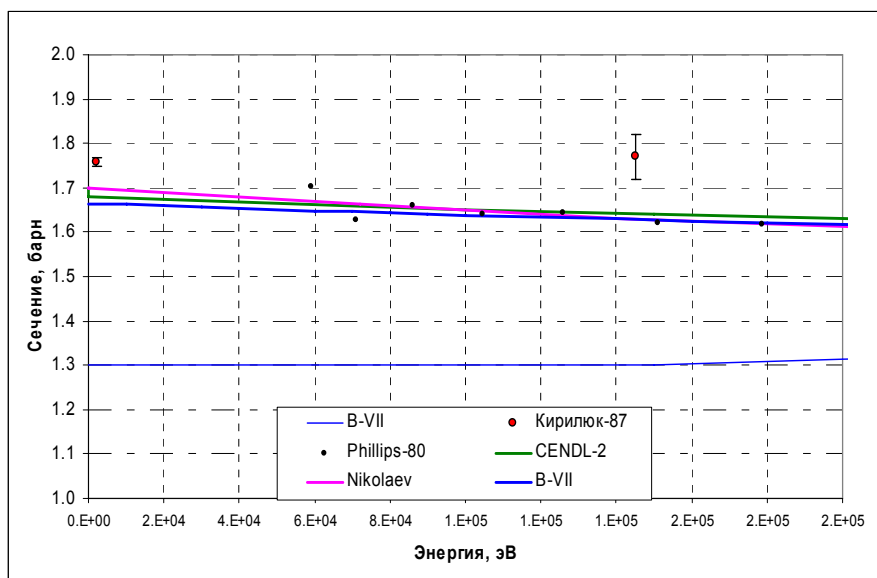


Рис. 16. Полное сечение трития при низких энергиях.

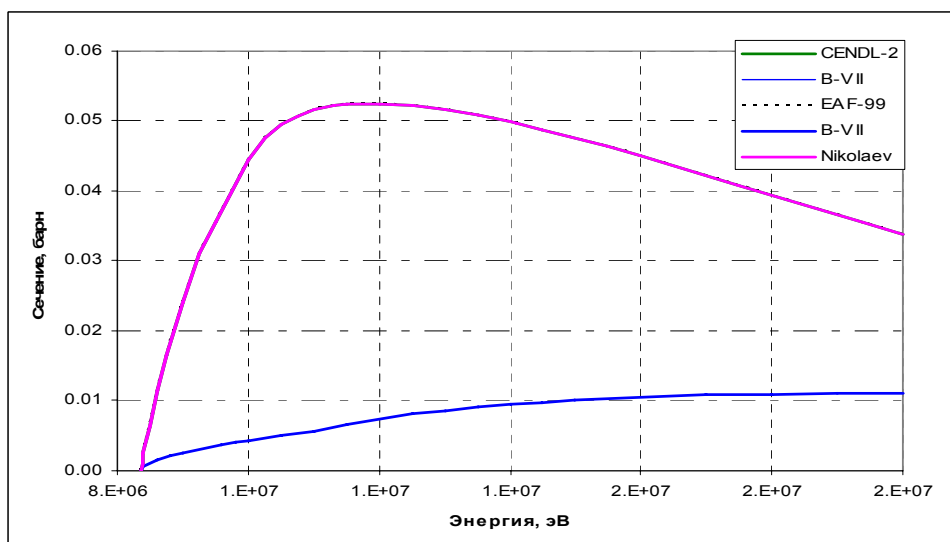


Рис. 2. Сечение реакции $(n,2n)D$

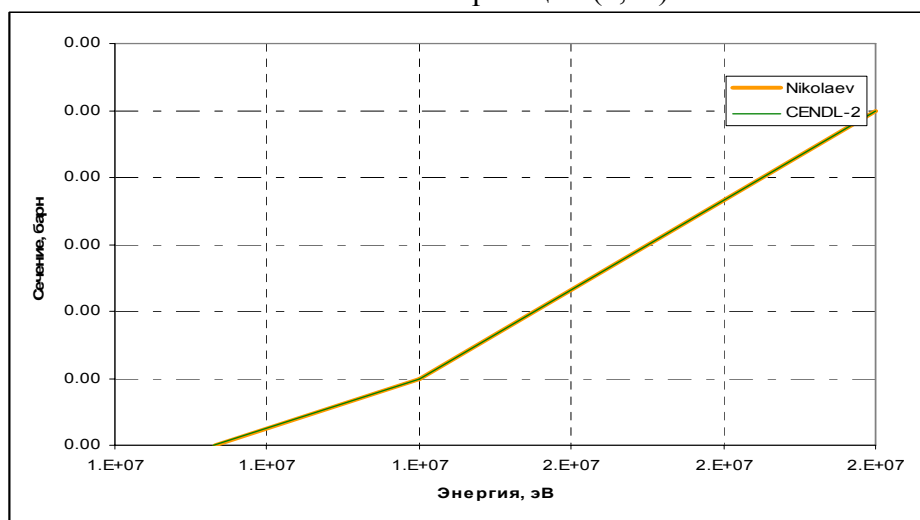


Рис. 3. Сечение реакции $(n,3n)H$

2. Энерго-угловые распределения

Угловые распределения упруго- рассеянных нейтронов в оценке, принятой в ФОНД-2.2, даны в форме разложения по полиномам Лежандра, тогда как в двух других оценках угловые распределения заданы поточечно, что затрудняет сравнение данных.

Полные энерго-угловые распределения продуктов реакций $(n,2n)D$ и $(n,3n)H$ даны только в оценке, содержащейся в библиотеке ФОНД-2.2.

3. Погрешности.

В библиотеке CENDL-2 в формате файла MF=33 содержатся оценки погрешностей нейтронных сечений. Поскольку надежность этих оценок не установлена, они (как и для других материалов) в РОСФОНД не включаются.

4. Заключение

4.1. Выводы:

Новая экспериментальная информация не дает оснований для пересмотра оцененных нейтронных данных. Новая теоретическая оценка, выполненная Хэйлом для ENDF/B-VII, согласуясь с экспериментальными данными по полному сечению гораздо лучше, чем ENDF/B-VI, все же существенно с ними расходится. Кардинально изменена и оценка сечения реакции $(n,2n)$. Едва ли можно считать, что расчеты Хэйла дезавуируют экспериментальные данные Филиппса. Поэтому в РОСФОНД принята прежняя оценка, содержавшаяся в библиотеках ФОНД-2.2 и БРОНД-2.

4.2. Тепловые и интегральные сечения

Реакция	$\sigma(0.0253 \text{ эВ})$	RI	$\langle\sigma\rangle$ спектр Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$
Упругое рассеяние	1.700 б	20.70 б	1.935 б
Реакция $(n,2n)$	0	0	0.1935 мб
Реакция $(n,3n)$	0	0	0.091 микробарн

4.3. Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.