

8. КИСЛОРОД

Общие замечания.

Природный кислород содержит три стабильных изотопа в следующих атомарных концентрациях:

 $^{16}\text{O} - 99.762\%$ $^{17}\text{O} - 0.038\%$ $^{18}\text{O} - 0.2\%$

Долгоживущих радиоактивных изотопов кислорода не существует

8.1. Кислород-16

Для основного изотопа кислорода - ^{16}O – используются четыре различных оценки:

1. **Оценка Янга, Хэйла, Чедвика, Каро и Любича** (P.G. Young, G.M. Hale, M.B.Chadwick (LANL), E.Caro, C.R. Lubitz (KAPL)), выполненная в 2001 г. используется в первых версиях американской библиотеки ENDF/B-VII и европейской библиотеки JEFF-3.1¹.
2. **Оценка Шибата и др** (K.Shibata (JAERI)), основательно пересмотренная в 2002 г. , используется в японской библиотеке JENDF-3.3.
3. **Оценка Хейла, Чена и Янга** (G.Hale, Z.Chen, P. Young), выполненная в 1990 г. для первой версии библиотеки ENDF/B-VI, используется в библиотеке ФОНД-2.2.
4. **Оценка Тингджина и Джанфенга** (Liu Tingjin, Liu Janfeng) , выполненная в 1992 г., используется в китайской библиотеке CENDL-2.

1. Общие характеристики

- | | |
|------|--|
| 1.1. | $Z=8$ |
| 1.2. | $A=15.99491462$ |
| 1.3. | $A_w=15.85751 \quad 1.585751+1$ |
| 1.4. | <u>Содержание в естественной смеси:</u> 99.762 ат%; 99.735 вес% |

¹ В окончательной редакции библиотеки ENDF/B-VII в этой оценке откорректировано сечение реакции (n,α), что будет отмечено в соответствующем разделе ниже.

1.5. Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Энергия реакции, Q, МэВ | | E _{порог.} , эВ | | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| | | В файле ENDF/B-VII | По данным Работы ² | В файле ENDF/B-VII | По данным работы ¹ | |
| 16 | (n,2n) | -15.6638 | -15.66392 | 16.651600 | 16.651710 | O15, 122.24с |
| 22 | (n,n α) | -7.16195 | -7.16192 | 7.613591 | 7.613559 | C-12 |
| 23 | (n,n3 α) | -14.43676 | -14.43666 | 15.347170 | 15.347060 | He-4 |
| 28 | (n,np) | -12.1276 | -12.12741 | 12.892350 | 12.892180 | N-15 |
| 102 | (n, γ) | 4.1432343 | 4.1431292 | | | O-17 |
| 103 | (n,p) | -9.6368 | -9.63831 | 10.244510 | 10.246120 | N-16, 4.173с |
| 104 | (n,d) | -9.903 | -9.90284 | 10.527500 | 10.527330 | N-15 |
| 105 | (n,t) | -14.479 | -14.47891 | 15.392070 | 15.391970 | N-14 |
| 107 | (n, α) | -2.2143 | -2.21561 | 2.355319 | 2.355331 | C-13 |
| 108 | (n,2 α) | -12.8632 | -12.86316 | 13.674350 | 13.674330 | Be-9 |

*) Для радиоактивных продуктов реакций указан период полураспада

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файле оцененных данных, принятом за основу при отборе данных для библиотеки РОСФОНД, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций ($E_{\text{пор}} = Q \cdot (AWR + 1) / AWR$) во всех случаях кроме реакции (n, α), в которой для согласования с энергией порога энергия должна быть указана равной **2.21560 МэВ**, что соответствует данным рекомендации¹. В файл ранних РОСФОНД это исправление внесено.

Для остальных реакций различия в Q не превышают 0.16% (для реакции (n,p)), а как правило, на порядок ниже. Никакой корректировки этих данных при формировании файла РОСФОНД не производилось.

1.6. Радиоактивность: изотоп не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^{\pi} = 0^{+}$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.5562563$ ферми.

2.3. Резонансные параметры не приводятся (сечения во всей области энергий заданы поточно)

2.4. Область неразрешенных резонансов отсутствует

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

На рис. 1 показан энергетический ход полного сечения и всех его составляющих (по данным ENDF/B-VII). Не виден лишь вклад сечения радиационного захвата, который, согласно принятой в названной библиотеке оценке, пренебрежимо мал во всей рассматриваемой энергетической области. Сечение упругого рассеяния, являющееся разностью между полным сечением и суммой сечений всех неупругих взаимодействий, не изображено. Обсуждение будет вестись по энергетическим областям и, порой, по реакциям.

² G.Audi, A.H.Wapstra and C.Thibault, Nucl. Phys. A729, p. 337-676, December 22, 2003

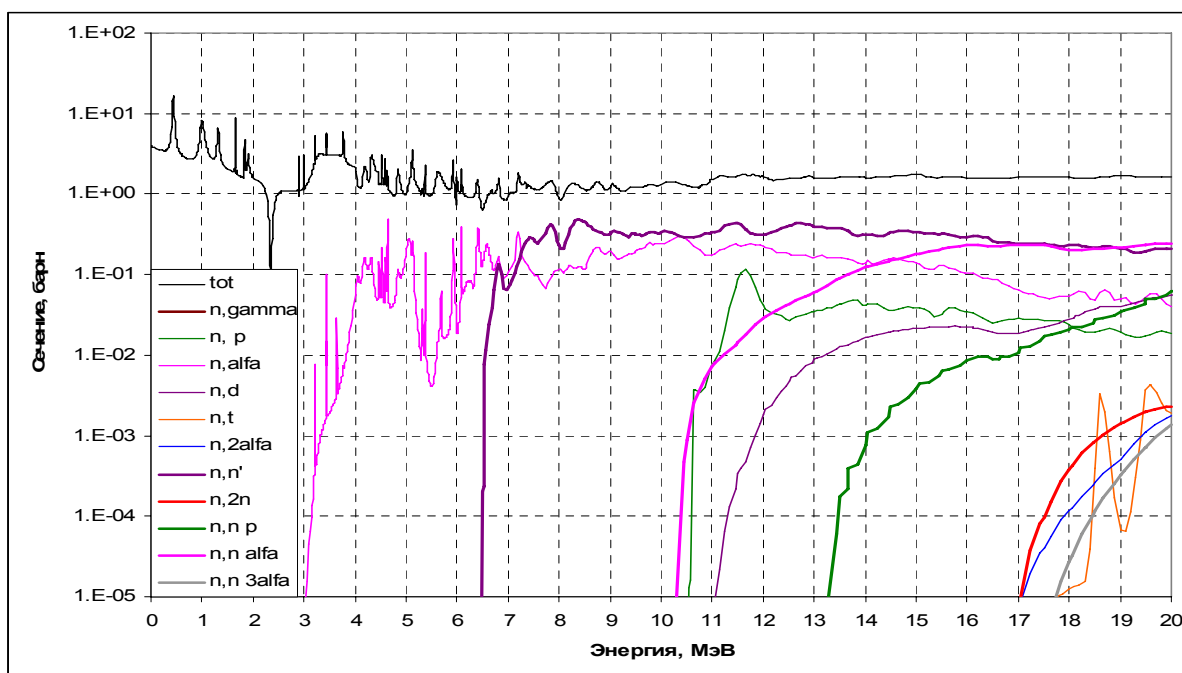


Рисунок 1. Нейтронные сечения ^{16}O

3.1 Сечения в области низких энергий (ниже 0.1 эВ)

В области низких энергий возможны лишь два процесса взаимодействия нейтронов с кислородом – радиационный захват и упругое рассеяние. В Таблице 1 приведены значения сечений этих процессов, принятые в различных оценках.

Таблица 1. Тепловые сечения

| Процесс | ENDF/B-VII | JENDL-3.3 | ФОНД-2.2 | Mughabghab |
|----------------|----------------|------------|----------|---------------------------|
| Упр. рассеяние | 3.85181 | 3.78000 | 3.8830 | 3.761 ± 0.006^3 |
| Рад. захват | 0.000189866 | 0.00018987 | 0.00019 | 0.000190 ± 0.000019^4 |
| Полное сечение | 3.85200 | 3.78019 | 3.8849 | |

Заметим, что повышение полного сечения с 3.76 барн до 3.85 барн и выше оправдывается экспериментальными данными W.Ohkuba⁵, измерявшим сечение в диапазоне от 79 эВ до 1 МэВ. Учет результатов этого эксперимента при оценке полного сечения не мог не привести к увеличению оцененного полного сечения в тепловой области энергий.

Сечение захвата в рассматриваемой области энергий подчиняется закону $1/v$. Что касается сечения упругого рассеяния, то в оценке, принятой в ENDF/B-VII, оно в этой области резко меняется от 3.852 барна при 0.1 МэВ до 3.842 барна при 10^{-5} эВ, так что полное сечение сохраняется практически постоянным и равным 3.852 барна. Поскольку оснований для предположения об изменении сечения упругого рассеяния на несвязанных покоящихся ядрах кислорода не имеется, в РОСФОНДе сечение упругого рассеяния при низких энергиях принято постоянным, а полное сечение получено суммированием сечений рассеяния и захвата.

³ S.F.Mughabghab, N.Divadeenam, N.E.Holden, Neutron Resonsnce Parameters and Thermal Cross Sections. Vol.1 Part.A. Academic Press, 1981.

⁴ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and G-factors. INDC(NDS)-440, Feb. 2003.

⁵ EXFOR Subent 21926, 1985.

3.2. Сечение захвата.

Как отмечалось, в ENDF/B-VII сечение захвата во всем энергетическом диапазоне подчиняется закону $1/v$. В JENDL-3.3 энергетический ход сечения захвата много сложнее (см. Рис. 2). Резонансный характер сечения радиационного захвата, разумеется, не является неожиданным, однако оснований для приписывания резонансам определенных радиационных ширин до недавнего времени не имелось. Такие основания появились благодаря эксперименту Игашира и др.⁶, в котором были измерены сечения радиационного захвата на широких спектрах со средними энергиями 20, 40, 60 и 280 кэВ. Из вида кривой, показанной на графике, ясно, что это результат качественной оценки, направленной на описание экспериментальных данных, а не результат модельного расчета.

Несмотря на это, учитывая огромное различие в принятых сечениях захвата быстрых нейтронов и выявление в оценке JENDL-3.3 определяющей роли поглощения нейтронов с орбитальным моментом $l=1$, целесообразно принять в РОСФОНД ход сечения захвата из этой оценки.

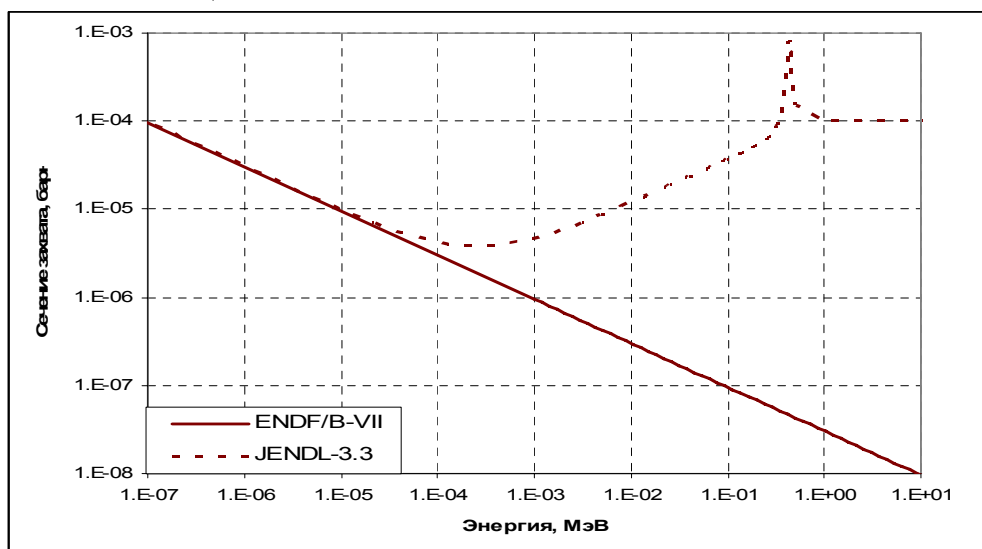


Рисунок 2. Сечение радиационного захвата ^{16}O

3.3. Полное сечение

На серии рисунков 3 значения полного сечения в области низколежащих резонансов (ниже 2.5 МэВ), принятые в рассматриваемых оценках, сравниваются с экспериментальными данными. В этом интервале структура сечений определяется s-резонансом при 2350 кэВ, который в результате интерференции с потенциальным рассеянием привел к глубокому и широкому минимуму в полном сечении, четырем p-резонансам при 434, 1310, 1830 и 1910 кэВ, двум d-резонансам при 1000 и 1830 кэВ и двум f-резонансам при 1650 и 1690 кэВ. Оцененные данные ENDF/B-VII и JENDL-3.3 в этой области удовлетворительно согласуются между собой и с экспериментальными данными со следующими исключениями:

- слабый резонанс при 1690 кэВ в JENDL-3.3 отсутствует, а в ENDF/B-VII он выражен слабее, чем это следует из данных Foulер-73;

⁶ M.Igashira et al, J,AJ,441,(L),89,199510; EXFOR Subent 22356. 1995.

- б) сечение в интерференционном минимуме в JENDL-3.3, равное 0.159 барна, существенно превышает значение, принятое в ENDF/B-VII (0.111 барна) и результаты специальных измерений сечений в минимуме (см. рис.3г):

Kalina-73 – 0.097 ± 0.009 барн;

Johnson-80- 0.111 ± 0.002 барн;

Larson-80 – 0.133 ± 0.017 барн.

Учитывая, что значение сечения в минимуме определяющим образом сказывается на проникающую способность водородсодержащих материалов, и, в частности, воды, завышение этого сечения в JENDL-3.3 представляется серьезным недостатком этой оценки.

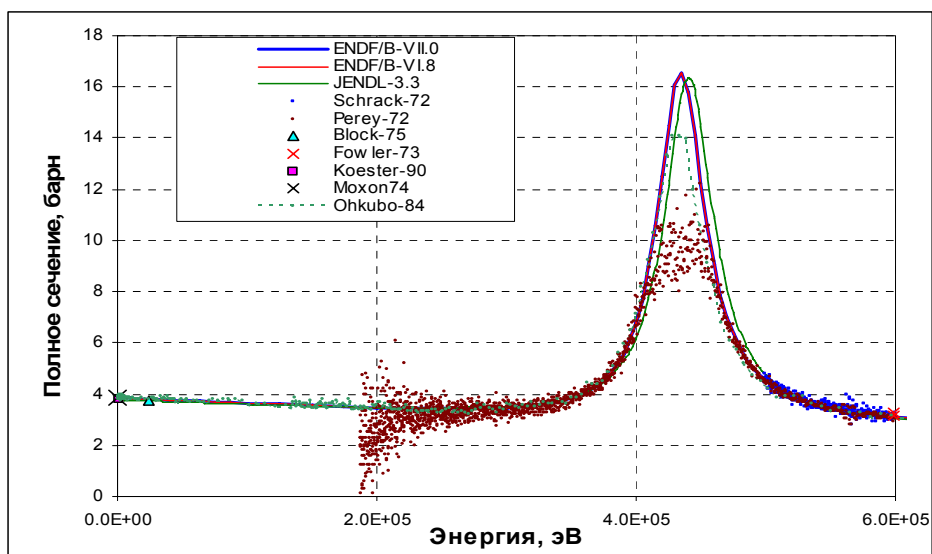


Рисунок 3а. Полное сечение O-16 до 600 кэВ.

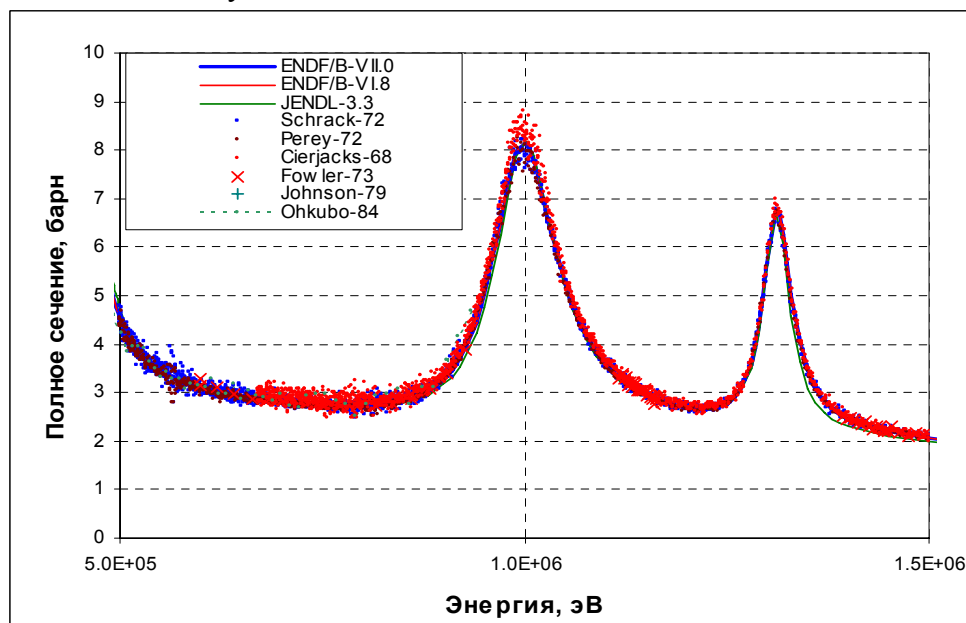


Рисунок 3б. Полное сечение O-16 от 0.5 до 1.5 МэВ.

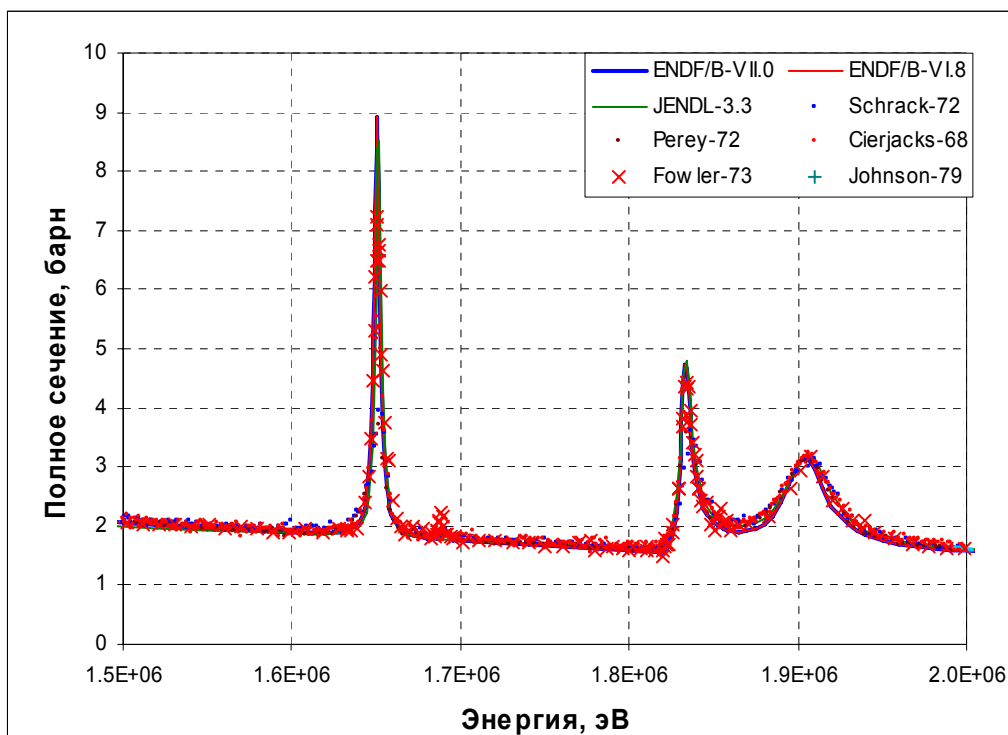


Рисунок 3в. Полное сечение O-16 от 1.5 до 2.0 МэВ.

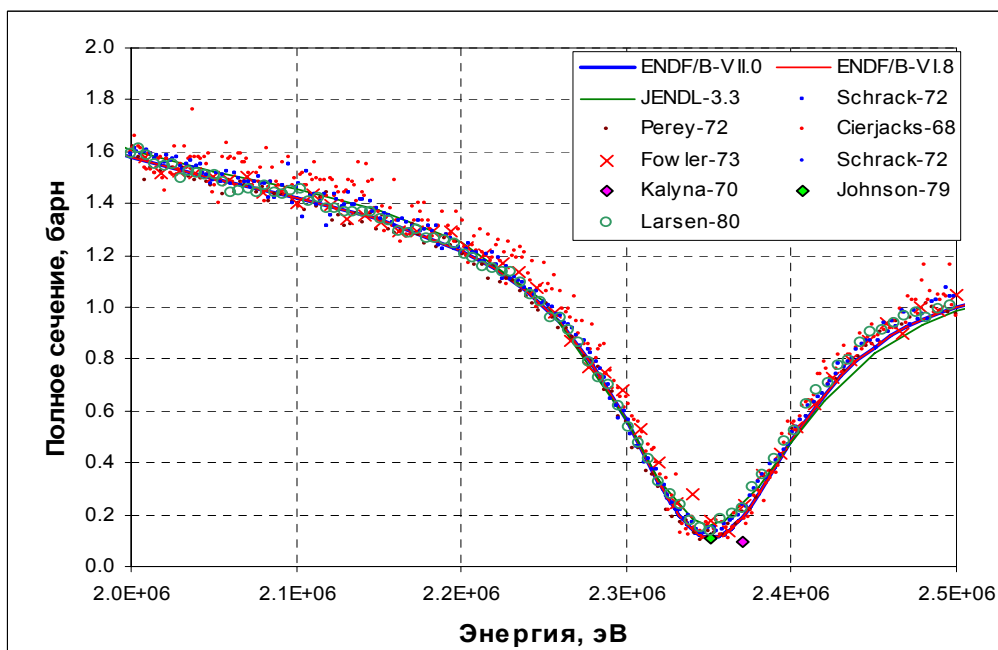


Рисунок 3г. Полное сечение O-16 от 2.0 до 2.5 МэВ.

На рис.4 оцененные данные сравниваются с результатами измерений в области 2.5 – 7.5 эВ, содержащей большое число резонансов, в том числе весьма узких. Для того, чтобы можно было видеть данные в окрестности этих узких резонансов на сериях рисунков 5 и 6 экспериментальные и оцененные данные представлены с высоким энергетическим разрешением. На последних рисунках результаты оценки, принятой в ENDF/B-VII.0, совпадающие с результатом предыдущей оценки, не приводятся.

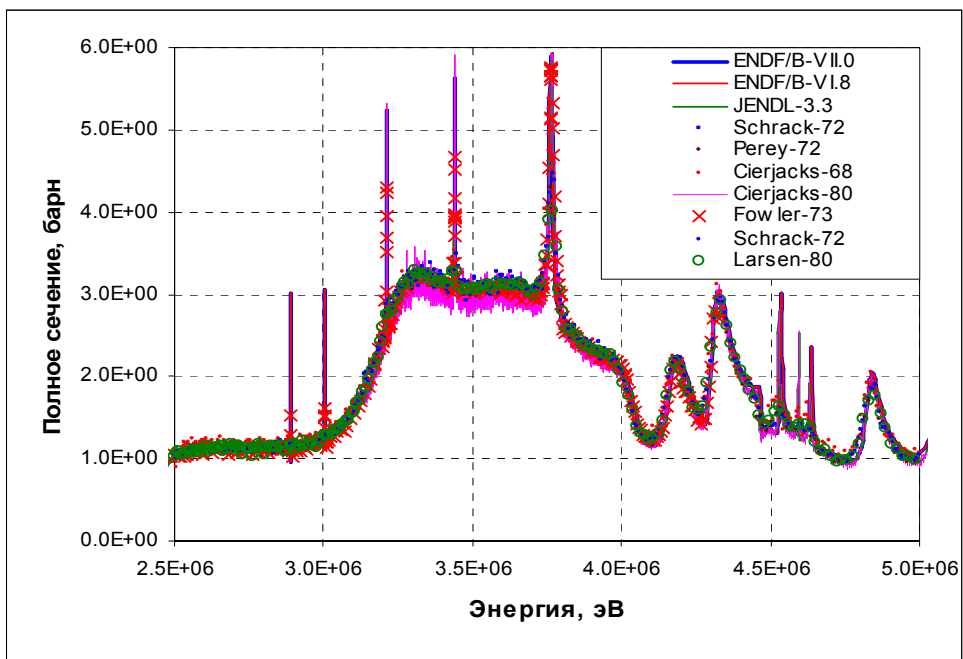


Рисунок 4а. Полное сечение O-16 от 2.5 до 5 МэВ.

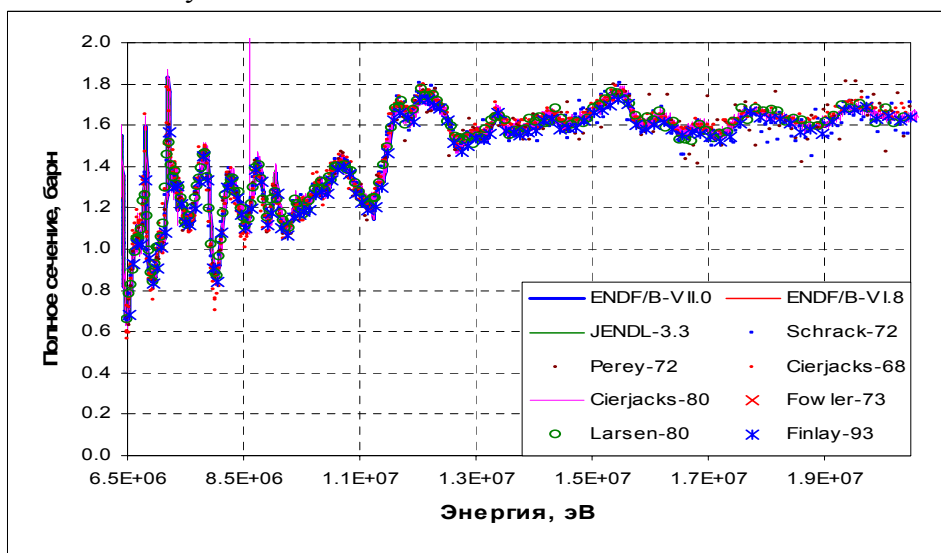


Рисунок 4б. Полное сечение O-16 от 6.5 до 20 МэВ.

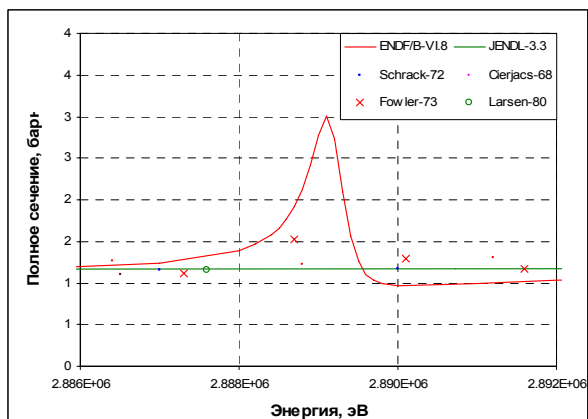


Рисунок 5а. Полное сечение O-16.

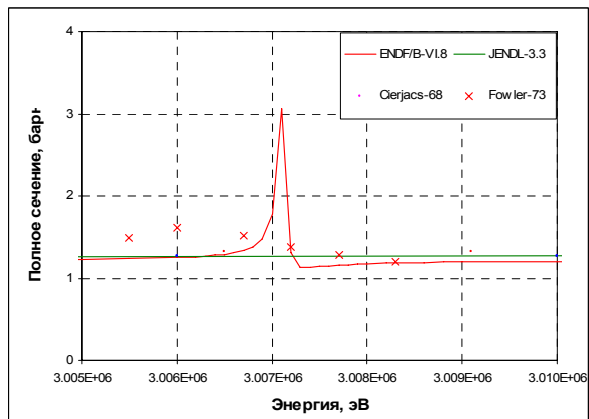


Рисунок 5б. Полное сечение O-16.

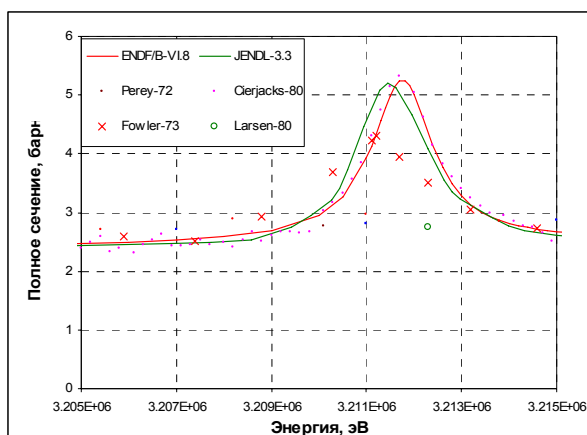


Рисунок 5в. Полное сечение O-16.

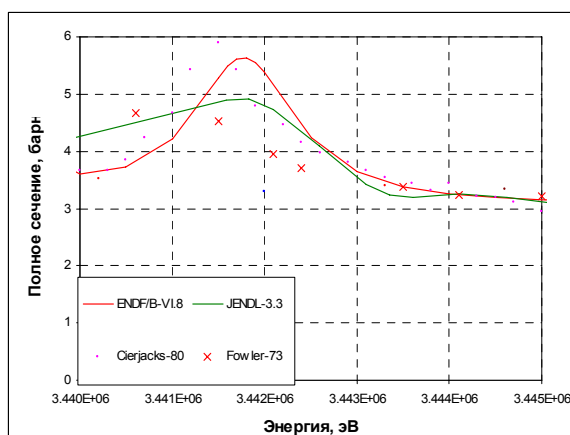


Рисунок 5г. Полное сечение O-16.

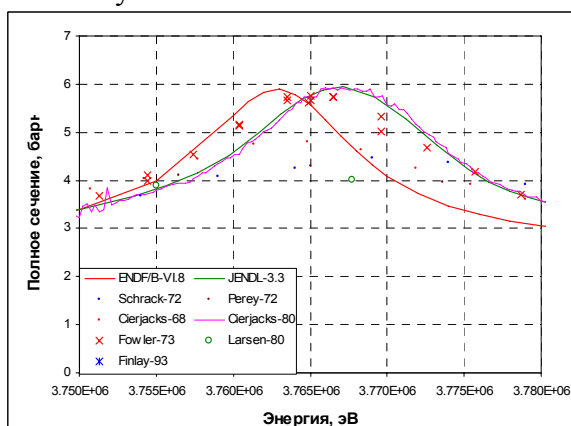


Рисунок 6а. Полное сечение O-16.

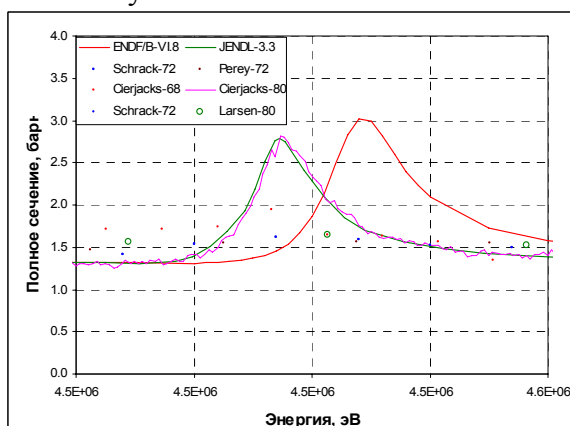


Рисунок 6б. Полное сечение O-16.

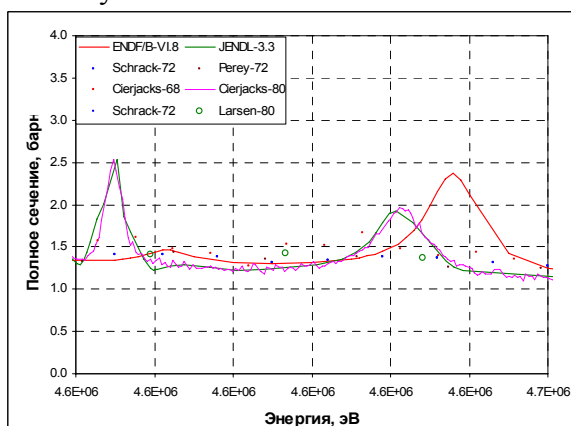


Рисунок 6в. Полное сечение O-16.

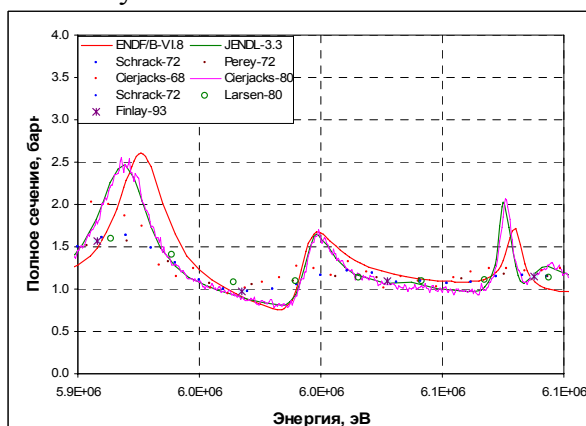


Рисунок 6г. Полное сечение O-16.

Отметим, что в заголовочной секции оценки, принятой в ENDF/B-VII, утверждается, что полное сечение ниже 3.4 МэВ оценивалось путем подбора параметров R-функции по совокупность данных, перечисленных в работе Каро⁷, тогда как в интервале от 3.4 до 6.25 МэВ использовалась R-матричная параметризация экспериментальных данных, выполненная в Лос-Аламосе (в интервале шириной 60 кэВ около 3.4 МэВ эти оценки были сшиты). При более высоких энергиях все сечения оценивались на основе комбинации анализа совокупности экспериментальных и расчетных данных. Сравнение данных, однако, показывает, что оцененные данные по

⁷ E. Caro, "O16 Neutron Cross Section Evaluation", Proceedings of the International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology, Long Island, N.Y., Oct.5-8, 1998

полному сечению в файлах, включенных в ENDF/B-VI.0 и в ENDF/B-VII ниже 7.6 МэВ совершенно идентичны.

В JENDL-3.3 использованы результаты R-матричного анализа, выполненного в 2001 г. Шибата специально для этой библиотеки.

Серия рисунков 5 показывает, что ниже 3.4 МэВ в оценке, принятой в ENDF/B-VII, проявляется несколько узких резонансов, отсутствующих в оценке Шибата. Это свидетельствует об использовании дополнительного экспериментального материала, не включенного в базу данных EXFOR и не учитывающегося Шибата. Таким образом при энергиях ниже 3.4 МэВ оценка, принятая в ENDF/B-VII, имеет очевидные преимущества перед оценкой Шибата. Однако в интервале от 3.4 до 6.5 МэВ, где принята параметризация сечений, выполненная в Лос-Аламосе, полное сечение, полученное Шибата значительно лучше соответствует детальным экспериментальным данным Сериякса, полученным в 1980 г., т.е. после выполнения оценки Хейлом, Ченом и Янгом. Серия рисунков 6 показывает, что в области от 3.4 до 6.5 МэВ узкие резонансы в оценке Шибата много лучше соответствуют эксперименту Сериякса, чем более ранняя оценка, выполненная в Лос-Аламосе. В этой области принять оценку Шибата было бы целесообразно. Однако, следует иметь в виду, что в рассматриваемом энергетическом интервале заметный вклад в полное сечение обусловлен реакцией (n, α), резонансная структура которой должна соответствовать структуре полного сечения. Вопрос об этом соответствии будет обсужден ниже в разделе 3.4.

На Рис.7 обсуждаемые оцененные данные сравниваются с экспериментальными результатами в области энергий выше 6.5 МэВ. Обе оценки прекрасно согласуются с экспериментами последних лет⁸, и практически совпадают друг с другом (см. рис. 8). В этой области может быть принята любая из оценок.

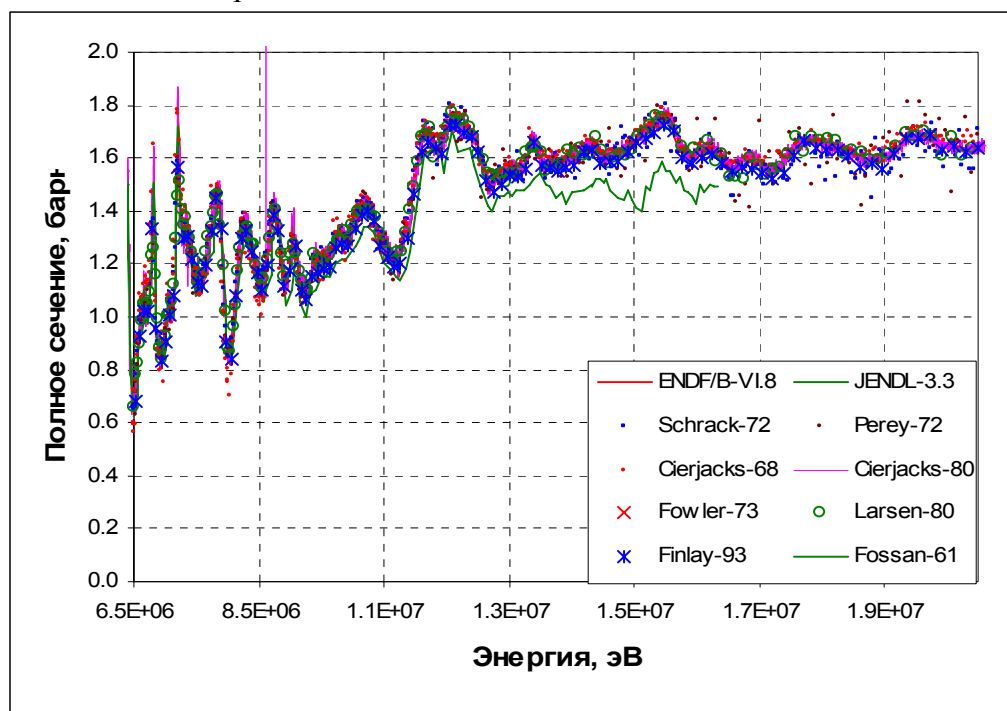


Рисунок 7. Сравнение оцененных полных сечений O-16 с экспериментальными данными выше 6.5 МэВ.

⁸ Пик при 8.61 МэВ, видный в данных Cierjacks-80, является следствием ошибки в значении сечения, занесенном в EXFOR при этой энергии.

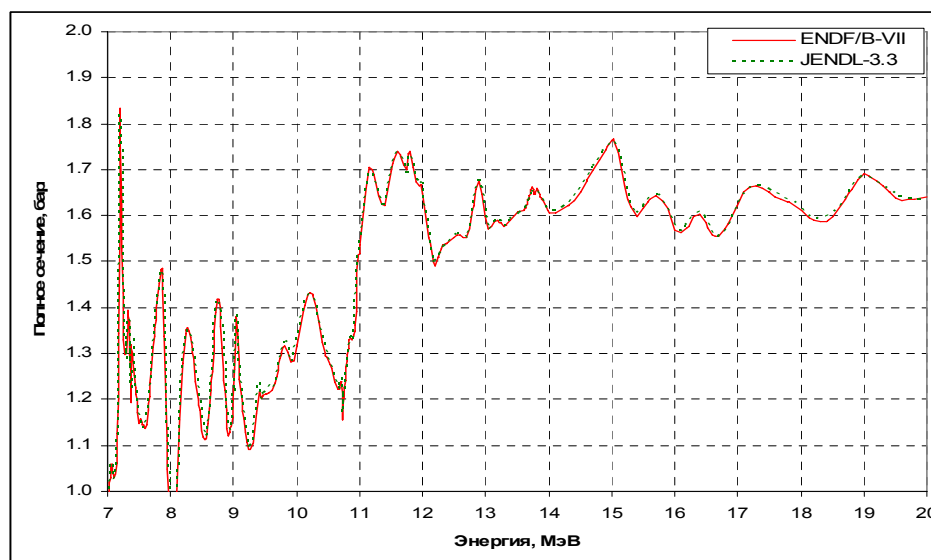


Рисунок 8. Сравнение оцененных полных сечений O-16.

3.4. Сечение реакций (n,α) и $(n,n'\alpha)$

Реакция (n,α) обладает самым низким порогом среди всех реакций неупругих процессов (не считая радиационного захвата) и именно поэтому она рассматривается раньше других. На рис.9 полные сечения принятые в оценках ENDF/B-VII и JENDL-3.3, сравниваются с сечениями реакции (n,α) . Как видно, структура сечения реакции (n,α) в оценке ENDF/B-VII коррелирует со структурой полного сечения, что и должно быть.

Заметим, что сечение реакции (n,α) в предварительно принятой версии ENDF/B-VII.b2 рассматривалось как сумма реакций, в результате которых ядро-продукт ^{13}C остается в основном состоянии, в первом ($E^*=3.0894$ МэВ), во втором ($E^*=3.684$ МэВ) или в третьем возбужденном состоянии ($E^*=3.8538$ МэВ). Сечение реакции $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}^0$ от порога до 6.2 МэВ оценивалось на основе R-матричного анализа, опирающемся на данные по полному сечению и по сечению обратной реакции $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}^0$. Выше 6.2 МэВ оценка также выполнялась на основе R-матричного, однако, выполненного независимо и опирающегося на данные Dundy-68 (см. рис.9), умноженные на коэффициент 1.5 для согласования с результатами анализа, выполненного при более низких энергиях. Сечения реакций $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}^1$, $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}^2$ и $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}^3$ были получены на основе результатов измерений Нельсона и Мишадона⁹, изучавших реакцию $^{16}\text{O}(n,\alpha\gamma)$, и данных¹⁰ о структуре уровней ^{13}C .

В окончательной редакции первой версии – ENDF/B-VII.0 – сечение реакции (n,α_0) пересмотрено: ниже 8.9 МэВ прежняя оценка понижена на 32%. Соответственно понижено и полное сечение реакции (n,α) , а сечение упругого рассеяния – соответственно увеличено.

Структура сечения реакции (n,α) , принятого в JENDL-3.3, выражена менее четко. Важно отметить, что если принять полное сечение в соответствии с оценкой JENDL-3.3, то корреляция резонансных структур полного сечения и сечения реакции (n,α) окажется нарушенной, причем если для этой реакции принять также оценку JENDL-3.3, то смещения резонансных пиков окажется еще большим. Так при переходе от ENDF/B-VII к JENDL-3.3 резонанс в полном сечении при 4.533 МэВ перемещается

⁹ R.O. Nelson and A. Michaudon, Los Alamos report LA-UR-99- 4170 (1999).

¹⁰ F. Ajzenberg-Selove, Nucl.Phys. A523, 1 (1991)

на 4.528 МэВ (см. рис.6б), а резонанс в сечении реакции (n, α) перемещается в противоположном направлении – от 4.533 МэВ на 4.550 МэВ; резонанс в полном сечении при 4.638 МэВ перемещается на 4.630 МэВ (см. рис. 6в), а резонанс в сечении реакции (n, α) перемещается 4.650 МэВ.

В этих условиях выбор оценки Шибата для библиотеки РОСФОНД представляется нецелесообразным ни для полного сечения, ни, тем более, для сечения реакции (n, α).

На рис. 10 оцененные данные по сечению реакции (n, α) сравниваются с экспериментальными в области энергий ниже 6 МэВ, а на рис. 11 – выше этой энергии. На последнем рисунке приведены также оцененные данные по реакции (n, n α).

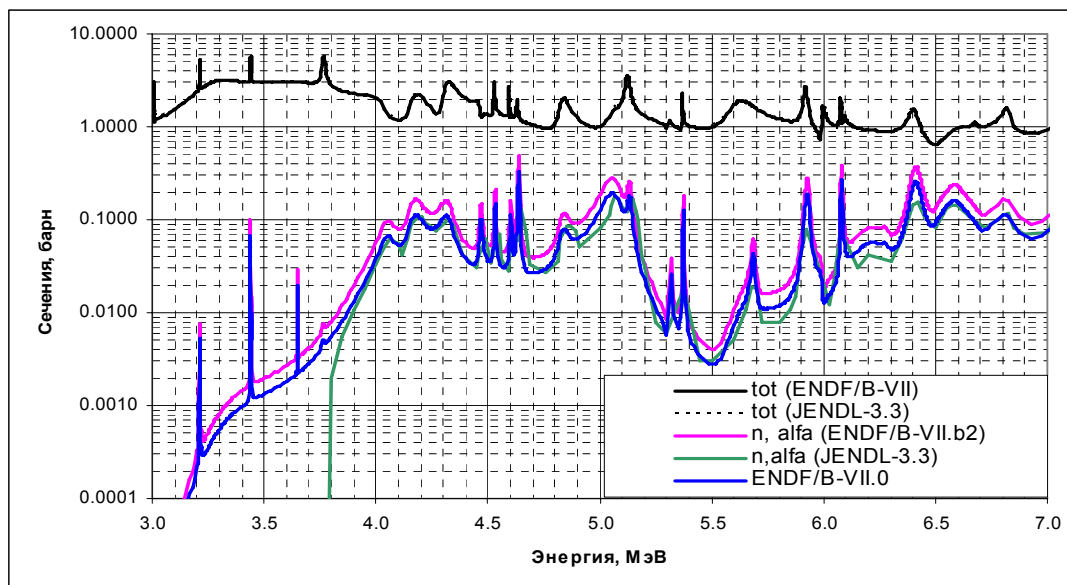


Рисунок 9. Сравнение оцененных данных по полному сечению и сечению реакции (n, α).

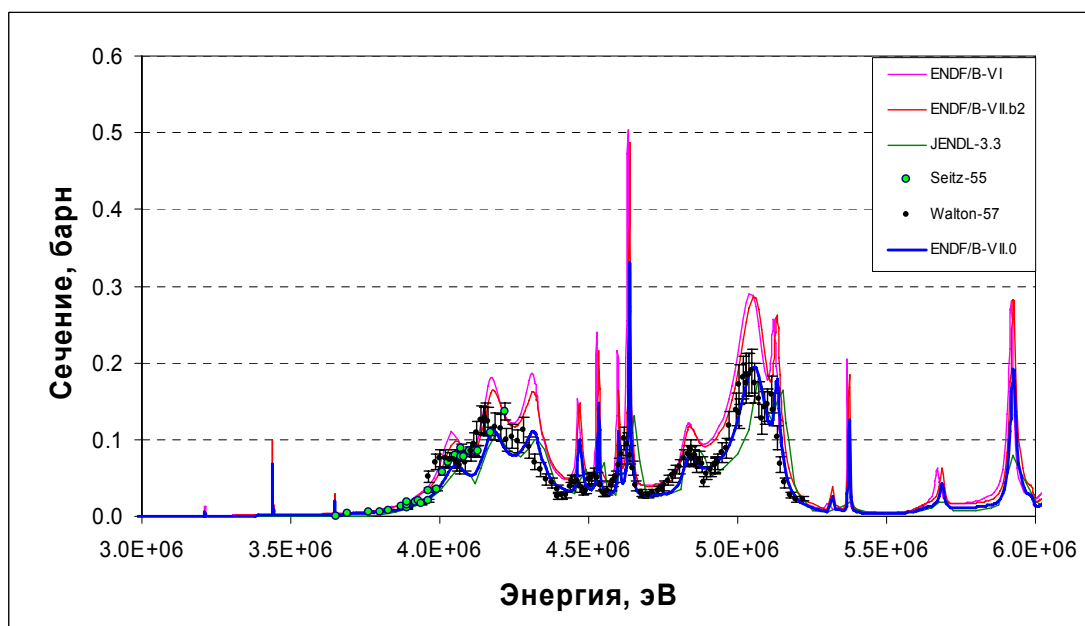


Рисунок 10. Сечение реакции (n, α)

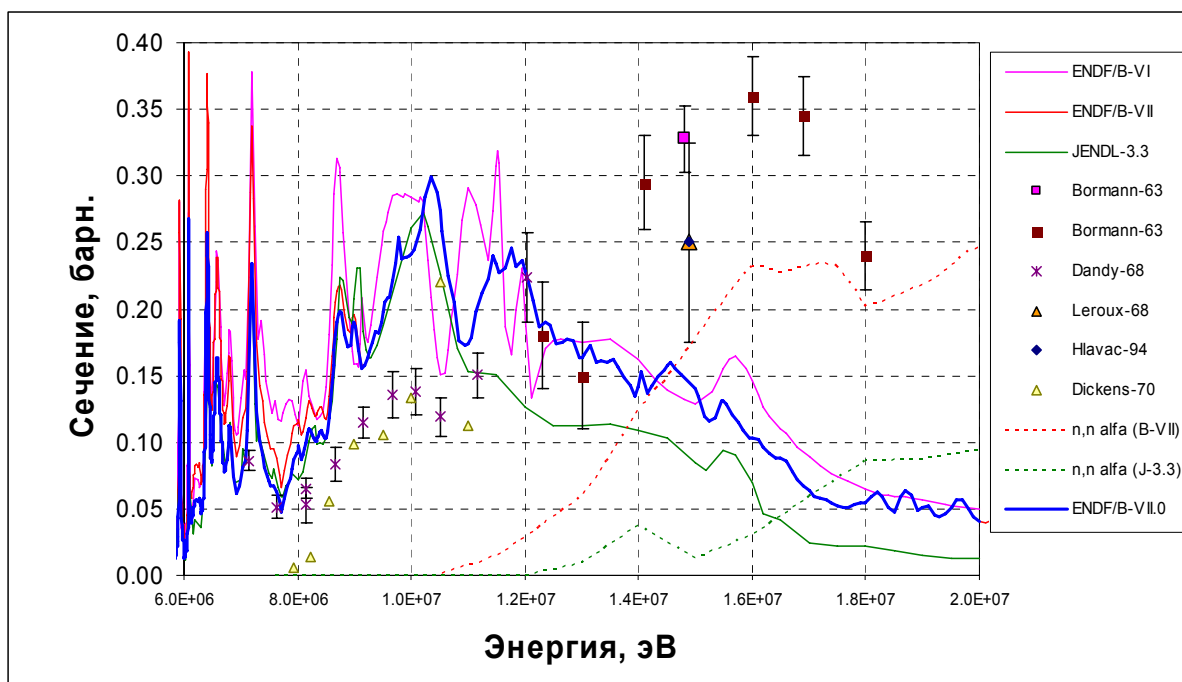


Рисунок 11. Сечения реакций (n,α) и $(n,n'\alpha)$.

Как видно из рис. 10, между экспериментальными данными и результатами последней оценки при энергиях ниже 5.5 МэВ имеется приемлемое согласие. При энергиях выше 14 МэВ расхождения между оцененными и экспериментальными данными меняют знак и прогрессивно увеличиваются. Причина этого достаточно ясна: в экспериментах регистрировались альфа-частицы, испускаемые при взаимодействии нейтронов с кислородом, и реакции (n,α) и $(n,n'\alpha)$ не различались. Сечение реакции $(n,n'\alpha)$ в ENDF/B-VII оценивалось по программе GNASH¹¹ с подгонкой суммарного сечения под данные Bormann-63. Из рис. 11 видно, что сумма оцененных сечений реакций (n,α) и $(n,n'\alpha)$ при использовании данных ENDF/B-VII удовлетворительно согласуется с этим экспериментом, не противоречащим и данным Leroux-68. Этого нельзя сказать о данных, принятых в JENDL-3.3, что служит дополнительным аргументом в пользу выбора для библиотеки РОСФОНД оцененных данных их ENDF/B-VII.

Выше отмечалось, что полное сечение в оценках ENDF/B-VII и ENDF/B-VI ниже 7.6 МэВ совпадают. На рис. 10 и 11 приведены оцененные сечения реакции (n,α) из этих библиотек. Видно, что хотя эти сечения и близки они отнюдь не идентичны и при энергиях ниже 7.6 МэВ, что свидетельствует об определенной независимости рассматриваемых оценок.

3.5 Сечения реакций (n,p) и (n,np)

Оцененные сечения реакции (n,p) на рис. 12 сравниваются с экспериментальными данными. Там же приведены оцененные сечения реакции $(n,n'p)$.

¹¹ Программа GNASH рассчитывает характеристики нейтронных взаимодействий по модели Хаузера-Фешбаха с учетом предравновесных процессов.

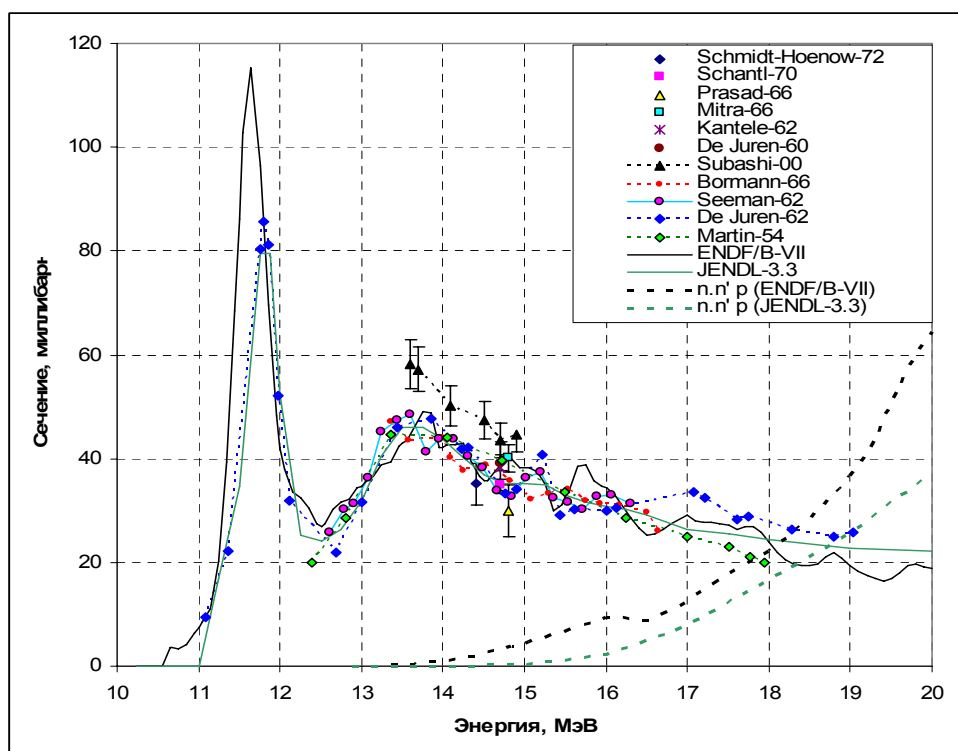


Рисунок 12. Сечение реакции (n,p).

Для первой из этих реакций оценка ENDF/B-VII выполнена на основе расчетов по программе GNASH, опирающихся на экспериментальные данные⁸ по сечению реакции (n,p). На основе схемы уровней ^{16}N , рекомендованной в работе 9, учитывались каналы образования ядра-продукта в основном и трех возбужденных состояниях (с энергиями 0.1201 МэВ, 0.2970 МэВ и 0.3975 МэВ). При этом рассчитанные сечения реакций $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}^0$ и $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}^1$ были понижены примерно на 30% для согласования с экспериментальными результатами. Естественно, учитывались и экспериментальные на рис.12. Японская оценка, очевидно, основана только на последних экспериментальных данных.

В РОСФОНД решено принять оценку ENDF/B-VII.

3.6. Сечение неупругого рассеяния.

На рис. 13 суммарное сечение неупругого рассеяния сравнивается с имеющимися немногими экспериментальными данными. Почти все эти данные лежат существенно ниже результатов современных оценок. Исключение составляет результат Коннера, полученный еще в 1953 г. с использованием камеры Вильсона. В этом эксперименте акты упругого рассеяния отличались от неупругого по большей длине треков ядер отдачи, а реакции с вылетом заряженных частиц отличались по образуемым ими вилками из двух треков. Погрешность этого интересного эксперимента, к сожалению, не указывается.

В практически наиболее значимой области энергий ниже 8 МэВ, все оцененные данные близки друг к другу; далее расхождения возрастают, а выше 12 МэВ оценка, принятая в JENDL-3.3, идет существенно ниже того, что принималось и принимается в файлах оцененных данных ENDF/B. Поскольку выбор оценки полного сечения и сечения реакции (n, α) уже сделан в пользу ENDF/B-VII, мы, отмечая имеющиеся расхождения в оценках и противоречия между ними и экспериментальными данными, не считаем, что эти несоответствия могут повлиять на сделанный выбор.

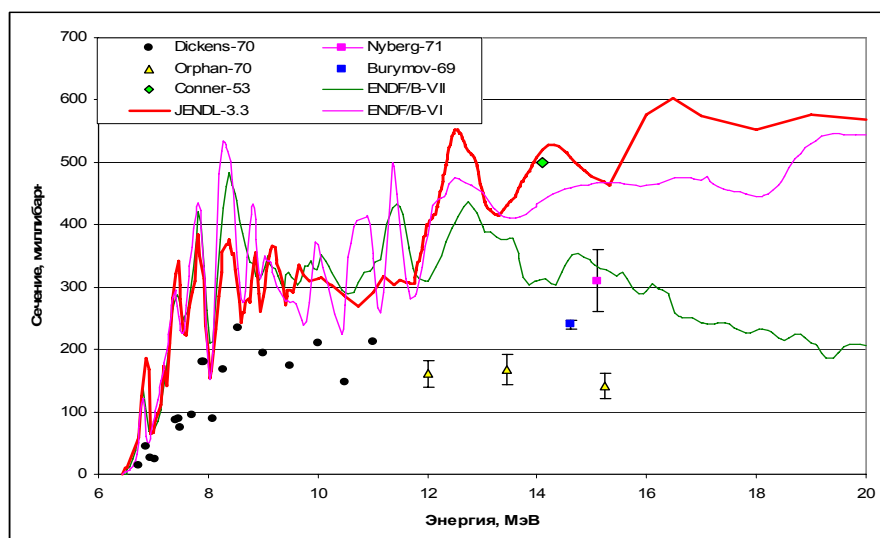


Рисунок 13. Сечение неупругого рассеяния.

Суммарное сечение неупругого рассеяния в оценке ENDF/B-VII представлено как сумма сечений возбуждения семи дискретных уровней ^{16}O и возбуждения континуума уровней, которое начинается с 9.585 МэВ. Ниже этой энергии лежит 5 уровней возбуждения кислорода с энергиями 6.0494 МэВ, 6.1299 МэВ, 6.9171 МэВ, 7.1169 МэВ и 8.8719 МэВ; выше, т.е. в области континуума, выделено еще два уровня с энергиями 10.957 МэВ и 11.08 МэВ. Возбуждение уровней с энергиями 9.585 МэВ, 9.6444 МэВ и 10.356 МэВ при неупругом рассеянии не учитывается, т.к. возбуждение с этих уровней снимается преимущественно путем испускания альфа-частиц. Эти уровни учтены в сечении реакции $(n, n'\alpha)$. Сечения возбуждения уровней с энергиями 6.1299 МэВ, 6.9171 МэВ и 7.1169 МэВ оценивалось по данным о гамма-лучах, испускаемых при переходах в основное состояние на основе результатов Нельсона и Мишадона⁸, измерявших спектры гамма-квантов под 22-мя углами в широком диапазоне энергий нейтронов. Сечения возбуждения более высоколежащих уровней оценивалось по данным той же работы об испускании квантов с энергией 2.742 МэВ (уровень 8.8719 МэВ), 3.839 мэВ (уровень 10.957 МэВ) и 4.950 МэВ (уровень 11.080 МэВ). Вероятности испускания названных гамма-квантов при снятии возбуждения с указанных уровней определялись по схеме уровней из работы⁹.

Сечение с возбуждением континуума уровней, рассчитанное по программе GNASH, корректировалось согласованно с корректировкой сечения упругого рассеяния.

Заметим, что в файле оцененных данных, принятом в JENDL-3.3, неупругое рассеяние представлено сечениями возбуждения 27 уровней с энергиями до 14.4 МэВ, начиная с которой возбуждается континуум уровней. В файле данных ENDF/B-VI, используемом и в библиотеке ФОНД-2.2, неупругое рассеяние представлено сечениями возбуждения 38 уровней с энергиями возбуждения до 18.55 МэВ. В обоих случаях при неупругом рассеянии учитывается возбуждение названных выше уровней, распадающихся на самом деле путем испускания альфа частиц. Различное представление неупругого рассеяния при энергиях выше 10 МэВ приводит к некоторому различию в спектрах неупругого рассеянных нейтронов. Ясно, что влияние этого различия несравненно меньше, чем влияние различия в суммарном сечении неупругого рассеяния. Менее подробное описание неупругого рассеяния возбуждением дискретных уровней, на наш взгляд, не может служить основанием для отказа от выбора оценки ENDF/B-VII в пользу других оценок.

3.7. Реакции $(n,2n)$, $(n,n'\alpha)$, (n,t) и $(n,2\alpha)$

Все эти реакции имеют высокие пороги и низкие сечения даже при 20 МэВ. В практических приложениях они не играют сколько-нибудь заметной роли. Лишь реакция (n,t) рассматривается порой с экологической точки зрения как источник трития. Сечения всех этих реакций в РОСФОНД, естественно, принимаются в соответствии с оценкой, принятой в ENDF/B-VII. Заметим, что в файле оцененных данных из JENDL-3.3 данных о сечениях трех последних реакций вообще не содержится.

На рис. 14 принимаемые сечения рассматриваемых реакций сравниваются с имеющимися скудными экспериментальными данными.

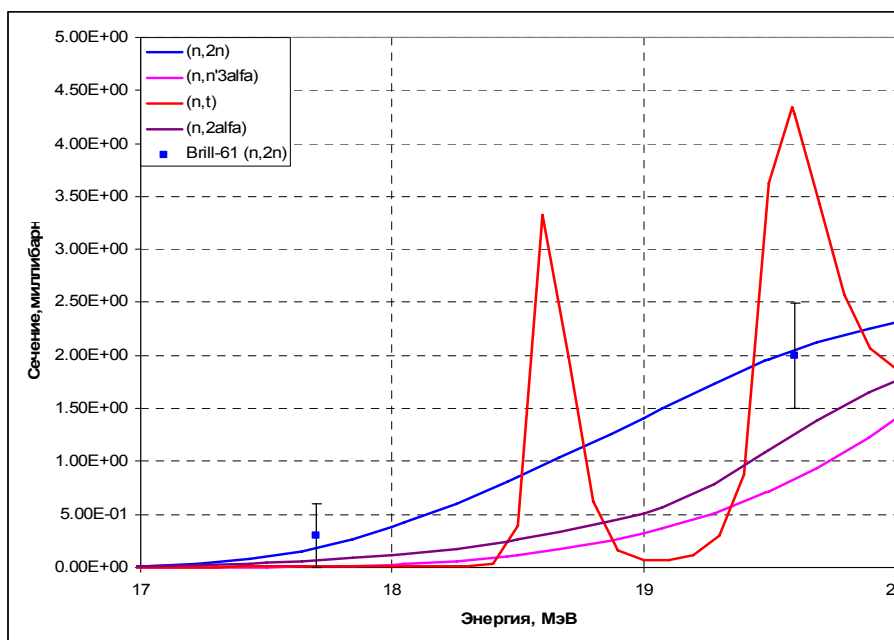


Рисунок 14. Оцененные сечения реакций $(n,2n)$, $(n,n'\alpha)$, (n,t) и $(n,2\alpha)$ и экспериментальные данные для первой из них

Сечение реакции $(n,2n)$, рассчитанное по программе GNASH, было понижено примерно на 30% для согласования с данными Брилла. По программе GNASH рассчитывался и ход сечений $(n,n'\alpha)$ и $(n,2\alpha)$. Сечение первой из них затем корректировалось для согласования с экспериментальными данными, имеющимися при энергиях 28 – 30 МэВ.

Что касается реакции (n,t) , то ее неожиданное энергетическое поведение обусловлено тем, что оценка этого сечения опиралась на не опубликованный пока эксперимент Нельсона и Мишадона⁸, измерявшими сечение реакции $(n,t \gamma)$. Сечение этой реакции является суммой сечений каналов, ведущих к образованию ядра-продукта в основном состоянии, $^{16}\text{O}(n,t)^{14}\text{C}^0$, в 8 возбужденных состояниях с энергиями возбуждения $E^*=2.3128$ МэВ, 3.9481 МэВ, 4.9151 МэВ, 5.1059 МэВ, 5.6914 МэВ, 6.2035 МэВ, 6.4735 МэВ и 7.0291 МэВ и в континууме более высоколежащих состояний. Энергии уровней ^{14}C приняты в соответствии с оценкой работы⁹. Именно на основе этой схемы уровней и производился анализ данных Нельсона и Мишадона⁸. Ниже порога реакции $^{16}\text{O}(n,t\gamma)^{14}\text{C}^0$ сечение $^{16}\text{O}(n,t)^{14}\text{C}^0$ оценивалось на основе расчетов по программе GNASH, с перенормировкой для сшивки с результатами Нельсона и Мишадона⁸ при более высоких энергиях.

Заметим, что из других доступных библиотек данные о сечении реакции $^{16}\text{O}(n,t)^{14}\text{C}$ содержатся только в CENDL и ADL-3. В первой из них в интервале от порога до 20 МэВ сечение нарастает плавно, но при 20 МэВ достигает 14 миллибарн, что на порядок превышает значение, оцененное в ENDF/B-VII. В ADL-3 сечение также нарастает плавно, но при 20 МэВ достигает 158 миллибарн, т.е. превышает оценку ENDF/B-VII на два порядка. Понятно, что для библиотеки РОСФОНД для всех рассматриваемых реакций выбрана оценка ENDF/B-VI.

3.8. Сечение упругого рассеяния.

Поскольку сечение радиационного захвата чрезвычайно мало, сечение упругого рассеяния ниже порога реакции (n,α) практически точно совпадает с полным сечением. При более высоких энергиях сечение упругого рассеяния оценивалось по разности между полным сечением и суммарным сечением неупругих взаимодействий. При этом, однако, следует помнить, что сечения неупругого рассеяния и реакции $(n,2n)$ оценивались с оглядкой на сечение упругого рассеяния, которое будет получаться при вычитании: требовалось, чтобы оно не противоречило результатам экспериментального определения этого сечения. На рис. 15, где оцененные сечения упругого рассеяния сравниваются с экспериментальными данными, видно, что эта цель была достигнута и в ENDF/B-VII и JENDL-3.

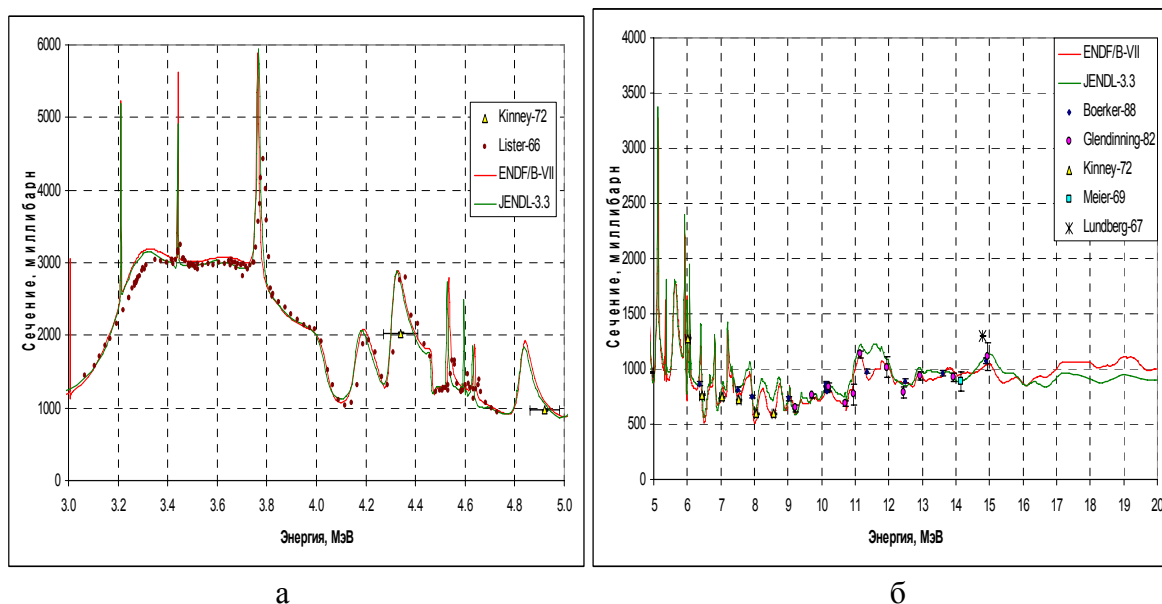


Рисунок 15. Сечение упругого рассеяния ниже 5 МэВ.

4. Энерго-угловые распределения

4.1. Упругое рассеяние

Анизотропия упругого рассеяния в области энергий ниже 6.2 МэВ в оценке, принятой в ENDF/B-VII, рассчитывалась на основе параметрического описания данных по полному сечению и по анизотропии рассеяния, полученных до 1980 г. (см. раздел 3.3). Выше этой энергии, как сказано в заголовочной секции файла, энергетические зависимости коэффициентов разложения угловых распределений по полиномам Лежандра проводились от руки через экспериментальные данные, полученные до 1989 г. С тех пор новых экспериментальных данных не публиковалось.

Детали оценки угловых распределений для файла, принятого в JENDL-3.3, не сообщались. Известно лишь, что оценка выполнена в 1983 г.

Сравнение оцененных данных с экспериментальными в случае угловых распределений представляет не простую задачу. На рис. 16 сравниваются энергетические поведения важнейшей характеристики анизотропии рассеяния – среднего косинуса угла рассеяния (в системе координат центра инерции).

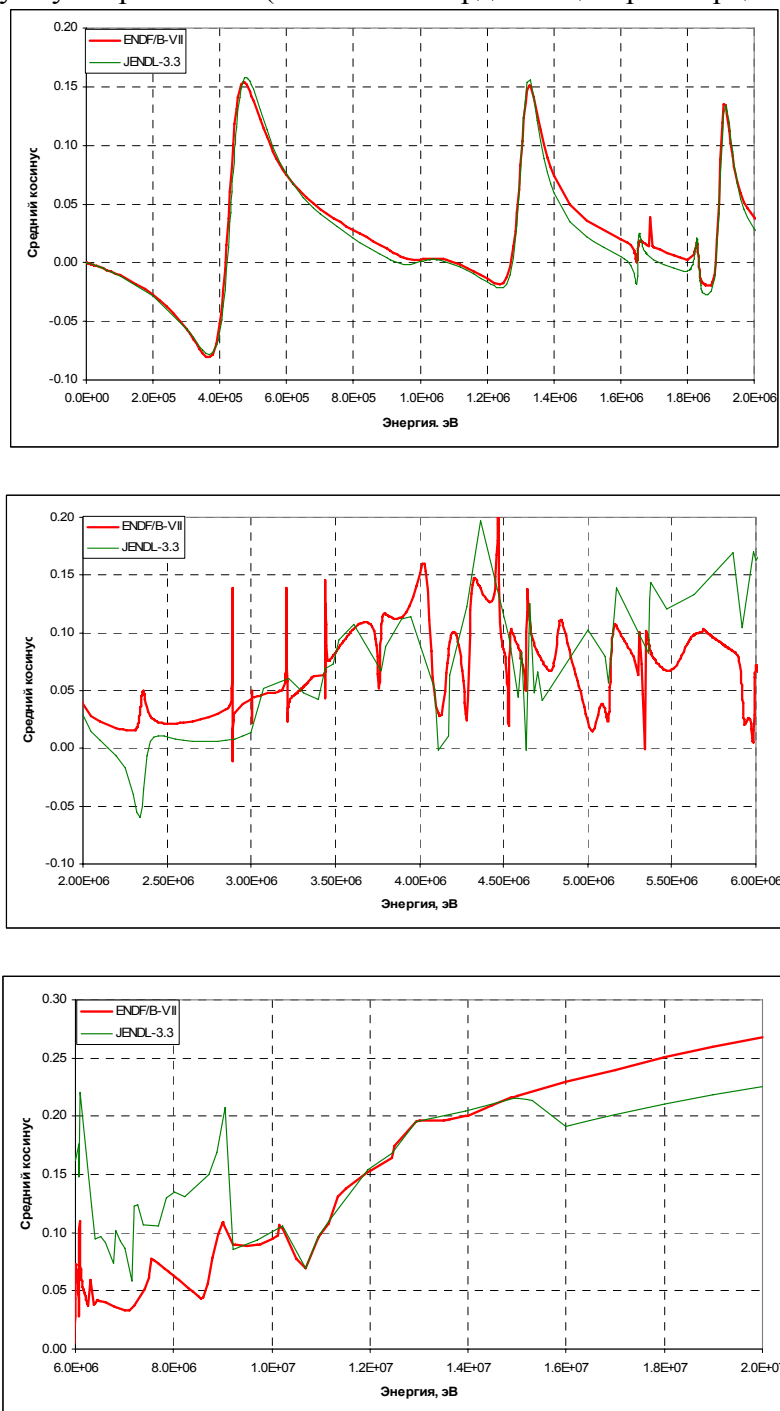


Рисунок 16. Энергетическое поведение среднего косинуса угла рассеяния.

Как видно, в JENDL-3.3 энергетическое поведение среднего косинуса до 2 МэВ весьма близко к принятому в ENDF/B-VII, но при более высоких энергиях оно задано гораздо менее подробно. Из сравнения, данных, представленных на рис. 16 с полным

сечением, представленным в разделе 3.3, видно, что до 6 МэВ структура среднего косинуса полностью соответствует структуре полного сечения, что подтверждает утверждение об одновременной оценке этих величин.

Что касается высокоэнергетической области, то здесь представляется целесообразным рассмотреть соответствие оцененных данных экспериментам, выполненным в последние годы. На рис. 17 проводится такое сравнение для интервала 6 – 8 МэВ.

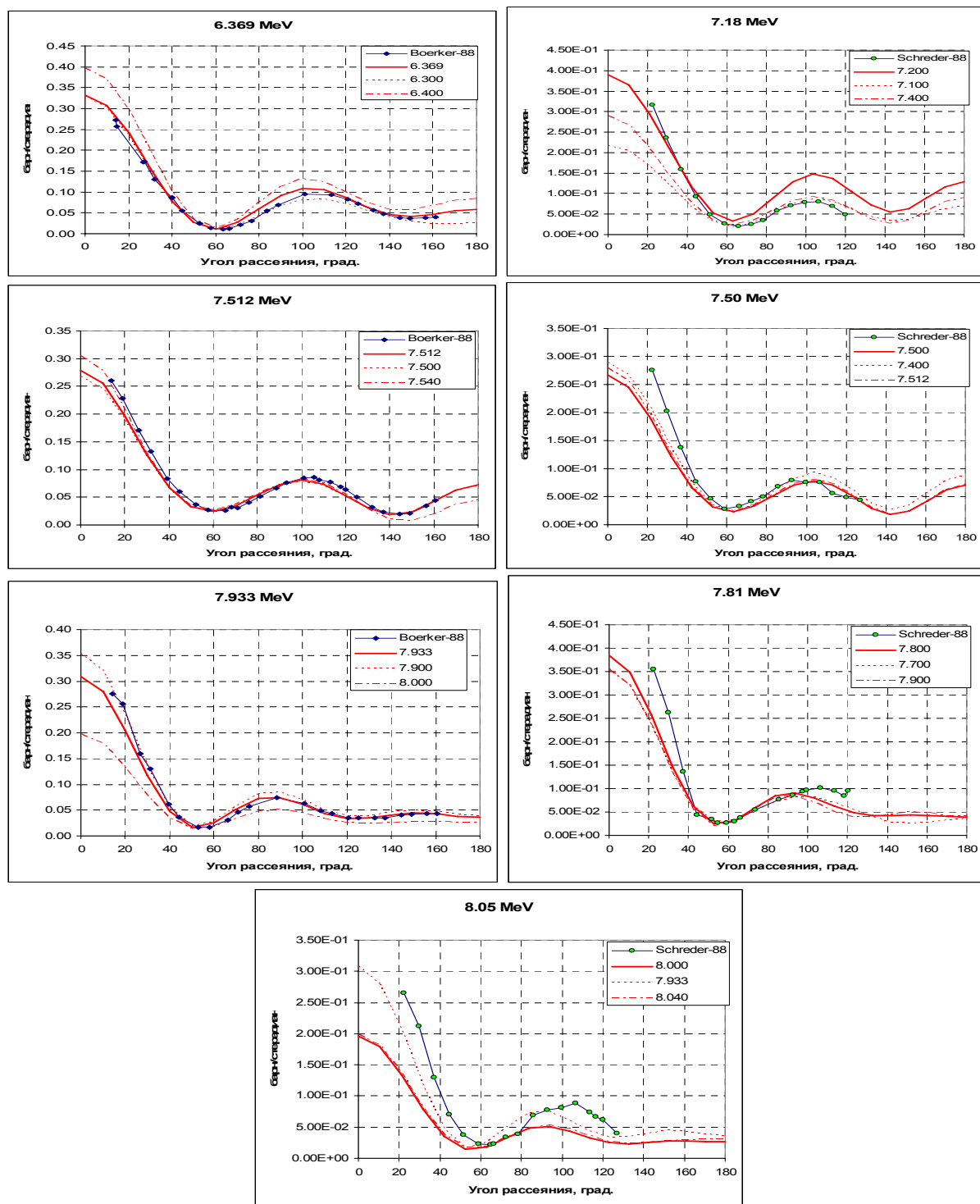


Рисунок 17. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния в интервале 6 – 8 МэВ

Как видно, в интервале 6 – 8 МэВ оцененные данные¹², хорошо соответствуя результатам Брокера, систематически занижают рассеяние вперед, измеренное Шредером.

На рис. 18а, б аналогичное сравнение проводится в интервале 9 – 12 МэВ.

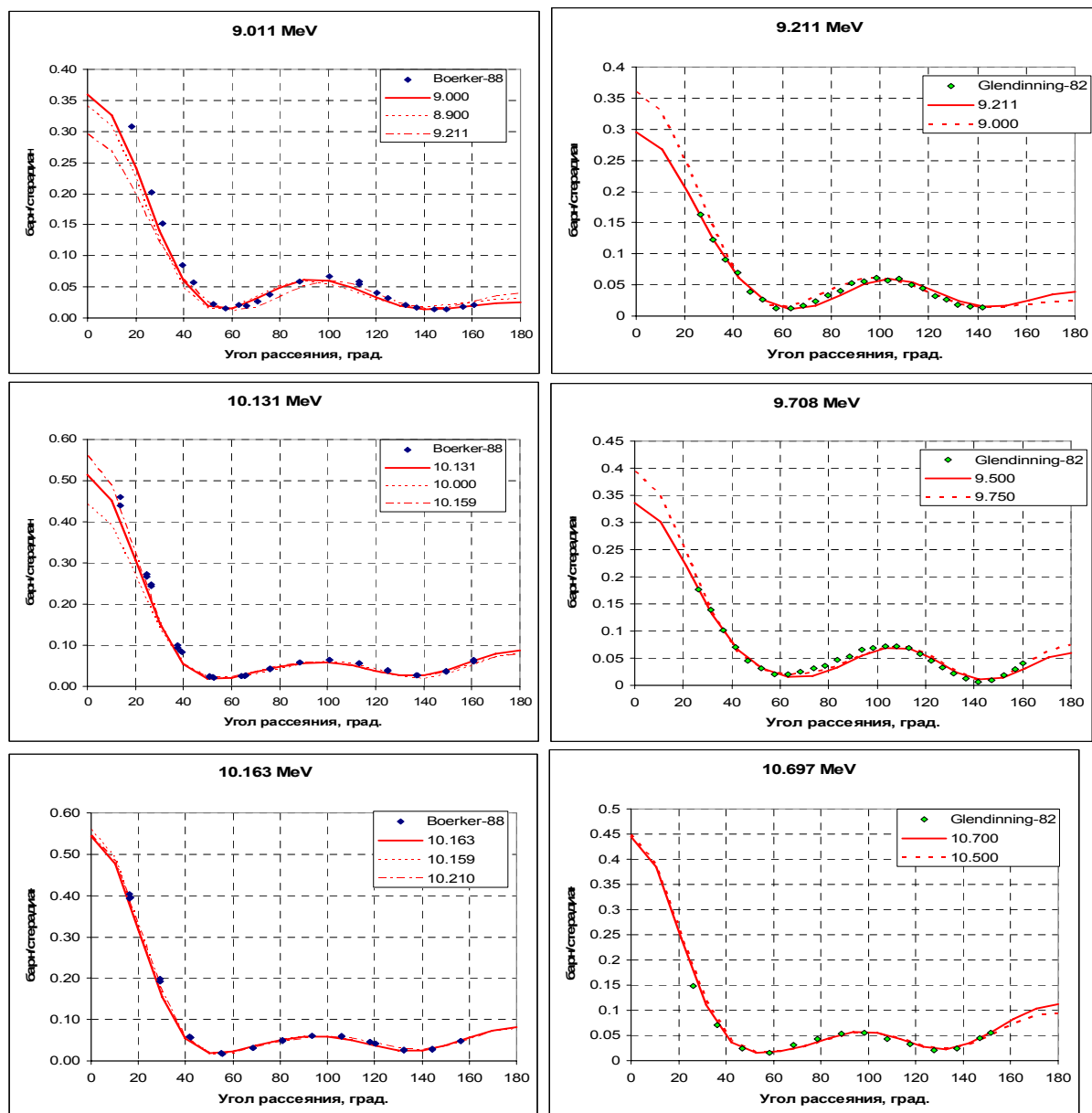


Рисунок 18а. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния в интервале 9 – 12 МэВ

¹² Оцененные данные приводятся не только для энергии, ближайшей к той, при которой проводились измерения, но и для соседних энергетических точек

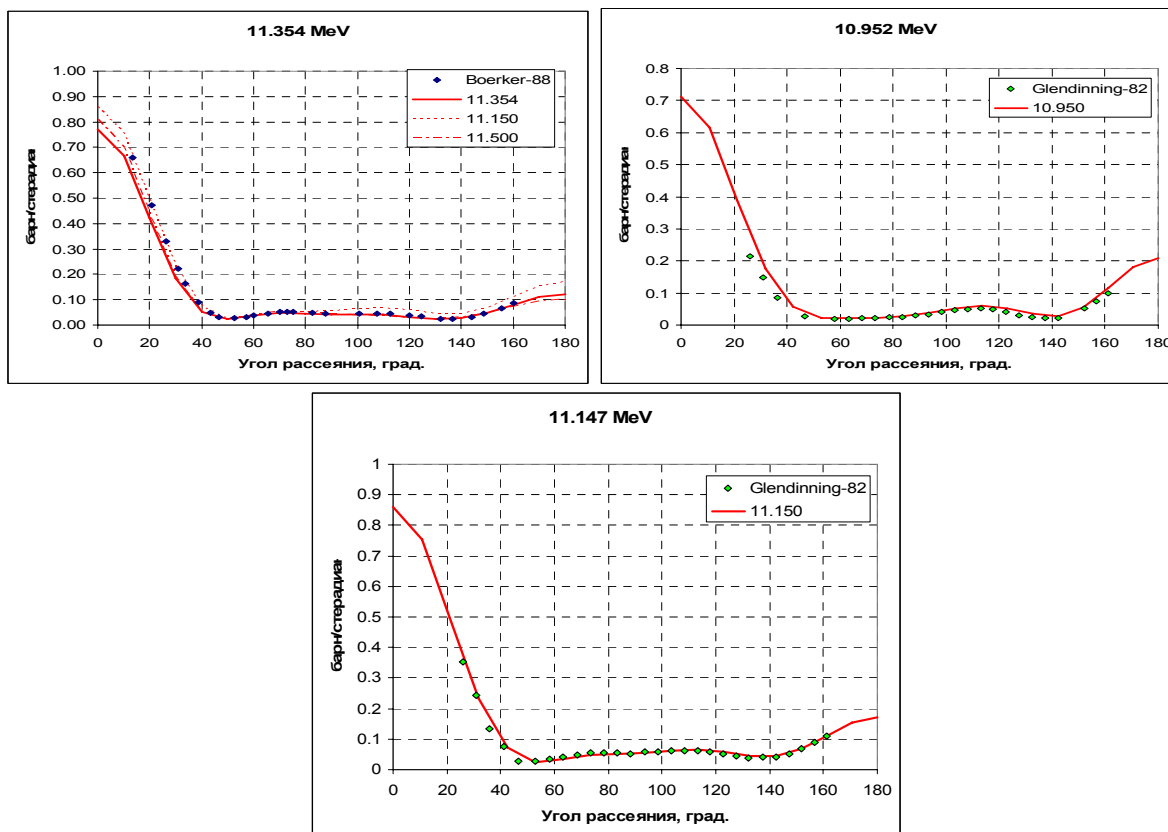


Рисунок 18б. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния в интервале 9 – 12 МэВ

Как видно, в рассматриваемом интервале результаты Брокера прекрасно согласуются с более ранними данными Глендиннера. Оцененные данные проходят посередине между этими весьма близкими наборами угловых распределений. Это вполне оправдывает недоучет данных Шредера в интервале 6 – 8 МэВ.

На рис. 19а,б оцененные данные сравниваются с экспериментальными при еще более высоких энергиях.

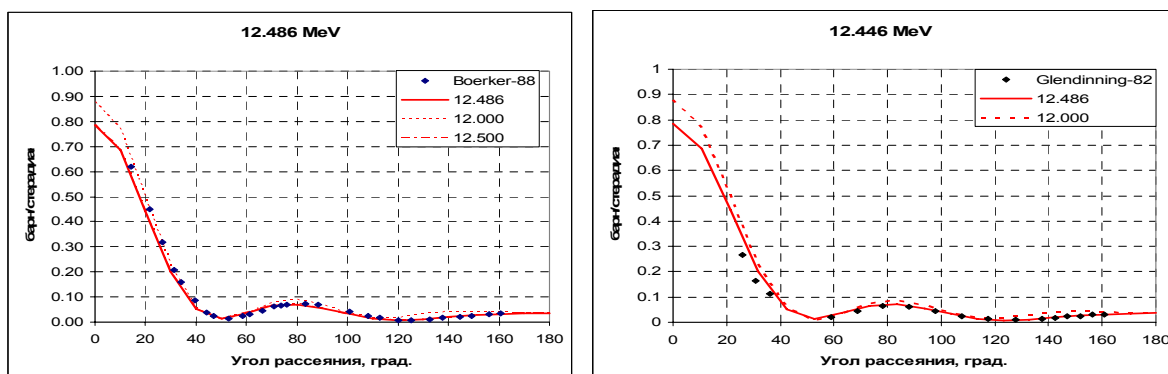


Рисунок 19а. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния при энергиях выше 12 МэВ.

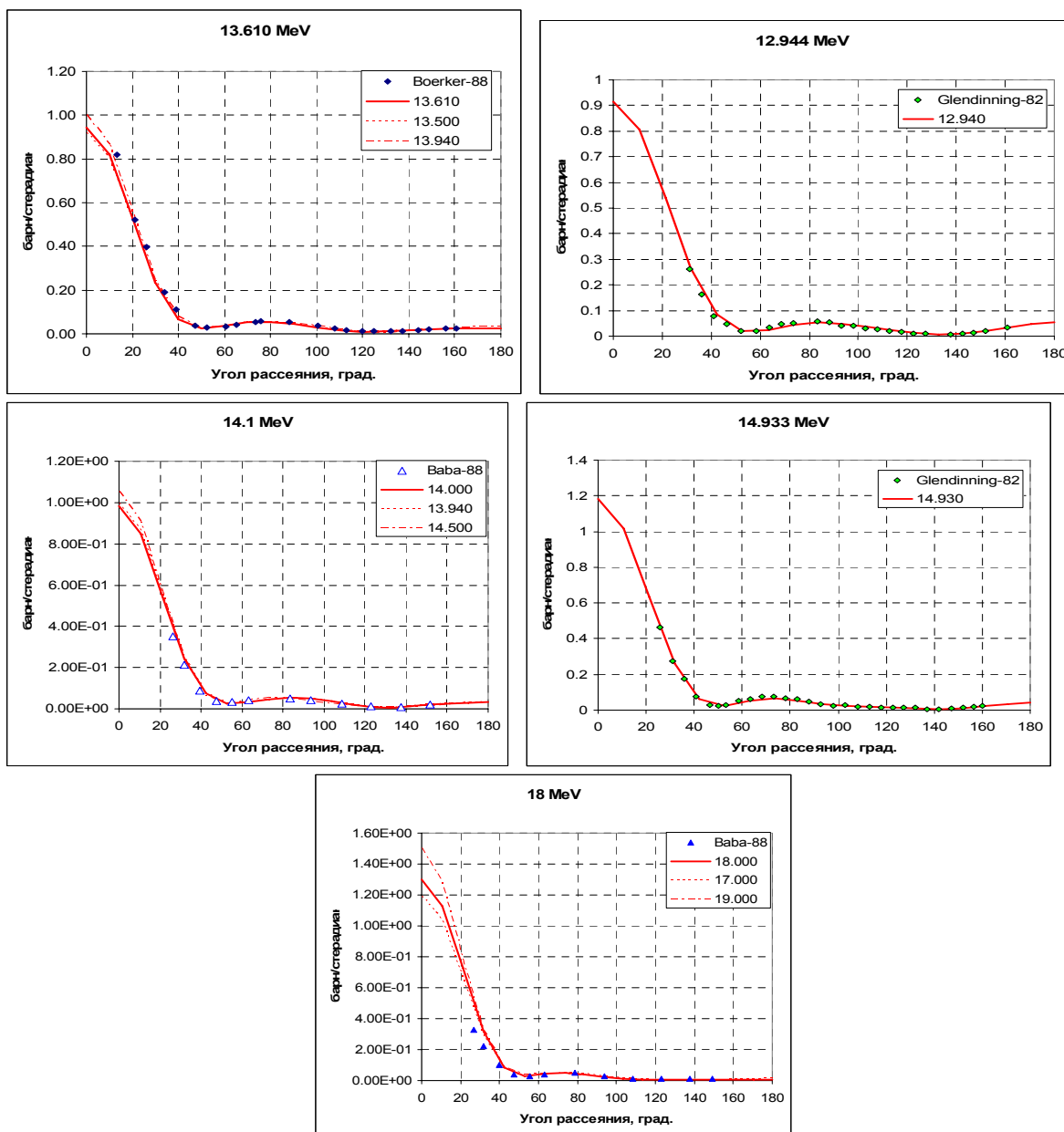


Рисунок 196. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния при энергиях выше 12 МэВ.

При высоких энергиях, данные Брокера и Глендиннера также прекрасно согласуются между собой, а также с данными Баба. Таким образом, при энергиях выше порога реакции (n, α) оцененные данные подтверждаются согласующимися между собой экспериментальными результатами.

Провести такое же сравнение при более низких энергиях затруднительно, т.к. энергетическое разрешение в файле и в эксперименте слишком сильно различаются. Примером может служить рис. 20, на котором сравниваются угловые распределения в окрестности 5 МэВ.

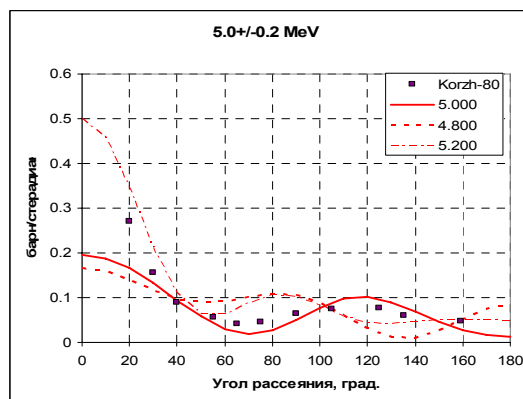


Рисунок 20. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния при 5 МэВ.

Видно, что в пределах экспериментальной функции разрешения угловые распределения меняются весьма существенно (в файле в этом интервале они заданы в 16 энергетических точках). При подгонке параметров расчетных моделей, как отмечалось, экспериментальные данные по анизотропии существенно использовались (при определении спинов резонансов эта информация была определяющей).

4.2. Нейтроны, испускаемые при неупругих взаимодействиях

4.2.1. Неупругое рассеяние. При энергиях ниже 10 МэВ неупругое рассеяние с возбуждением семи дискретных уровней кислорода, как заявлено в заголовочной секции файла ENDF-B/VII, считается изотропным в системе центра инерции, а выше этой энергии принято в соответствии с имеющимися экспериментальными данными, главным образом опираясь на неопубликованные данные Боркера и Маннхарта¹³. В действительности изотропными приняты только угловые распределения нейтронов, рассеянных на уровнях 10.957 МэВ и 11.080 МэВ (6-й и 7-й уровни), которые считаются изотропными при всех энергиях. На остальных уровнях угловые распределения нейтронов слабо анизотропны в системе центра инерции и вблизи порога. Анизотропия рассеяния вблизи порога принята такой же, как и в оценке, принимавшейся в ENDF/B-VI. Примером служат данные о первом угловом моменте $-a_1$ (утроенном среднем косинусе угла рассеяния в системе центра инерции) из названных библиотек (см. рис. 21а, б). При высоких энергиях, где анизотропия рассеяния становится заметной, оцененные данные существенно различаются. Для уровня с энергией 8.8719 МэВ различия в характере анизотропии весьма сильно (см. рис. 22), что, надо полагать, определяется учетом данных Брокера и Маннхарта.

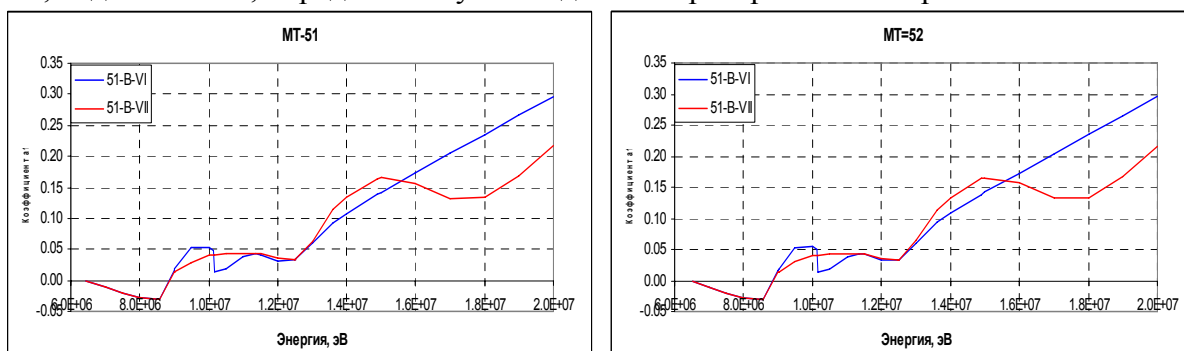


Рисунок 21а. Энергетические зависимости утроенного среднего косинуса угла неупругого рассеяния на низколежащих уровнях кислорода.

¹³ G. Borker, W. Mannhart, et al., report PTB-N-1 (1989) and private communication.

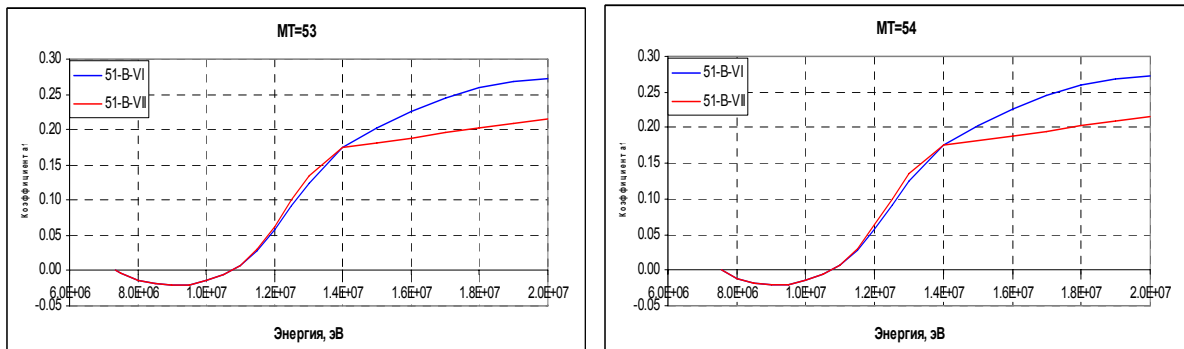


Рисунок 216. Энергетические зависимости утроенного среднего косинуса угла неупругого рассеяния на низколежащих уровнях кислорода.

Заметим, что в оценке, принятой в JENDL-3.3 неупругое рассеяние на рассматриваемых уровнях считается изотропным в системе центра инерции до 14.2 МэВ, а выше – не зависящей от энергии до 20 МэВ. Средний косинус угла рассеяния при этом принят весьма близким к тому, что принимается в ENDF/B-VII при 14 – 18 МэВ. В частности для первых двух уровней утроенный средний косинус уровня в JENDL-3.3 принят равным 0.209, для третьего и четвертого – 0.154, а для пятого -0.032.

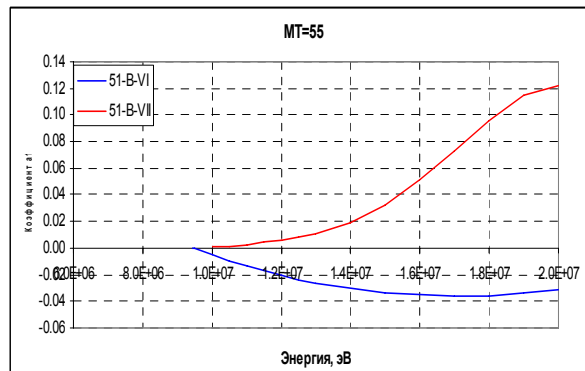


Рисунок 22. Первый угловой момент индикатрисы рассеяния на уровне с энергией 8.8719 МэВ

Отмеченная выше неточность в описании оценки в заголовочной секции не является основанием для сомнений в целесообразности принять эту оценку в РОСФОНД.

Что касается энерго-угловых распределений нейтронов, неупруго рассеянных на континууме уровней, то они заданы в файлом 6, т.е. угловые распределения скоррелированы с энергетическими. Спектры и угловые распределения нейтронов рассчитаны по программе GNASH. В файле 6 заданы также энергетические распределения ядер отдачи. Их угловые распределения приняты изотропными. Данные об образовании гамма-квантов представлены в файлах MF=13 и MF=14 (см. ниже).

4.2.2. Реакции $MT=16, (n,2n)$; $MT=22, (n,n'\alpha)$; $MT=23, (n,n'\alpha)$; $MT=28, (n,n'p)$.

Угловые распределения и скоррелированные с ними энергетические спектры нейтронов, испускаемых в этих реакциях, заданы в файле MF=6 с соответствующими значениями MT. Все эти данные получены путем расчетов по программе GNASH. Кроме энерго-угловых распределений нейтронов определяются и энергетические спектры альфа-частиц или протонов и ядер отдачи, угловые распределения которых считаются изотропными в системе центра инерции. Для реакции $(n,n'p)$ в файле MF=6

определен также непрерывный спектр испускаемых фотонов, также рассчитанный по программе GNASH. Для остальных реакций спектры и угловые распределения фотонов описываются файлами NF=13 и MF=14 (см. ниже).

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

5.1. Радиационный захват.

Спектр фотонов радиационного захвата в соответствии с данными Джорни и Мотца¹⁴ принят линейчатый, состоящим из 4-х линий:

| Энергия кванта, МэВ | Выход на акт захвата |
|---------------------|----------------------|
| 3.2722 | 0.146 |
| 2.1842 | 0.854 |
| 1.0880 | 0.854 |
| 0.8708 | 1.000 |

Суммарный выход 2.854 кванта на захват. Суммарная энергия квантов - 4.143МэВ. Энергии и выходы заданы в файле MF=12. Угловое распределение квантов – изотропное – в файле MF=14.

5.2. Неупругое рассеяние.

Образование фотонов при возбуждении дискретных уровней кислорода в результате неупругого рассеяния описывается в файле MF=13 для MT=4 сечениями образования 13 гамма-линий, испускаемых при переходах между уровнями с энергиями выше 6.05МэВ и линии с энергией 0.51 МэВ, обусловленной возбуждением первого уровня (предполагается, следовательно, что фотон, испускаемый при снятии возбуждения с этого уровня, испытывает внутреннюю конверсию с образованием электро-позитронной пары). Сечения образования гамма-линий оценены, естественно, по данным Нельсона и Мишадона⁸, использовавшимся и при оценке сечений возбуждения уровней. Как отмечалось в разделе 3.6, для оценки сечений возбуждения использовались данные только для некоторых (наиболее сильных) уровней, образуемых в каскаде распада. Угловые распределения гамма-квантов для линий с энергиями 1.755-, 2.742-, 6.130-, 6.917- и 7.117МэВ оценены по данным той же работы Нельсона и Мишадона. Угловые распределения остальных гамма-линий приняты изотропными.

Что касается гамма-лучей, испускаемых при неупругом рассеянии с возбуждением континуума состояний ядра-мишени, то их спектры определяются, как отмечалось в разделе 4.2.1, в файле MF=6 для MT=91.

5.3. Другие неупругие процессы.

5.3.1. Реакция (n,2n). Сечение образования и угловое распределение гамма-квантов с энергией 5.2409 МэВ оценено по данным Нельсона и Мишадона⁸. Сечения образования еще семи гамма-линий оценены с привлечением схемы уровней ¹⁵O рекомендованной Айзенбергом-Селовом⁹. Выходы дискретных квантов определены в файле MF=13, MT=16, а их угловые распределения – в файле MF=14, MT=16. Угловые распределения всех квантов, кроме кванта с энергией 5.2409 МэВ – изотропны.

¹⁴ E.T. Jurney and H.T. Motz, Bull.Am.Phys.Soc. 9, 176 (1964)

5.3.2. Реакция ($n, n'\alpha$). На основе измерений Нельсона и Мишадона⁸ оценено сечение возбуждения и угловое распределение единственного кванта с энергией 4.438 МэВ.

5.3.3. Реакция (n, p). Спектр и угловое распределение (изотропное) испускаемых фотонов определены файлом MF=6 (см. 4.2.2).

5.3.4. Реакция (n, α). Сечения образования гамма-квантов с энергиями 3.0894, 3.8845 и 3.8538 МэВ оценено по данным Нельсона и Мишадона⁸. Сечения образования еще трех гамма-линий с энергиями 0.1993, 0.5951 и 0.7644 оценены с привлечением схемы уровней ¹³C рекомендованной Айзенбергом-Селовом⁹. Выходы дискретных квантов определены в файле MF=13, MT=16, а их угловые распределения – в файле MF=14, MT=16. Угловые распределения всех квантов, кроме квантов с энергиями 0.1993, 3.8845 и 3.8538 МэВ – изотропны. Угловые распределения последних оценены на основе данных Нельсона и Мишадона.

5.3.5. Реакция (n, d). Сечения образования гамма-квантов с энергиями 5.2701 и 5.2988 МэВ оценены по данным Нельсона и Мишадона⁸. Сечения образования еще 60 гамма-линий оценены по программе GNESH с перенормировкой для учета схемы распада ¹⁵N, рекомендованной Айзенбергом-Селовом, и сечений образования названных выше основных гамма-линий. Данные представлены в файле MF=13. Анизотропия испускания гамма-квантов определяется файлом MF=14 (все кванты, кроме кванта с энергией 5.2701 МэВ, испускаются изотропно; анизотропия названного кванта соответствует данным Нельсона и Мишадона).

5.3.5. Реакция (n, t). Сечение образования гамма-кванта с энергией 2.313 МэВ оценено по данным Нельсона и Мишадона⁸. Сечения образования еще 20 гамма-линий оценены по программе GNESH с перенормировкой для учета схемы распада ¹⁴N, рекомендованной Айзенбергом-Селовом, и сечений образования названной выше гамма-линии. Данные представлены в файле MF=13. Принято, что все кванты испускаются изотропно (файл MF=14).

6. Погрешность полного сечения.

С инженерной точки зрения наибольший интерес представляет погрешность полного сечения кислорода, определяющая характеристики переноса нейтронов в кислород содержащих средах. На рис. 23 сравниваются оценки погрешностей этого сечения принятые в различных источниках – в файлах погрешностей библиотек ENDF/B-V и JENDL-3.2, оценки погрешностей групповых констант БНАБ-93, погрешности, записанные в библиотеке LUND системы ИНДЕКС, а также расхождения групповых полных сечений, рассчитанных на основе последних оценок – ENDF/B-VII и JENDL-3.3. Как видно, последние существенно превосходят погрешности, принятые в JENDL-3.2 что свидетельствует об излишней оптимистичности последних. Представляется, что расхождение новейших оценок может рассматриваться в качестве нижней границы реальных погрешностей. На рис. 23 жирной коричневой линией проведена оценка погрешностей, сделанная нами на основе рассмотрения расхождений между принятой здесь оценкой ENDF/B-VII и экспериментальными данными. Полагалось, что в случае проведения в будущем дополнительных измерений полого сечения 2/3 результатов, которые будут получены, будут отличаться от принятых данных менее, чем на предлагаемые погрешности.

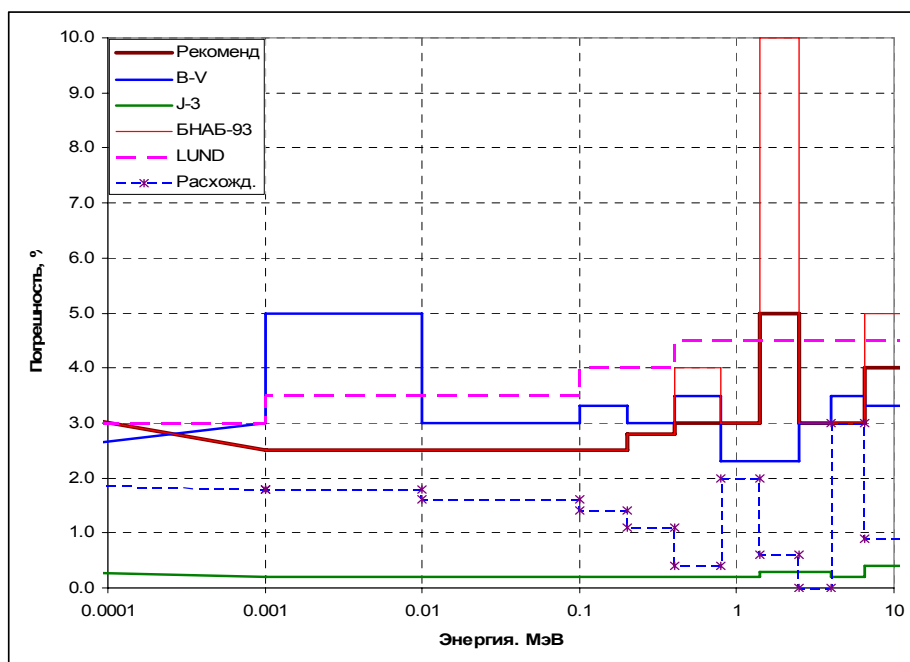


Рис. 23. Оценки погрешностей полного сечения кислорода.

7. Валидация в интегральных экспериментах

В заголовочной секции файла ENDF/B-VII дана краткая сводка результатов валидации оцененных сечений кислорода в интегральных экспериментах.

Прежде всего отмечается валидация по результатам расчетного анализа критических экспериментов с растворами высокообогащенного урана. В анализе использовались сечения урана-235 из файла ENDF/B-VI (Rev.5) и сечения водорода из той же библиотеки. Согласие с экспериментальными данными получено заметно лучшее, чем при использовании сечений урана-235 из оценки ENDF/B-VI(Rev/2). Эти результаты полностью соответствуют полученным в 2003 -2004 гг в ФЭИ при анализе более широкого набора критических экспериментов с растворами обогащенного урана, в которых для урана-235 рассматривались те же две оценки из ENDF/B-VI и те же оценки использовались для сечений водорода и кислорода. Подчеркнем, что в области энергий, важной для расчета критичности уран-водных растворов, в РОСФОНД включены те же сечения урана-235, что и в ENDF/B-VI(Rev.5). Для водорода и кислорода также использовались сечения из оценок отобранных для библиотеки РОСФОНД. Результаты валидации достаточно подробно изложены в обосновании выбора оцененных нейтронных данных для урана-235 для библиотеки РОСФОНД. Заметим, однако, что максимальная чувствительность коэффициента размножения к полному сечению кислорода, достигаемая при концентрациях урана порядка сотен грамм на литр (когда утечка нейтронов из размножающей системы велика) не превышает 0.014. Изменение полного сечения на 3% (т.е. на величину порядка погрешности – см. раздел 7) ведет к изменению коэффициента размножения менее, чем на 0.05%. Поскольку точность расчетного предсказания критичности с учетом всей совокупности оцененных экспериментов составляет, примерно 0.2%, ясно, что согласие с экспериментами этого типа не повышает надежности оцененных данных, а лишь убеждает в отсутствии в них нечаянных ошибок.

Гораздо убедительнее валидация оцененных данных для кислорода в так называемом broomstick-эксперименте. В условиях “хорошей” геометрии, когда каждое столкновение выводит нейтрон из пучка, измерялось пропускание нейтронов через

образцы жидкого кислорода различной толщины. Пучок нейтронов выводился из реактора и в нем присутствовали нейтроны самых различных энергий. Регистрация нейтронов проводилась с помощью нейтронного спектрометра, так что пропускание измерялось во всем энергетическом диапазоне, включающем, разумеется, и интерференционный минимум в полном сечении. Отмечается, что во всем энергетическом диапазоне, включая окрестность минимума, нейтронные данные из принятой оценки согласуются с результатами broomstick-эксперимента с точностью до погрешности последних. Сечения кислорода из предыдущей версии ENDF/B-VI вели к заметному занижению пропускания в области минимума в сечении.

Наконец, на основе оцененных данных для кислорода и водорода рассчитывался возраст нейтронов в воде. Он был найден равным 26.6 см^2 , что согласуется с экспериментальным значением $26.6 \pm 0.6 \text{ см}^2$. Предыдущая оценка сечений кислорода в ENDF/B приводила к возрасту 26.3 см^2 .

8. Перечень цитированных экспериментальных работ

8.1. Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|--------------|-------------|--------------------------|----------|
| Block-75 | R.C.Block | J,NST,12,1,7501 | 20420 |
| Moxon-74 | M.C.Moxon | NP-20,29,7401 | 21676 |
| Koester-90 | L.Koester, | J,ZP/A,337,341,90 | 22217 |
| Schark-72 | R.A.Schrack | J,BAP,17,555(HE1),197204 | 10177 |
| Johnson-79 | C.H.Johnson | C,79KNOX,,807,7903 | 10992 |
| Perey-72 | F.G.Perey | R,ORNL-4823,197212 | 10377 |
| Finlay-93 | R.W.Finlay | J,PR/C,47,237,9301 | 13569 |
| Manero-68 | F.Manero | J,ARS,64,63,6802 | 20170 |
| Cierjacks-68 | S.Cierjacks | R, KFK-1000, 6806 | 2001 |
| Cierjacks-80 | S.Cierjacks | J,NIM,169,185,8004 | 20742 |
| Fouler-73 | J.L.Fowler | J,PR/C,8,545,197308 | 10137004 |
| Fouler-73 | J.L.Fowler | J,PR/C,8,545,197308 | 10137005 |
| Kalina-70 | J.Kalina | R,NYO-73-340,1970 | 10197 |
| Fossan-61 | D.B.Fossan | J,PR,123,209,6108 | 11256 |
| Larson-80 | D.C.Larson | C,80BNL,,277,8007 | 12882 |

8.2. Сечения реакций (n, α) и (n,n' α)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|------------|-------------|-----------------------|----------|
| Seitz-55 | J.Seitz | J,HPA,28,227,5503 | 21072 |
| Walton-55 | R.B.Walton | J,PR,107,1065,57 | 11400 |
| Bormann-63 | M.Bormann | J,ZP,174,1,6302 | 21344002 |
| Bormann-63 | M.Bormann | J,ZP,174,1,6302 | 21344004 |
| Dandy-68 | D.Dandy | R,AWRE-O-60/68,,6810 | 21474 |
| Leroux-68 | B.Leroux | J,NP/A,116,1,196,6808 | 21461 |
| Hlavac-64 | S.Hlavac | R,INDC(SLK)-002,9408 | 31478 |
| Dickens-70 | J.K.Dickens | J,NSE,40,283,197005 | 10096 |

8.3. Сечения реакций (n,p) и (n,np)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|-------------------|------------------|-------------------|---------|
| Schmidt-Hoenow-72 | M.Schmidt-Hoenow | J,RCA,17,142,7210 | 20545 |

| | | | |
|-------------|--------------|--------------------------|-------|
| Schantl-70 | W.Schantl | T,SCHANTL,70 | 21846 |
| Prasad-66 | R.Prasad | J,NP,85,476,196609 | 30007 |
| Mitra-66 | B.Mitra | J,NP,83,157,6607 | 30013 |
| Kantele-62 | J.Kantele | J,NP,35,353,62 | 11196 |
| De-Juren-60 | J.A.De Juren | J,PR,120,901,60 | 11411 |
| Subashi-00 | M.Subashi | J,NSE,135,(3),260,200006 | 22494 |
| Bormann-66 | M.Bormann | C,66PARIS,1,225,6704 | 20898 |
| Soeman-62 | K.W.Seeman | R,KAPL-2214,6209 | 11369 |
| De-Juren-62 | J.A.De Juren | J,PR,127,1229,62 | 11415 |
| Martin-54 | H.C.Martin | J,PR,93,498,5402 | 11390 |

8.4. Сечение неупругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|------------|------------------|---------------------|---------|
| Dickens-70 | J.K.Dickens | J,NSE,40,283,197005 | 10096 |
| Orphan-70 | V.J.Orphan | J,NSE,42,352,197012 | 10097 |
| Conner-53 | J.P.Conner | J,PR,89,712,5302 | 11388 |
| Nyberg-71 | K.Nyberg-Ponnert | J,PS,4,165,71 | 20245 |
| Burymov-69 | E.M.Burymov | J,YF,9,(5),933,6905 | 40229 |

8.5. Сечение и угловые распределения упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|----------------|-----------------|---------------------|---------|
| Boerker-88 | G.Boerker | C,88MITO,,193,88 | 22113 |
| Glendinning-82 | S.G.Glendinning | J,NSE,82,393,8212 | 10859 |
| Kinney-72 | W.E.Kinney | R,ORNL-4780,197204 | 10276 |
| Meier-69 | D.Meier | J,HPA,42,813,6904 | 20907 |
| Lundberg-67 | B.Lundberg | J,AF,34,247,6702 | 20163 |
| Lister-66 | D.Lister | J,PR,143,745,66 | 11334 |
| Lovchikova-62 | G.N.Lovchikova | J,AE,12,(1),48,6201 | 40230 |
| Boerker-88 | G. Boerker | C,88MITO,,193,88 | 22113 |
| Schreder-88 | G. Schreder | C,88MITO,,691,88 | 22121 |
| Glendinning-82 | S.G.Glendinning | J,NSE,82,393,8212 | 10859 |
| Baba-80 | M.Baba | C,88MITO,209,8805 | 22157 |

8.6. Сечение реакции (n,2n)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|-----------|-----------|---------------------|---------|
| Brill-61 | O.D.Brill | J,DOK,136,(1),55,61 | 40715 |

9. Заключение

9.1. Выводы.

В РОСФОНД рекомендуется включить файл оцененных данных для O-16 из библиотеки ENDF/B-VII.0 со следующими изменениями:

1. Номер материала MAT изменен на 816 (в ENDF/B – MAT 825).
2. Сечение захвата радиационного захвата принято в соответствии с данными принятыми в JENDL-3.3.
3. Сечение упругого рассеяния ниже 20 эВ принято постоянным.
4. Полное сечение ниже 1 кэВ определено как сумма парциальных.
5. Сечение упругого рассеяния выше 20 эВ определено как разность между полным сечением и суммой парциальных.

6. Рассматриваемая область энергий, распространявшаяся в ENDF/B-VII до 30 – 150 МэВ, ограничена 20 МэВ. Описания взаимодействий с кислородом нейтронов с энергиями выше 20 МэВ удалены.
7. Энергия реакции (n, α) откорректирована: Q=2.21560 МэВ вместо 2.2143 МэВ.
8. Секция MF=3, MT=3 удалена.

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 | 3.852 б | 46.803 б | 2.7846 б |
| Рад. захват | 0.1899 мб | 0.1590мб | 0.11400 мб |
| Реакция (n,p) | 0 | 0 | 0.0447 мб |
| Реакция (n,d) | 0 | 0 | 0.00555 мб |
| Реакция (n,t) | 0 | 0 | 0.000005 мб |
| Реакция (n,2n) | 0 | 0 | 0.000007 мб |

9.3.Автор обоснования оцененных данных

Николаев М.Н.

8.2. Кислород-17

Для ^{17}O в обиходе имеется лишь одна оценка, выполненная в 1978 г. Магурно (B.A. Magurno) для ENDF/B-V. Эта оценка используется в библиотеках ENDF/B-VII, JEFF-3.1 и ФОНД-2.2. В библиотеках JENDL-3.3 и CENDL-2 оцененные данные для этого изотопа отсутствуют.

Заключение

1. Выводы.

В РОСФОНД рекомендуется включить файл оцененных нейтронных данных для кислорода-17, оцененный Магурно.

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 | 3.743 б | 46.803 б | 2.7846 б |
| Рад. захват | 0.538 мб | 0.240 мб | 0.193 мб |
| Реакция (n,p) | 0 | 0 | 0.0215 мб |
| Реакция (n,d) | 0 | 0 | 0.0060 мб |
| Реакция (n,t) | 0 | 0 | 0.0059 мб |
| Реакция (n, ^3He) | 0 | 0 | 8E-6 мб |
| Реакция (n, α) | 0.235 б | 0.106 б | 0.0949 б |
| Реакция (n,2n) | 0 | 0 | 0.0616 мб |

3. Автор обоснования оцененных данных

Николаев М.Н.

8.3 Кислород-18

Для ^{18}O не существует ни одной полной оценки нейтронных данных. Правда, в библиотеку ФОНД-2.2 включен файл данных для этого изотопа, составленный Копецким и Ниропом (J.Кореску, D.Nierop), однако он не содержит данных о полном сечении, о сечении рассеяния, об энерго-угловых распределениях рассеянных нейтронов и не может быть использован в расчетах переноса нейтронов.

Решено было дополнить имеющийся файл данных ^{18}O данными о полном сечении и сечении рассеяния с расчетом, чтобы пользователи-инженеры могли получать из содержащихся в библиотеке данных сечения для природного кислорода. Заметим, что в интерференционном минимуме при 2.35 МэВ сечение ^{17}O составляет всего 0.1 барна и учет вклада ^{18}O увеличивает это сечение для природного кислорода примерно на 8%, что существенно больше погрешности, с которой известно сечение в этом минимуме.

Дополнение состояло во включении в файл параметров разрешенных резонансов из оценки Мухабхаба (1987) с помощью которых описываются сечения рассеяния и захвата до 3.15 МэВ. От 3.15 до 20 МэВ полное сечение оценено на основе экспериментальных данных, а сечение рассеяния получено как разность между этим полным и суммой сечений неупругих взаимодействий, оцененных Копецким и Ниропом. Всем резонансам приписана одинаковая радиационная ширина - 0.23 эВ.

На рис. 1 оцененное полное сечение сравнивается с экспериментальными данными. Видно, что не все резонансные параметры определены оптимально. Резонансный интеграл, рассчитанный по резонансным параметрам существенно ниже непосредственно измеренного и рекомендованного Мухабхабом (0.87 ± 0.04 мб). Это расхождение отмечается и самим Мухабхабом, предполагающим, что пропущен какой-то низколежащий резонанс.

Таким образом, ясно, что оценку нейтронных сечений кислорода-18 желательно в будущем уточнить.

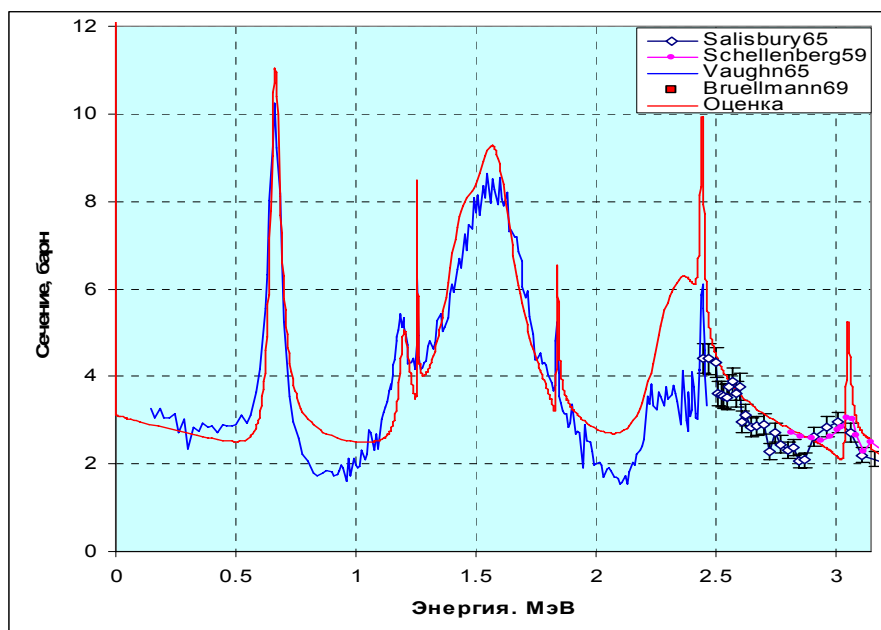


Рисунок 1а. Полное сечение кислорода-18.

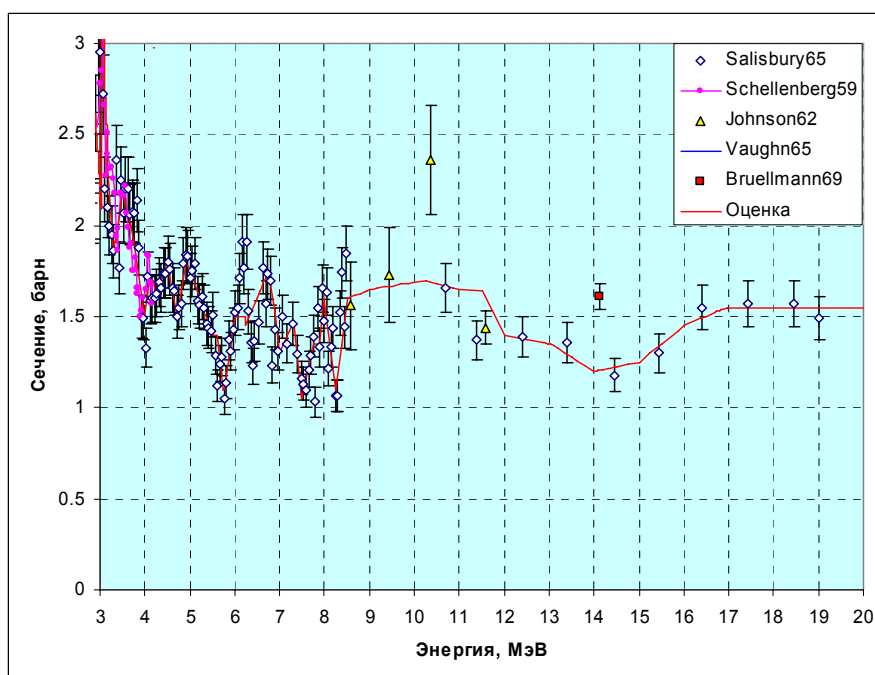


Рисунок 16. Полное сечение кислорода-18.

Заключение

1. Выводы

В РОСФОНД рекомендуется принять оценку Копецкого-Ниропа с добавлением данных о полном сечении и сечении упругого рассеяния.

2. Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle \sigma \rangle$ спектр Максвелла ($T=1.35 \text{ МэВ}$) |
|------------------------|-----------------------------|-----------------|--|
| Упругое рассеяние | 3.202 | 37.850 б | 2.7846 б |
| Рад. захват | 0.154 мб | 0.0695 мб | 0.105 мб |
| Реакция (n,p) | 0 | 0 | $4 \cdot 10^{-4}$ мб |
| Реакция (n,d) | 0 | 0 | $9 \cdot 10^{-4}$ мб |
| Реакция (n,t) | 0 | 0 | $7 \cdot 10^{-7}$ мб |
| Реакция (n, α) | 0 | 0 | 0.189 мб |
| Реакция (n,2n) | 0 | 0 | 0.655 мб |
| Реакция (n,3n) | 0 | 0 | 0.005 мб |

3. Автор обоснования оцененных данных

Николаев М.Н.