

Михееву 55 лет.

ISSN 0207-3668

1548

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ INDC(ССР)-268/G
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ:

Ядерные константы

ВЫПУСК

4

1986

Сборник подготовлен Физико-энергетическим институтом
и Комиссией по ядерным данным

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **О.Д. КАЗАЧКОВСКИЙ**

НЕЙТРОННЫЕ КОНСТАНТЫ И ПАРАМЕТРЫ

Зам. главного редактора **Б.Д. КУЗЬМИНОВ**

Ф.Н. Беляев, В.П. Вертебный, В.В. Возяков, В.Я. Головня, С.С. Коваленко,
В.Е. Колесов, В.А. Коньшин, В.Н. Манохин, В.И. Мостовой, Г.В. Мурадян,
В.Н. Нефедов, Ю.П. Попов, О.А. Сальников, Г.Н. Смиренкин, В.А. Толстикова,
Г.Я. Труханов, Г.Е. Шаталов, М.С. Юдкевич, Г.Б. Яньков, В.П. Ярына

КОНСТАНТЫ И ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ ЯДРА И ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Зам. главного редактора **Ф.Е. ЧУКРЕЕВ**

В.В. Варламов, Б.Я. Гужовский, П.П. Дмитриев, В.В. Ежела, Б.В. Журавлев,
Р.Б. Иванов, Б.С. Ишханов, В.М. Кулаков, Ю.В. Сергеенков, В.Е. Сторижко,
Н.П. Чижова

ЯДЕРНО-РЕАКТОРНЫЕ ДАННЫЕ

Зам. главного редактора **М.Ф. ТРОЯНОВ**

П.П. Благоволин, А.И. Воропаев, А.Ю. Гагаринский, Л.В. Диев, С.М. Зарицкий,
М.Н. Зизин, А.А. Лукьянов, В.Г. Мадеев, В.И. Матвеев, И.П. Матвеев,
М.Н. Николаев, Э.Е. Петров, Л.В. Точеный, В.В. Хромов

Ответственный секретарь **В.В. Возяков**

© Центральный научно-исследовательский институт
информации и технико-экономических исследований
по атомной науке и технике (ЦНИИатоминформ), 1986

ТАЛОН ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
 по оценке использования статей научно-технического сборника "Вопросы атомной науки и техники", серия _____
Ядерные константы, вып. 4, 1986

№	Наименование статей	Использована		Не использована		
		в разработках	для обозначения	не соответствует тематике работ	не содержит новых прогрессивных решений	информация опоздала

Манохин В.Н., Блохин А.И.
 Деятельность Центра ядерных данных по оценке нейтронных данных

Коньшин В.А.
 Оценка ядерных данных тяжелых делящихся ядер

Шпаков В.И.
 Абсолютные измерения сечений деления важнейших нуклидов

Толстиков В.А.
 Измерения и анализ сечений радиационного захвата нептуния и изотопов урана

Мурзин А.В., Вертебный В.П., Кирилюк А.Л., Либман В.А., Литвинский Л.Л., Новоселов Г.М., Разбудей В.Ф., Сидоров С.В., Трофимова Н.А.
 Средние параметры взаимодействия промежуточных нейтронов с ядром ^{238}U

Фурсов Б.И., Кудяев Г.А., Смиренкин Г.Н.
 Оценка сечений деления изотопов кюрия быстрыми нейтронами

Игнатюк А.В., Маслов В.А.
 Согласованная оценка нейтронных сечений изотопов ^{242}Cm – ^{244}Cm

Старичкаи Т., Сайлер К.
 Измерение и компиляция нейтронных сечений

Проняев В.Г., Игнатюк А.В.
 Переоценка нейтронных сечений железа

_____ 198 г.

Начальник ОНТИ

Примечание. Талон заполняется в 30-дневный срок после получения сборника и направляется в адрес ЦНИИатоминформа (127434, Москва, аб/ящ 971)



ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

Серия: ЯДЕРНЫЕ КОНСТАНТЫ

Научно-технический сборник

Выпуск 4

НЕЙТРОННЫЕ КОНСТАНТЫ И ПАРАМЕТРЫ

Москва Издается с 1971 г. 1986

СОДЕРЖАНИЕ

Манохин В.Н., Блохин А.И. Деятельность Центра ядерных данных по оценке нейтронных данных	3
Коньшин В.А. Оценка ядерных данных тяжелых делящихся ядер	7
Шпаков В.И. Абсолютные измерения сечений деления важнейших нуклидов	19
Толстиков В.А. Измерения и анализ сечений радиационного захвата нептуния и изотопов урана	23
Мурзин А.В., Вертебный В.П., Кирилук А.Л., Либман В.А., Литвинский Л.Л., Новоселов Г.М., Разбудей В.Ф., Сидоров С.В., Трофимова Н.А. Средние параметры взаимодействия промежуточных нейтронов с ядром ^{238}U	30
Фурсов Б.И., Кудяев Г.А., Смиренин Г.Н. Оценка сечений деления изотопов кюрия быстрыми нейтронами	37
Игнатьев А.В., Маслов В.М. Согласованная оценка нейтронных сечений изотопов $^{242-244}\text{Cm}$	43
Старичка Т., Сайлер К. Измерение и компиляция нейтронных сечений	48
Проняев В.Г., Игнатьев А.В. Переоценка нейтронных сечений железа	51
Библиографический индекс работ, помещенных в настоящем выпуске, в Международной системе СИИДА	58
Содержание сборника "Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы" за 1986 г.	60

В настоящем выпуске сборника помещено 9 докладов, представленных на IV Координационное совещание стран - членов СЭВ по оценке ядерных данных, которое состоялось 11-15 марта 1986 г. в г.Обнинске. Доклады Хена Я., Валента В. "О библиотеках ядерных данных, используемых на заводе энергетического машиностроения "Шкода", Коржа И.А. "Измерение и анализ сечений рассеяния нейтронов ядрами конструкционных материалов в области энергий 0,5-9,0 МэВ" и Игнатюка А.В., Кравченко И.В., Мантурова Г.Н. "Библиотека рекомендованных оцененных нейтронных сечений для важнейших продуктов деления ядер" будут опубликованы в вып. I за 1987 г.

УДК 539.170

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЦЕНТРА ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ ПО ОЦЕНКЕ НЕЙТРОННЫХ ДАННЫХ

В. Н. М а н о х и н, А. И. Б л о х и н

ACTIVITY OF NUCLEAR DATA CENTRE ON NEUTRON DATA EVALUATION.
This paper describes activities of the Nuclear Data Centre in
the region of nuclear data evaluation and formation of the
recommended evaluated nuclear data library.

Деятельность Центра по ядерным данным Госкомитета по использованию атомной энергии (г.Обнинск) (ЦЯД) в области оценки нейтронных данных и создания библиотеки этих данных велась по следующим направлениям:

- постановка и развитие системы программ обслуживания библиотек в формате ENDF;
- развитие теории ядерных реакций и методов оценки с использованием теоретических моделей;
- оценка нейтронных данных конструкционных материалов и ядер - продуктов деления;
- организация анализа и экспертизы оцененных данных для выработки рекомендаций по улучшению их использования;
- формирование, проверка и корректировка файлов оцененных данных.

Конечная цель деятельности - создание библиотеки файлов рекомендованных оцененных нейтронных данных, которая может служить основой для более совершенного константного обеспечения расчетов реакторов, а также других приложений в науке и технике. Большинство работ проводилось при тесном сотрудничестве с другими лабораториями ФЭИ, а также институтами СССР и стран - членов СЭВ.

Постановка программ обслуживания библиотеки оцененных данных. В настоящее время в ЦЯДе имеется большое число файлов оцененных нейтронных данных в форматах ENDF/B, KEDAK, UKNDL и т.п. Ниже представлен перечень национальных зарубежных библиотек оцененных ядерных данных, полученных ЦЯДом в рамках международного обмена:

ENDF/B-IV.....	Американская национальная библиотека, версия 4
Файлы:	
TAPE 401-411...	общего назначения;
TAPE 412	данных, используемых в нейтронной дозиметрии;
TAPE 413.....	данных, используемых в качестве стандартов в ядерных измерениях;
TAPE 414-419...	данных для продуктов деления;
TAPE 420-421...	данных по взаимодействию γ -квантов
JENDL-1.....	Японская национальная библиотека, версия 1, файлы общего назначения
JENDL-2.....	То же, версия 2
JENDL-FP.....	То же для продуктов деления
ENDL-78.....	Ливерморская национальная библиотека, версия 1978 г.
ENDL-82.....	То же, версия 1982 г.
ENDL-84.....	То же, версия 1984 г.
KEDAK-3.....	Западногерманская библиотека
UKNDL	Английская национальная библиотека
ENDF/B-V.....	Американская национальная библиотека, версия 5

Файлы:

TAPE 511.....	стандартов;
TAPE 509,510, 541,546,566....	данных для продуктов деления;
TAPE 531.....	данных для нейтронной дозиметрии;
TAPE 532,564....	данных по сечениям активации;
TAPE 533.....	данных по сечениям накопления легких элементов;
TAPE 514,521,522, 565.....	данных для актинидов
INDL/V.....	Международная библиотека оцененных нейтронных данных скомпилирована Секцией ядерных данных МАГАТЭ для различных элементов и реакций
INDL/A.....	То же для актинидов
IRDF/82.....	То же для элементов и реакций, используемых в реакторной дозиметрии

Для представления данных широкое распространение получили формат ENDF/B, а также форматы UKNDL и KEDAK. Для организации работ, связанных как с подготовкой, так и с обработкой оцененных нейтронных данных, в ЦЯДе были освоены наиболее используемые сервисные программы по оперированию с данными в формате ENDF/B, а также созданы программы с дополнительными функциями [1].

Ниже приведен перечень освоенных в ЦЯДе на ЭВМ ЕС-1033 сервисных программ и программных комплексов с кратким перечислением выполняемых ими функций:

PRINKED.....	Выборка данных по элементу, реакции и т.п. из библиотек в формате KEDAK
MERGER, PRINF, PRINTE.....	То же в формате ENDF/B
PRINUKN.....	То же в формате UKNDL
PRINKED.....	Составление информации об общем содержании файла данных в формате KEDAK
SUMRIZ, LSTFCY, PRINF.....	То же в формате ENDF/B
PRINUKN.....	То же в формате UKNDL
RESEND, LINEAR, RECENT, SIGMA-1, NJOY.....	Восстановление сечений в резонансной области энергий нейтронов, учет доплеровского уширения уровней
INTEND, GROPIE, NJOY.....	Вычисление неблокированных групповых сечений
NJOY.....	Вычисление блокированных групповых сечений, матриц неупругих переходов
INTER.....	Вычисление тепловых сечений, g-факторов, резонансных интегралов
TBL-1 (программа обрабатывает дан- ные, полученные с помощью программ GROPIE, NJOY).....	Представление групповых сечений в виде таблиц
CHECKER, версии 1981 и 1983 гг....	Проверка данных на соответствие структуре формата ENDF/B-V
PHZKON, версии 1981 и 1983 гг.; PSYCHE, версии 1981 и 1983 гг.	Проверка данных на физическую согласованность нейтронных данных
CREST, DICTION, CRMAT.....	Корректировка данных в формате

На основе этих программ в ЦЯДе разработана технология по обработке запросов на оцененные ядерные данные, позволяющая проводить выборку, обработку и корректировку данных в форматах UKNDL, KEDAK и ENDF/B. Для осуществления такой работы была создана библиотека рабочих алгорит-

Включение файлов в библиотеку проводилось на основе рекомендаций, выработанных после анализа и экспертизы файлов специалистами ФЭИ и других институтов. Все файлы записаны в формате ENDF/B-V, проверены программами SNECKER и FIZCON на соответствие формату и на физическую согласованность.

Ниже приведен перечень библиотек, выполнивших оценки нейтронных данных для некоторых изотопов, вошедших в библиотеку:

МАГАТЭ	Водород, ^3He , ^{10}B , ^{12}C , ^{237}Np
ФЭИ	Дейтерий, $^6,^7\text{Li}$, кислород, натрий, хром, $^{50,52-54}\text{Cr}$, железо, $^{54,56-58}\text{Fe}$, никель, $^{58,60-64}\text{Ni}$, ^{238}U
ИЯЭ АН БССР	^{235}U , $^{239-242}\text{Pu}$
Технический университет в Дрездене + ФЭИ	Кремний, ^{93}Nb , свинец
ENDF/B-IV	Азот
UKNDL	$^{241,243}\text{Am}$

Далее приведен перечень библиотек, выполнивших оценки нейтронных данных для важнейших продуктов деления, вошедших в библиотеку:

ФЭИ	^{99}Te , $^{101,102,104}\text{Ru}$, ^{103}Rh , $^{105,107}\text{Pd}$, ^{109}Ag , ^{129}I , ^{131}Xe , ^{135}Cs , ^{144}Ce , $^{143,145}\text{Nd}$, ^{147}Pm , $^{147,149,151}\text{Sm}$
ENDF/B-V	^{141}Pr , $^{151,153}\text{Eu}$
JENDL-1	^{106}Ru , ^{133}Cs
JENDL-2	^{95}Mo

Файлы, включенные в библиотеку рекомендованных оцененных нейтронных данных, выполнены на современном уровне, однако с точки зрения потребностей в точности ядерных данных некоторые оценки требуют дальнейшего улучшения. В частности, нуждаются в уточнении сечения захвата конструкционных материалов в области энергий нейтронов ниже 1 МэВ, функции возбуждения неупругого рассеяния в области порога, сечения захвата некоторых продуктов деления, сечения пороговых реакций некоторых ядер.

Проведенная экспертиза оценок показала, что для уточнения рекомендуемых нейтронных сечений важнейших реакторных материалов необходимо дальнейшее совершенствование методов измерений и теоретического анализа нейтронных данных.

Список литературы

1. Блохин А.И., Булеева Н.Н., Колесов Э.Е. и др. Постановка на ЭВМ ЕС-1033 комплекса программ для работы с библиотеками оцененных нейтронных данных в формате ENDF/B. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1984, вып. I(55), с. 16.
2. Беланова Т.С., Горбачева Л.В., Груздевич О.Т. и др. Сравнительный анализ оценок сечений радиационного захвата нейтронов для важнейших продуктов деления. - В кн.: Нейтронная физика: Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 2-6 октября 1983 г. Т. 2. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984, с. 92; Атомная энергия, 1984, т. 57, с. 243.
3. Груздевич О.Т., Игнатюк А.В., Маслов В.М., Пащенко А.Б. Согласованное описание сечений реакций $(n,n'f)$ и (n,xn) для трансурановых ядер. - В кн.: Нейтронная физика: Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 2-6 октября 1983 г. Т. 2. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984, с. 318.
4. Игнатюк А.В., Корнилов Н.В., Маслов В.М., Пащенко А.Б. Изомерное отношение и сечение реакции $^{237}\text{Np}(n,2n)$: Труды 15-го Международного симпозиума по физике деления. Гауссиг, 1985.
5. Ковышин В.А., Андипов Г.В., Суховицкий Е.Ш. и др. Оцененные нейтронные константы урана-235. Минск: Наука и техника, 1985.

6. Анципов Г.В., Коньшин В.А., Суховицкий Е.Ш. Ядерные константы для изотопов плутония. Минск: Наука и техника, 1982.
7. Николаев М.Н., Базазянц Н.О., Забродская А.С. и др. Нейтронные данные для дейтерия: Аналитический обзор ОБ-II4. Обнинск, 1980.
8. Николаев М.Н., Абагян Л.П., Базазянц Н.О. и др. Нейтронные данные для кислорода: Обзор СБ-77. Обнинск, 1977.
9. Николаев М.Н., Абагян Л.П., Корчагина Ж.А. и др. Нейтронные данные для урана-238: Обзор ОБ-4б. Обнинск, 1978.
10. Бондаренко И.М., Петров Э.Е. Оценка сечений взаимодействия нейтронов с ядрами ${}^6\text{Li}$ для расчета керма-фактора. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1984, вып.3(57), с. 35; Бондаренко И.М., Петров Э.Е. Оценка сечений взаимодействия нейтронов с ядрами ${}^7\text{Li}$ для расчета керма-фактора. - Там же, с. 44.
11. Nuclear data standards for nuclear measurements. Vienna: IAEA, 1983; Techn. Reports N 227.
12. Summary of JENDL-2 general purpose file. Ed. T.Nakagawa: NEANDC(J)-99/AU, 1984.
13. Kikuchi Y., Nakagawa T., Matsunobu H. e.a. Neutron cross-sections of 28 fission product nuclides adopted in JENDL-1: JAERI-1268, 1981.
14. ENDF/B Summary Documentation, ENDF-201, 1979.

Статья поступила в редакцию 17 марта 1986 г.

УДК 539.172.4

ОЦЕНКА ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ДЕЛЯЩИХСЯ ЯДЕР

В. А. К о н ь ш и н

THE EVALUATION OF NUCLEAR DATA FOR HEAVY FISSIONABLE NUCLEI. A brief review of nuclear data evaluation methods for fissionable nuclei is given. Main features of theoretical models for prediction of neutron cross-sections as well as problems for further development of evaluation methods are under discussion. Application of the coupled channel methods, the level density model with inclusion of collective effects, a multistep statistical model with fission competition and use of new experimental data allow the reliability of evaluated data to be increased.

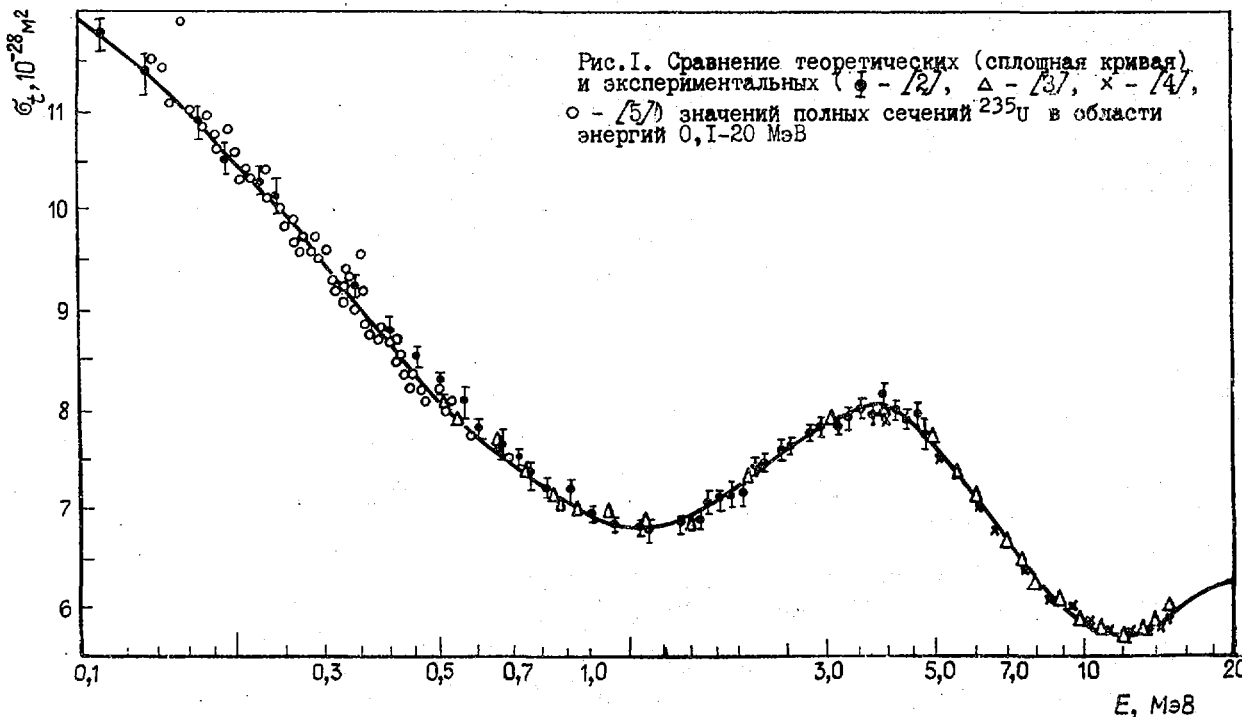
В последние годы достигнут существенный успех в теоретической интерпретации нейтронных сечений. Это позволило использовать при оценке нейтронных данных метод связанных каналов, корректные модели плотности уровней и переходных состояний деления, многокаскадную статистическую модель с учетом возможности предравновесного распада. Благодаря этому работы по оценке нейтронных сечений получили дальнейшее развитие. Однако успехи не означают, что все проблемы решены.

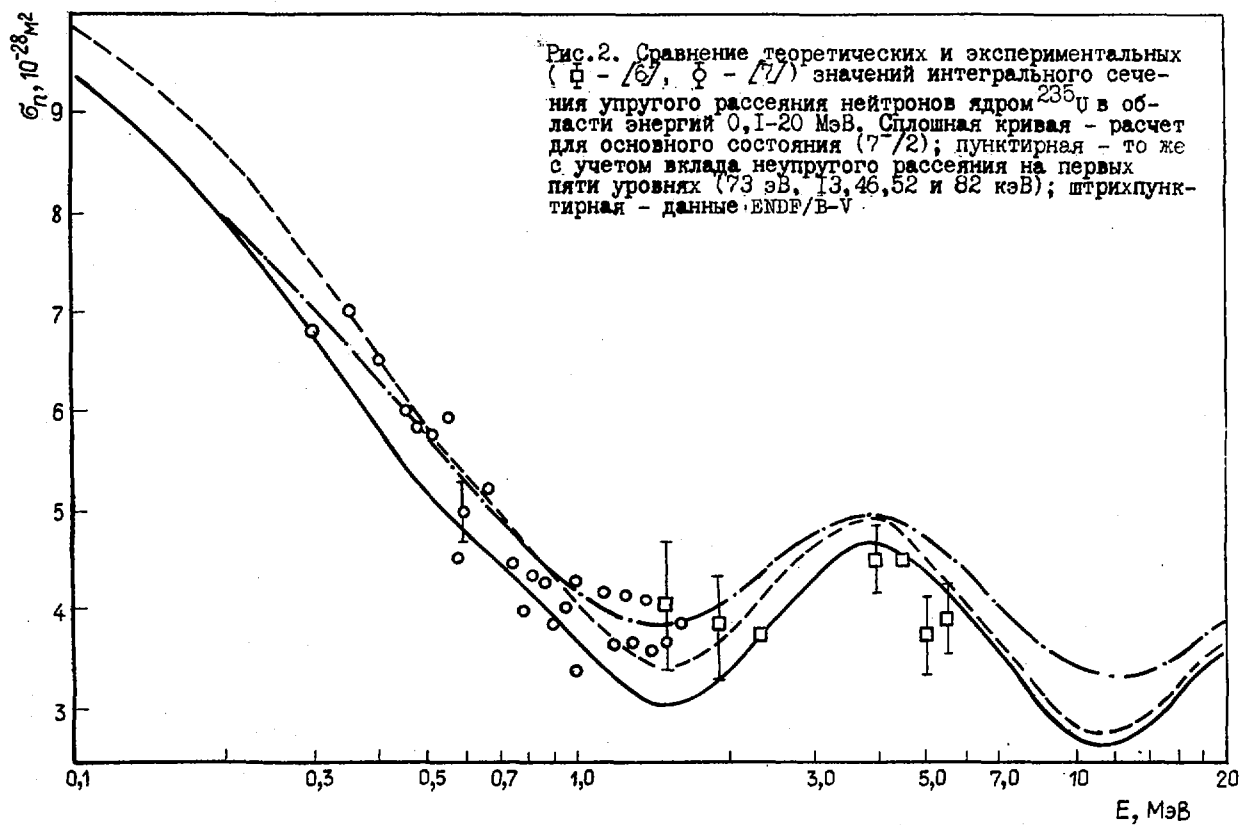
Применение метода связанных каналов
для оценки нейтронных сечений делящихся ядер

Применение метода связанных каналов при оценке ядерных данных потребовало создания программы для ЭВМ, которая была бы достаточно быстрой, чтобы проводить детальные расчеты по некоторым ядрам. Способы ускорения численного решения уравнений обобщенной оптической модели, использованные автором данной статьи, изложены в работе [1]. Модификация математической программы, реализующей метод связанных каналов, позволила использовать метод для нечетных ядер с большим

значением спина основного состояния, например для $^{235}\text{U}(7/2)$. Оптимизация параметров потенциала проводилась поисковой программой, использующей метод сопряженных градиентов, подгонка же параметров по экспериментальным данным велась не в отдельных точках, а одновременно в области энергий 1 кэВ - 20 МэВ. В качестве экспериментальных данных, которые служили основой для получения параметров потенциала, были использованы оцененные значения S_0, S_1 и σ_p в области энергий около нескольких килоэлектронвольт и полного сечения σ_t в области энергий 1 кэВ - 20 МэВ. Кроме этих данных использовались также наиболее надежные экспериментальные данные об угловых распределениях упруго- и неупругорассеянных нейтронов, в которых четко выделен вклад уровней и пренебрегается вкладом компаундного механизма. Проведенная оптимизация программы для ЭВМ и ускорение счета, позволившие использовать в качестве количественного критерия подгонки параметров нефермического потенциала величину χ^2 , привели к получению оптимальных параметров обобщенной оптической модели, единых для группы тяжелых ядер. Использование этих параметров позволило описать имеющуюся экспериментальную информацию по оптическим сечениям для $^{238}\text{U}, ^{235}\text{U}, ^{239}\text{Pu}, ^{240}\text{Pu}, ^{232}\text{Th}$ практически в пределах экспериментальных ошибок [1].

На основе расчетов по методу связанных каналов была проведена оценка оптических сечений взаимодействия нейтронов с ядрами $^{235}\text{U}, ^{236}\text{U}, ^{238}\text{U}, ^{239-242}\text{Pu}$ в области энергий 1 кэВ - 20 МэВ. Различие теоретических и экспериментальных значений полных сечений - не более $\pm 2\%$ во всей рассматриваемой области энергий (рис.1). Было проведено детальное сравнение дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния нейтронов, рассчитанных по обобщенной оптической модели, с имеющимися экспериментальными данными для $^{238}\text{U}, ^{235}\text{U}, ^{239}\text{Pu}$. В расчетных сечениях учтен вклад рассеяния нейтронов через составное ядро, существенный при энергии меньше 4 МэВ. Оказалось, что старые экспериментальные данные по угловым распределениям "упругого" рассеяния (а в эту группу входит абсолютное большинство данных) могут быть корректно интерпретированы только с учетом того, что они содержат вклад неупругого рассеяния по крайней мере на двух первых возбужденных уровнях. Как следствие, оцененные данные, основанные на разложении экспериментальных данных по полиномам Лежандра, значительно занижают анизотропию упругого рассеяния. Этот вывод можно сделать из рис. 2-4, где сравниваются экспериментальные и теоретические (расчет по методу связанных каналов и статистической модели) сечения интегрального упругого взаимодействия для ^{235}U и угловые распределения рассеянных нейтронов для ^{238}U .





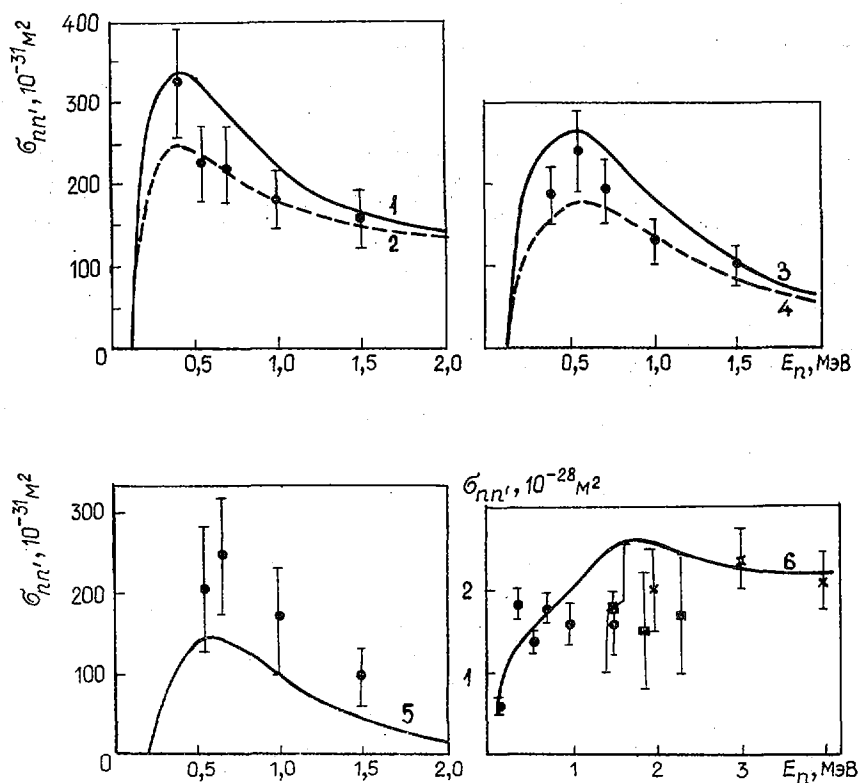


Рис. 4. Сравнение теоретических и экспериментальных [9] данных по возбуждению групп уровней ^{235}U при неупругом рассеянии нейтронов. Сумма уровней 103; 129,3 и 150,5 кэВ (кривая 1); 103 и 129,3 кэВ (кривая 2); 170,7; 171,4; 197,1 и 150,5 кэВ (кривая 3); 170,7; 171,4 и 197,1 кэВ (кривая 4); 225,4; 291,1; 294,7 кэВ (кривая 5); 6 - полное сечение неупругого рассеяния (■ - [6], ● - [9], * - [10])

Метод связанных каналов развит для ядер с ротационной или вибрационной полосами уровней. Пока не существует программы, которая позволила бы учесть связь этих полос. Проводится определенная работа в целях создания ЭВМ-программы, позволяющей проводить расчет сечений взаимодействия нейтронов с ядрами, в которых низколежащие уровни могут быть описаны как смесь вращательных и колебательных состояний. Этот метод был применен для расчета функций возбуждения вибрационных уровней ^{238}U [11]. Оказалось, что сечение прямого возбуждения этих уровней невелико (около $1 \cdot 10^{-31} \text{ м}^2$), так что расчет сечения возбуждения уровней посредством образования компаунд-ядра позволяет хорошо описать экспериментальные данные [11]. Преимущества рассматриваемой модели должны проявиться в большей степени в случае ядер конструкционных материалов.

Использование статистической модели ядра для расчета и оценки нейтронных сечений делящихся ядер

Коэффициенты нейтронных проницаемостей, полученные методом связанных каналов, использовались в расчетах по статистической модели ядра. Корректность расчета нейтронных проницаемостей сказывается в первую очередь на величине сечения образования составного ядра и, следовательно, на надежности расчета и оценки как полного сечения неупругого рассеяния, так и сечения на отдельных уровнях. Показано [11], что использование в расчетах по статистической модели проницаемостей из обобщенной оптической модели и учет прямого возбуждения нижних уровней позволяют получить для ^{239}Pu лучшее согласие с экспериментальными данными не только нижних уровней, но и тех, сечения возбуждения которых полностью определяются распадом составного ядра.

Коллективные эффекты в плотности уровней учитывались в рамках метода описания усредненных характеристик возбужденных ядер [12]. При проведении оценки нейтронных сечений изотопов урана и плутония исследовалось влияние различных моделей плотности уровней на величины рассчитываемых сечений, в частности σ_{np} и $\sigma_{np'}$. Наши расчеты показали, что использование традиционной модели ферми-газа для плотности уровней приводит к значительному расхождению рассчитываемых сечений σ_{np} с экспериментальными данными. Наилучшее согласие с экспериментальными данными по сечениям σ_{np} и $\sigma_{np'}(E_q)$ для ^{238}U и ^{239}Pu во всей области энергий было достигнуто при использовании плотности уровней из модели ферми-газа с учетом коллективных мод и спектрального фактора в виде двух линий Лоренца. Главной трудностью при измерении сечения неупругого рассеяния нейтронов на ^{235}U является вычитание спектра деления из общего спектра и неупругих вкладов низколежащих уровней из упругого пика. Авторы работы [9] в эксперименте с недостаточно высоким энергетическим разрешением определили сечение неупругого рассеяния нейтронов для групп уровней ^{235}U . На рис. 4 сравниваются экспериментальные [9] и полученные авторами работы [1] теоретические данные для трех групп уровней. Из рисунка видно, что теоретические и экспериментальные данные интегрального характера согласуются в пределах экспериментальных погрешностей. Более детальное сравнение провести трудно из-за низкого энергетического разрешения в эксперименте [9] (не ясно, например, был ли включен уровень 150,5 кэВ в экспериментально измеренное значение $\sigma_{np'}$ для группы уровней $100 < q < 150$ кэВ). Отметим, что рассчитанное полное сечение неупругого рассеяния в области 1-2,5 МэВ лежит несколько выше экспериментальных данных [9], полученных с плохим энергетическим разрешением (кривая 6 рис. 4), подтверждая предположение, что в этих экспериментах вклад от низколежащих уровней был включен в упругое рассеяние.

Для делящихся нечетных ядер необходимо учитывать процесс $(n, \eta f)$, что особенно важно при расчете сечения радиационного захвата, так как он приводит к более сильной спиновой и энергетической зависимостям радиационных ширин. Важным фактором при расчете сечений по статистической модели является не только учет конкуренции процессов $(n, \eta f)$ и $(n, \eta n')$, но и корректность способа этого учета. Проведенные исследования показали, что недостаточно учитывать испускание только первого η -кванта, поскольку имеется определенная вероятность деления или неупругого рассеяния после испускания нескольких последовательных η -квантов и, кроме того, нельзя пренебречь вероятностью дальнейшей η -разрядки, если энергия возбуждения ядра после испускания η -кванта больше E_n . Поэтому учет конкуренции деления и неупругого рассеяния η -разрядкой был рассмотрен только для двух каскадов.

Коэффициенты нейтронных проницаемостей, используемые при расчете процессов распада составного ядра, должны быть величинами проницаемостей для возбужденных состояний ядер, как требует принцип детального равновесия. Однако на практике эти проницаемости, как правило, отождествляют с нейтронными проницаемостями для основных состояний ядер, получаемых из сферической оптической модели, в которой зависимость T_n от энергии возбуждения ядра игнорируется.

Коэффициенты нейтронных проницаемостей для возбужденных состояний ядер могут быть получены в обобщенной оптической модели. Следует отметить, что различия нейтронных проницаемостей, получаемых из сферической оптической модели и методом связанных каналов, становятся особенно значительными с ростом величины орбитального момента l , когда сами значения T_n уменьшаются. Этот факт наиболее существенно сказывается на расчете сечения радиационного захвата, так как это сечение определяется в основном вкладами каналов с малыми нейтронными проницаемостями, слабо конкурирующих с процессом (n, η) .

Исследование этого эффекта для первых двух возбужденных состояний ротационной полосы ядра ^{238}U показало, что значения силовых функций и, следовательно, проницаемостей для разных состояний значительно различаются, особенно при малых энергиях налетающих нейтронов, а с ростом энергии различие уменьшается. Рассчитанные значения силовых функций для ^{238}U в области низких энергий (около 1 кэВ) оказались равными: $s_0^0 = 1,16 \cdot 10^{-4}$, $s_1^0 = 1,94 \cdot 10^{-4}$, $s_0^2 = 1,03 \cdot 10^{-4}$, $s_1^2 = 1,89 \cdot 10^{-4}$, $s_0^4 = 0,79 \cdot 10^{-4}$, $s_1^4 = 3,74 \cdot 10^{-4}$. Проведенные расчеты сечения σ_{np} для ^{238}U показали, что использование проницаемостей для возбужденных состояний 2^+ и 4^+ из обобщенной оптической модели позволяет гораздо лучше описать экспериментальные данные в области энергий налетающих нейтронов 0,3-0,8 МэВ (рис. 5).

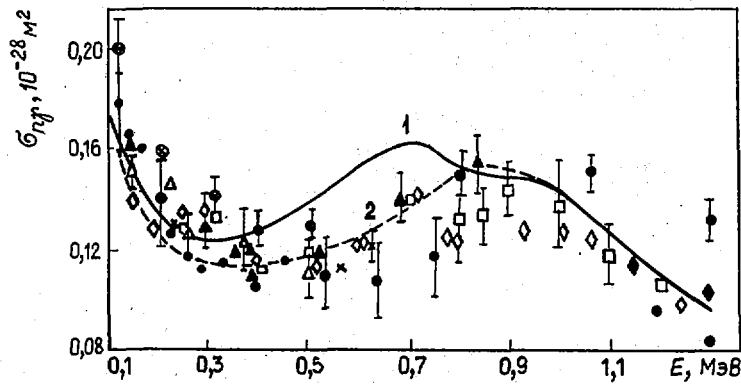


Рис.5. Влияние различия нейтронных проникаемостей для основного и возбужденного состояний на расчетные значения $\sigma_{n\nu}$ для ^{238}U :
 1 - метод связанных каналов только для основного состояния;
 2 - метод связанных каналов для основного и первых двух возбужденных состояний. Экспериментальные точки взяты из работы [17]

Оценка сечения радиационного захвата ^{236}U , сделанная недавно в Институте ядерной энергетики (ИЯЭ) АН БССР, подтверждает экспериментальные данные [13,14]. Эти данные лежат примерно на 40% ниже существовавших ранее экспериментальных результатов. Как показали расчеты, трудно описать даже эти наиболее низкие экспериментальные данные по сечению $\sigma_{n\nu}$ с едиными параметрами во всей области энергий 1-300 кэВ, если не учитывать различие значений силовых функций для основного и возбужденного состояний (рис.6). Расчеты по методу связанных каналов дают следующие значения силовых функций для ^{236}U : $s_0^+ = 1,156 \cdot 10^{-4}$, $s_1^+ = 1,74 \cdot 10^{-4}$, $s_2^+ = 1,0 \cdot 10^{-4}$, $s_3^+ = 1,54 \cdot 10^{-4}$, $s_4^+ = 0,78 \cdot 10^{-4}$, $s_5^+ = 3,0 \cdot 10^{-4}$.

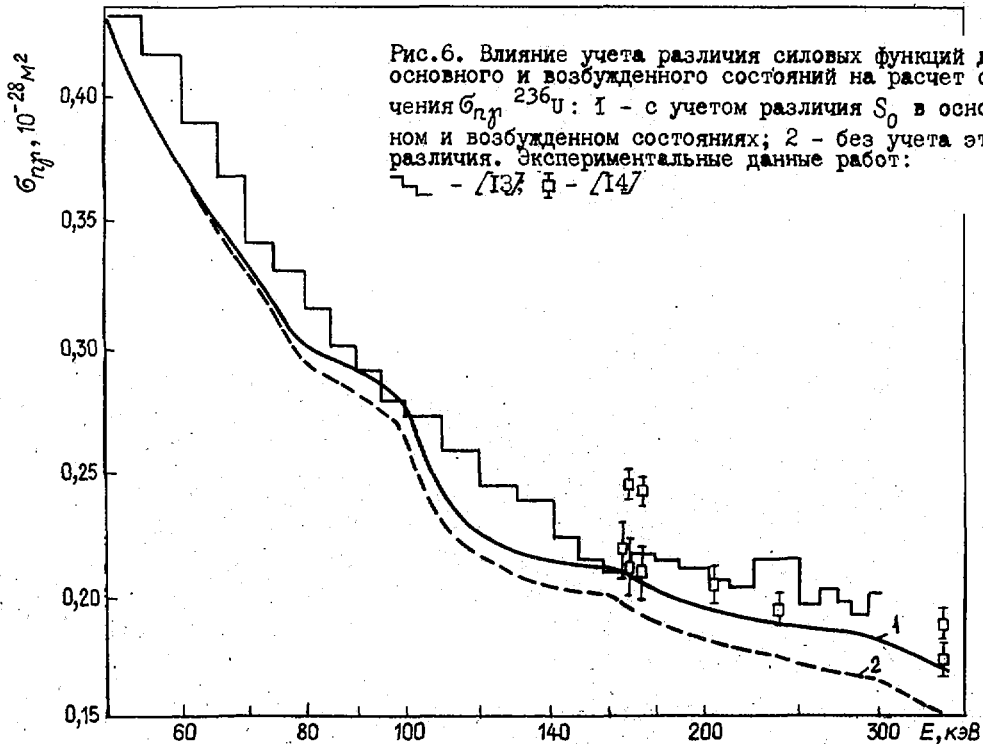


Рис.6. Влияние учета различия силовых функций для основного и возбужденного состояний на расчет сечения $\sigma_{n\nu}$ ^{236}U : 1 - с учетом различия S_0 в основном и возбужденном состояниях; 2 - без учета этого различия. Экспериментальные данные работ: \square - [13] \square - [14]

Плотность уровней деформированных аксиально-симметричных ядер и систематика параметров

Плотность уровней ядер играет решающую роль во всех практических приложениях статистической модели ядерных реакций. В рамках модели ферми-газа оказалось невозможным описать абсолютное значение наблюдаемой плотности уровней ядер при энергии возбуждения, равной энергии связи нейтронов. Как стало ясно, это связано с тем, что модель, основанная на представлении о полном размешивании в возбужденном ядре коллективных степеней свободы, не учитывает коллективных эффектов; учет можно сделать в рамках феноменологической модели плотности уровней, развитой в работе [12]. Модель, учитывающая основные представления о структуре возбужденных ядер, является достаточно простым и удобным инструментом для практических приложений.

В работах по оценке ядерных данных в области энергий выше дискретного спектра уровней использована модель сверхтекучего ядра с учетом коллективных мод. Для описания плотности низколежащих уровней в области до 1,0-1,5 МэВ весьма плодотворным является использование модели постоянной температуры:

$$\rho(U, J^{\pi}) = \frac{1}{\bar{T}_n} \exp\left\{ (U - E_0) / \bar{T}_n \right\} \left[(2J+1) / 2\sigma_{\text{эксн}}^2 \right] \exp\left[-J(J+1) / 2\sigma_{\text{эксн}}^2 \right],$$

где $E_0 = -n\Delta_0$; $n = 1, 2, 3$ для четно-четных, нечетно-четных (четно-нечетных) и нечетно-нечетных ядер соответственно; $\bar{T}_n = 0,385$ МэВ; $\sigma_{\text{эксн}}^2 = 0,156A - 26,76$. Точка сшивки U_c модели постоянной температуры и модели сверхтекучего ядра равна $U_c = 10,72 - n\Delta_0 - 0,028A$. Параметр спиновой зависимости σ^2 равен $\sigma_{\text{эксн}}^2$ до энергий возбуждения 1,2; 0,6; 0,3 МэВ для четно-четных, нечетно-четных (четно-нечетных), нечетно-нечетных ядер. Выше, до энергии U_c , значение σ^2 определяется линейной интерполяцией между величинами $\sigma_{\text{эксн}}^2$ и $\sigma_1^2(U_c) = F_1 t$. При этом зависимость асимптотического параметра плотности уровней $\tilde{\alpha}$ от массового числа A имеет вид $\tilde{\alpha} = 0,484A - 0,0016 A^2$. Эти модели плотности уровней позволяют воспроизвести энергетическую зависимость экспериментальных сечений реакций $(n, n'f)$ и (n, xn) . Плотность низколежащих переходных состояний деления также может быть описана с помощью модели постоянной температуры. Такая аппроксимация плотности уровней позволяет описать сечения σ_f и σ_{n2n} вблизи порогов.

Плотность уровней в области низколежащих состояний для трансактинидов ($A = 225-254$), экспериментальные данные по которым отсутствуют, достаточно надежно описывается с помощью средних параметров \bar{T} и E_0 . Плотность уровней редкоземельных ядер ($A = 150-193$) хорошо описывается моделью постоянной температуры с параметром $\bar{T} = 0,1509 \cdot 10^{-2} A + 0,7473$ и теми же значениями E_0 , что и для трансактинидов. Полученная систематика параметров модели постоянной температуры позволяет описать наблюдаемую плотность нейтронных резонансов $\langle D \rangle_{\text{набл}}$ для трансактинидов и редкоземельных ядер с погрешностью не хуже $\pm 50\%$. Существующее различие между теоретическими и экспериментальными значениями плотности нейтронных резонансов может быть обусловлено разбросом экспериментальных данных о $\langle D \rangle_{\text{набл}}$, а также тем, что, возможно, недостаточно учитываются некоторые физические эффекты. Так, существующая погрешность в получении оболочечных поправок сказывается на энергетической зависимости основного параметра плотности уровней. Более надежного определения требует и энергетическая зависимость вклада коллективных эффектов.

Результаты систематики позволяют в некоторых случаях оценить надежность экспериментальных данных о $\langle D \rangle_{\text{набл}}$. Так, экспериментальные значения $\langle D \rangle_{\text{эксн}}$ для ^{245}Pu и ^{253}Cf скорее всего занижены примерно в два раза.

Оценка сечений деления и реакций (n, xn) для актинидов

Почти полное отсутствие экспериментальных данных о сечениях реакций (n, xn) и (n, n') для трансактинидов приводит к необходимости использования теоретических моделей для оценки нейтронных сечений. Согласованный расчет сечений этих реакций возможен только при условии достаточно корректного расчета сечений деления. Однако оказалось, что, если даже экспериментальные значения сечений деления воспроизводятся достаточно хорошо, теоретические значения сечений реакций (n, xn) могут существенно различаться.

Такое расхождение связано с различием в оценках вклада от первого и второго "шансов" в деление. Эта проблема может быть решена, если проводится согласованный анализ имеющихся экспериментальных данных. Такой анализ был сделан для ^{238}Pu и ^{239}Pu [15], для которых получены экспериментальные данные по реакциям (n, f) , $(n, 2n)$ и $(n, 3n)$, а для ^{238}Pu – по спектрам вторичных нейтронов. Согласованная оценка сечений реакций (n, f) , $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ для $^{238-244}\text{Pu}$ сделана в работе [16].

Последовательный учет коллективных, сверхтекучих и оболочечных эффектов в плотности уровней нейтронного и делительного каналов позволил воспроизвести энергетическую зависимость экспериментальных сечений деления в области энергий нейтронов до порога реакции $(n, n'f)$ (рис.7). Показана необходимость учета деформаций, нарушающих аксиальную и зеркальную асимметрии делящегося ядра в седловых конфигурациях, а также необходимость использования корреляционной функции в переходном состоянии $\Delta_f (\Delta_f = \Delta_0 + 0,08 \text{ МэВ})$.

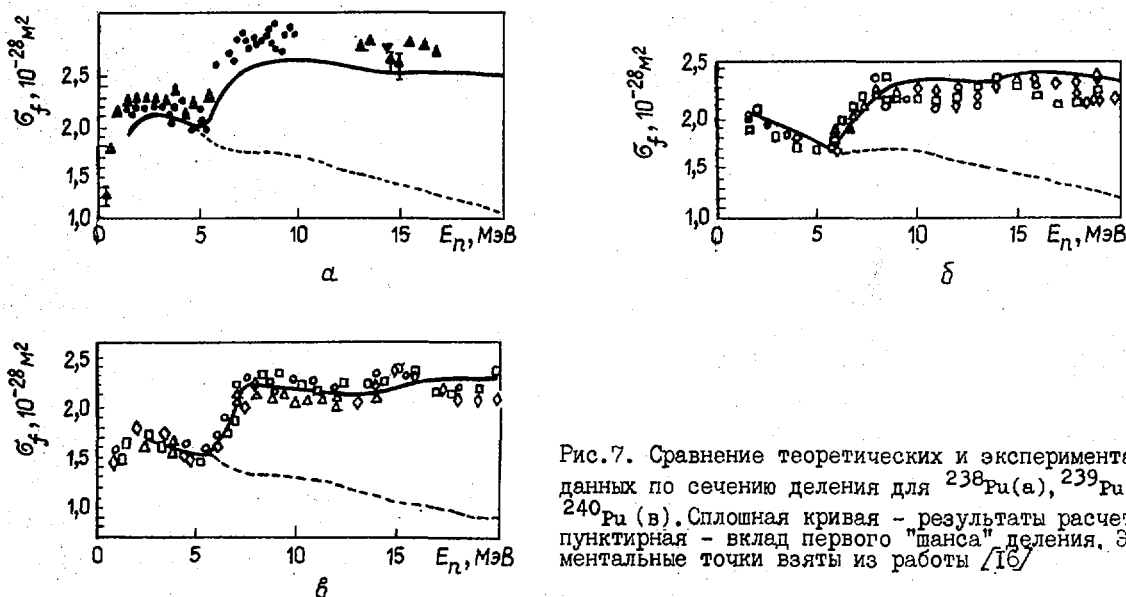


Рис.7. Сравнение теоретических и экспериментальных данных по сечению деления для ^{238}Pu (а), ^{239}Pu (б), ^{240}Pu (в). Сплошная кривая – результаты расчета [16]; пунктирная – вклад первого "шанса" деления. Экспериментальные точки взяты из работы [16].

Для описания сечений реакций $(n, n'f)$ и (n, xn) вблизи порогов необходимо использовать низколежащие состояния, чтобы учесть конкуренцию деления и реакций с испусканием нейтронов и γ -квантов. Модель постоянной температуры с соответствующими параметрами позволяет достаточно хорошо описать нарастающую сумму уровней $N(E)$ трансактинидов и может быть использована для описания характеристик низколежащих состояний при равновесной деформации [4]. Плотность переходных состояний делящегося ядра можно также аппроксимировать моделью постоянной температуры. Такое приближенное описание плотности уровней переходных состояний в области второго и третьего плато возможно потому, что параметры деления существенно усредняются из-за испускания предделительных нейтронов. При расчете сечений реакций (n, xn) выше порога $(n, n'f)$ необходимо принять во внимание возможность предравновесного испускания первого нейтрона. Для описания сечений реакций (n, xn) использовали многокаскадную статистическую модель, учитывающую законы сохранения углового момента и четности на всех этапах распада ядра [17]. На рис.8 представлены результаты расчета сечений реакций $(n, 2n)$ и $(n, 3n)$ для $^{238-240}\text{Pu}$ в рамках данной модели.

Параметризация спектров вторичных нейтронов для ^{238}Pu в рамках модели предравновесного распада сделала возможным воспроизведение сечений деления изотопов плутония в области 1–20 МэВ и, как следствие, оценку сечений реакций (n, xn) . Для преодоления трудностей, связанных с однозначным разделением влияния на делимость ядра изменений плотности уровней и вклада предравновесного распада, важно получить экспериментальные данные о жесткой части спектров неупругого рассеяния нейтронов с энергией выше 10 МэВ.

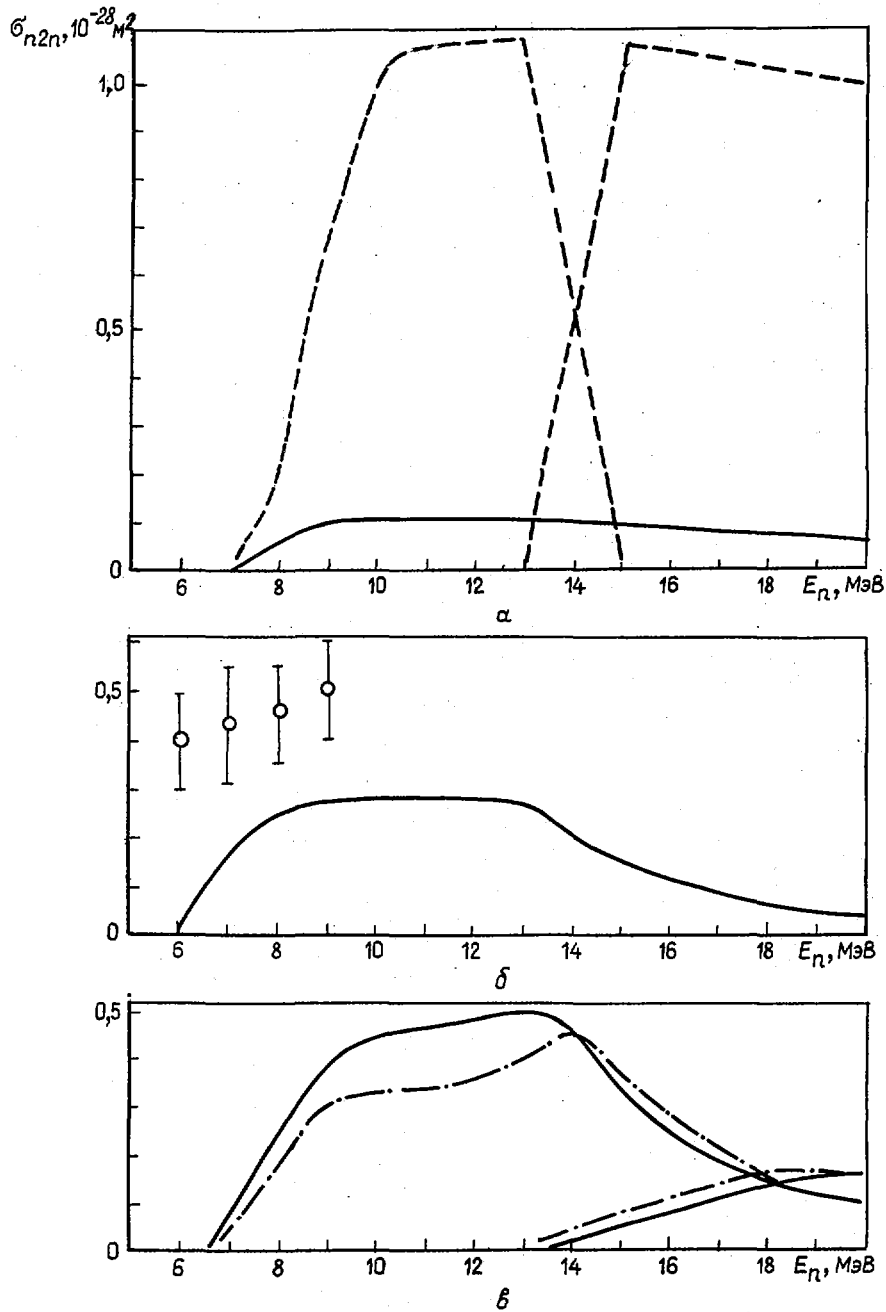


Рис.8. Сравнение данных о сечениях реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$ для ^{238}Pu (а), ^{239}Pu (б), ^{240}Pu (в). Сплошная кривая - результаты расчета [16], пунктирная - оценка ENDF/B-V, штрихпунктирная - оценка работы [19]; ϕ - экспериментальные данные работы [16]

Оценка средних параметров
с учетом поправок на пропуск уровней

Для расчета по статистической модели средних сечений деления и радиационного захвата и расчета факторов самоэкранировки необходимо знать средние ширины и v , частности, среднее расстояние между уровнями $\langle D \rangle$. Эта величина может быть получена по данным в области энергий разре-

шенных резонансов с поправкой на пропуск уровней. Из-за преобладания малых нейтронных ширин в распределении Портера - Томаса поправка на пропуск слабых уровней может оказаться значительной.

Методы, основанные на оценке числа пропущенных уровней исходя из распределения Портера - Томаса, используют одни и те же допущения и различаются лишь степенью обобщения. Удалось реализовать в математических программах наиболее совершенные из существующих методов введения поправок на пропуск уровней - методы Кочевой и др. [18] и Фрёнера [19].

В основе этих методов лежит использование распределения Портера - Томаса для нейтронных ширин. Авторы этих методов тем или иным способом определяют "искаженное" распределение Портера - Томаса из-за пропуска уровней и в гораздо меньшей степени пытаются использовать "искаженное" распределение Вигнера. Одновременное использование этих двух распределений было сделано в методе, развитом в нашей лаборатории [20]. Вероятно, учет обоих распределений (Портера - Томаса и Вигнера) позволит точнее учесть экспериментальные условия и более корректно ввести поправку на пропуск уровней. Первые расчеты, проведенные этим методом, показали, что средние расстояния между уровнями $\langle D \rangle$ примерно на 10% ниже, чем полученные методом Фрёнера (см. таблицу).

Сравнение средних значений параметров, полученных различными методами (в качестве исходных были использованы резонансные параметры, полученные в оценке ИЯЭ АН БССР)

Ядро	Параметр	Метод работ		
		[18]	[19]	[20]
^{235}U	$\langle g\Gamma_n^0 \rangle, 10^{-5}$ эВ	$3,39 \pm 0,38$	$4,07 \pm 0,40$	$3,68 \pm 0,37$
	$\langle D \rangle, \text{эВ}$	$0,448 \pm 0,011$	$0,434 \pm 0,016$	$0,400 \pm 0,016$
	$\langle S_0 \rangle, 10^{-4}$	$0,88 \pm 0,09$	$0,94 \pm 0,09$	$0,92 \pm 0,09$
^{236}U	$\langle \Gamma_n^0 \rangle, 10^{-3}$ эВ	-	$1,76 \pm 0,20$	$1,64 \pm 0,25$
	$\langle D \rangle, \text{эВ}$	-	$15,1 \pm 0,5$	$14,1 \pm 0,5$
	$\langle S_0 \rangle, 10^{-4}$	-	$1,16 \pm 0,20$	$1,16 \pm 0,18$
^{240}Pu	$\langle g\Gamma_n^0 \rangle, 10^{-3}$ эВ	$1,38 \pm 0,05$	$1,33 \pm 0,06$	$1,30 \pm 0,06$
	$\langle D \rangle, \text{эВ}$	$13,5 \pm 0,5$	$13,1 \pm 0,3$	$11,99 \pm 0,40$
	$\langle S_0 \rangle, 10^{-4}$	$1,02 \pm 0,06$	$1,01 \pm 0,05$	$1,08 \pm 0,06$
^{239}Pu	$\langle g\Gamma_n^0 \rangle, 10^{-4}$ эВ	$2,51 \pm 0,15$	$2,51 \pm 0,10$	-
	$\langle D \rangle, \text{эВ}$	$2,17 \pm 0,04$	$2,17 \pm 0,04$	-
	$\langle S_0 \rangle, 10^{-4}$	$1,16 \pm 0,05$	$1,16 \pm 0,05$	-

Применение указанных методов к анализу оцененных данных для ^{238}U показало, что, если взять в качестве исходных резонансные параметры, полученные в оценках [21,22], то в первом случае имеем $\langle D_0 \rangle / \langle D_1 \rangle \approx 3$, а во втором $\langle D_0 \rangle / \langle D_1 \rangle \approx 4$. Это связано со значительными расхождениями в обеих оценках числа р-резонансов и их ширин.

Создание полных файлов оцененных ядерных данных

С помощью развитых методов оценки нейтронных данных были созданы полные файлы оцененных ядерных констант для $^{235}, ^{236}\text{U}$ и $^{239}-^{242}\text{Pu}$ в области энергий 10^{-5} эВ-20 МэВ. Была проведена переоценка ранее созданных систем оцененных ядерных констант для изотопов плутония в связи с появлением новых экспериментальных данных и созданием более корректных теоретических моделей расчета нейтронных сечений.

Сравнение результатов проведенной работы по оценке ядерных данных с оценкой ENDF/B-V показывает, например, что для ^{235}U функции возбуждения уровней при неупругом рассеянии нейтронов в обеих оценках сильно различаются (рис.9). Это связано с учетом в данных ENDF/B-V вклада прямых процессов. Кроме того, существуют различия и в величинах рассчитанных компаундных вкла-

дов в функции возбуждения уровней, обусловленные недостаточно корректными в ENDF/B-V методом расчета сечений $\sigma_{nn'}$, схемой уровней и способом учета конкуренции деления. Естественно, что различия в сечениях возбуждения уровней отразились и на полном сечении неупругого рассеяния. Результаты оценки автора и ENDF/B-V различаются в 1,5-2 раза для сечения $\sigma_{nn'}$. Большое различие в области 0,1-5,0 МэВ связано с учетом вклада прямых процессов в низколежачие состояния ^{235}U , которым пренебрегали в данных ENDF/B-V. В области же энергий выше 7 МэВ большее значение сечения $\sigma_{nn'}$, полученное в оценке автора, обусловлено включением предравновесных процессов в эту оценку. Оба этих эффекта приводят к ужестчению спектра испущенных нейтронов.

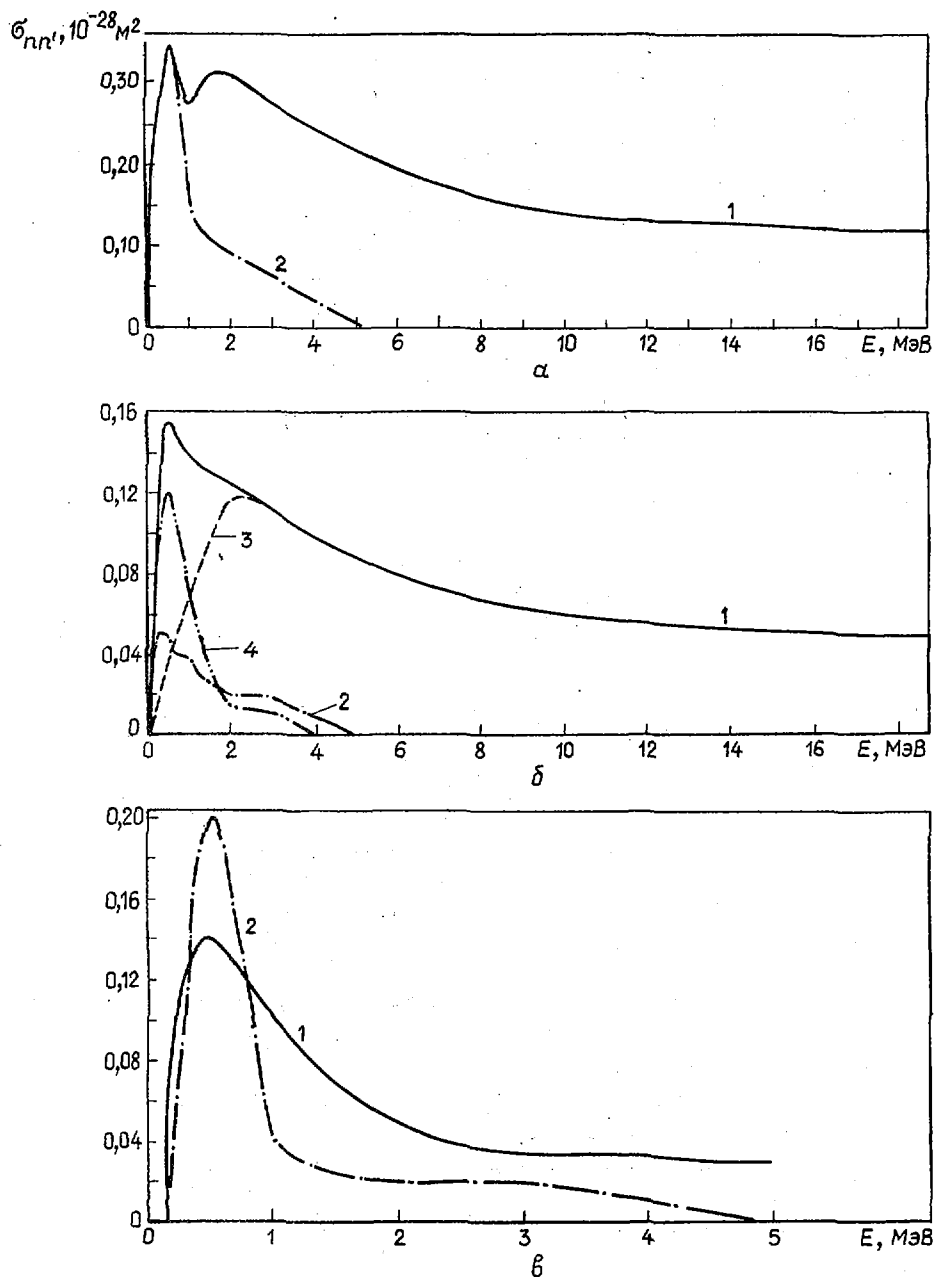


Рис.9. Сравнение результатов настоящей оценки и данных ENDF/B-V [23] для ^{235}U по функциям возбуждения трех уровней: 46,21 кэВ (а), 103,03 кэВ (б) и 171,36 кэВ (в) при неупругом рассеянии нейтронов. Кривые: 1 - оценка [17]; 2 - оценка ENDF/B-V; 3 - процесс прямого возбуждения; 4 - компаунд-процесс (3 и 4 - расчет работы [17])

Угловые распределения неупругорассеянных нейтронов на низколежащих уровнях приняты в библиотеке ENDF/B-V изотропными, тогда как в настоящей оценке они рассчитаны методом связанных каналов и оказались анизотропными. Энергетические спектры вторичных нейтронов в данных ENDF/B-V имеют форму Максвелла, тогда как в настоящих оценках они более жесткие в соответствии с моделью предравновесного распада.

Сравнение современных представлений с оцененными данными ENDF/B-V для ^{235}U показывает неадекватность этих данных.

Список литературы

1. Коньшин В.А., Анципов Г.В., Суховицкий Е.Ш. и др. Оцененные нейтронные константы урана-235. Минск: Наука и техника, 1985.
2. Poenitz W.P., Whalen J.F., Smith A.B. e.a. Total neutron cross-sections of heavy nuclei. - In: Proc. of the Intern. conf. on nuclear data for technol. (Knoxville, 1979). USA, 1979, p.698-704.
3. Schwartz R.B., Schrack R.A., Heaton H.T. Total neutron cross-sections of ^{235}U , ^{238}U and ^{239}Pu from 0,5 to 15 MeV. - Nucl.Sci. and Engng, 1974, v.54, p.322-326.
4. Foster D.J., Jr., Glasgow D.W. Neutron total cross-sections at 2,5-15,0 MeV. 1. Experimental. - Phys.Rev., 1971, v.С3, p.576-603.
5. Cabe I., Cance M., Adam A. e.a. Measure des sections efficaces totales neutroniques du carbone, du nickel, de l'uranium-235, de l'uranium-238 et de plutonium-239 entre 0,1 MeV et 6 MeV. - In: Proc.of the Intern.conf. on nuclear data for reactors (Helsinki, 1970). Vienna: IAEA, 1970, v.2, p.31-37.
6. Knitter H.H., Islam M.M., Coppola M. Investigation of fast neutron interaction with ^{235}U . - Z.Phys., 1972, v.257, p.108-123.
7. Smith A.B. Elastic scattering of fast neutrons from ^{235}U . - Nucl.Sci. and Engng, 1964, v.18, p.126-129.
8. Kinney W.E., Perey F.G. ^{238}U neutron elastic scattering cross-sections from 6,44 to 8,56 MeV: ORNL-4804, 1973.
9. Armitage B.H., Ferguson A.T.G., Montague J.H. e.a. Inelastic scattering of fast neutrons by ^{235}U . - In:Proc. of the Intern. conf. on nuclear data for reactors (Paris, 1966). Vienna: IAEA, 1967, p.383-392.
10. Batchelor R., Wyld K. Neutron scattering by ^{235}U and ^{239}Pu for incident neutrons of 2, 3 and 4 MeV: Rep. AWRE-055/69. Aldermaston, 1969, 16 p.
11. Egan J.J., Arthur E.D., Kegel G. e.a. A comparison of measured and calculated neutron inelastic scattering cross-sections for vibrational states from 680 to 1060 keV in ^{238}U . - Proc. of the Intern. conf. on nuclear data for basic and applied science. USA, Santa Fe, 1985.
12. Игнатюк А.В., Истеков К.К., Смиренин Г.Н. Роль коллективных эффектов при систематике плотности уровней ядер. - Ядерная физика, 1979, т.29, с.875-883.
13. Казаков Л.Е., Кононов В.Н., Полетаев Е.Д. и др. Измерение сечений радиационного захвата нейтронов для ^{236}U и ^{197}Au в области энергий 3-420 кэВ. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1985, вып.2, с.44-49.
14. Давлетшин А.Н., Типунков А.О., Тихонов С.В. и др. Сечение радиационного захвата нейтронов ядрами ^{197}Au , ^{236}U , ^{237}Np . - Атомная энергия, 1985, т.58, вып.3, с.183-188.
15. Грудзевич О.Т., Игнатюк А.В., Маслов В.М. и др. Согласованное описание сечений реакций (n , $n'f$) и (n, xn) для трансурановых ядер. - В кн.: Нейтронная физика: Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 2-6 октября 1983 г. Т.2. М.: ЦНИИатоминформ, 1984, с.318-323.
16. Konshin V.A., Klepatsky A.B., Maslov V.M. e.a. Possibilities of updating Pu fast neutron cross-sections with a theoretical analysis. - In: [11].
17. Uhl M., Strohmaier B. STAPRE-Computer code: Rep. IRK-76/01. Vienna, 1976.

18. Coceva C., Stefanon M. Experimental aspects of the statistical theory of nuclear spectra fluctuations. - Nucl. Phys., 1979, v.315, p.1-20.
19. Fröhner F.H. Level density estimation with account of unrecognized multiplets applied to uranium and plutonium resonance data. - Proc. of the IAEA consultants meeting on uranium and plutonium isotope resonance parameters (Vienna, 1981). Vienna: IAEA, 1981, p.103-111.
20. Породинский Ю.В., Суховицкий Е.Ш. Метод определения средних нейтронных ширин и средних расстояний между уровнями с учетом конечного разрешения экспериментальной аппаратуры. Изв. АН БССР. Сер. физико-энергетическая, 1986, № I, с.15-19.
21. De Saussure G., Olsen D.K., Perez R.B. e.a. Evaluation of the ^{238}U neutron cross-sections for incident neutron energies up to 4 keV. - Progress in Nuclear Energy, 1979, v.3, p.87-124.
22. Николаев М.Н., Абагян Л.П., Корчагина Ж.А. и др. Нейтронные данные для ^{238}U . Ч. I. Обнинск: ФЭИ, 1978, 241 с.
23. Bhat M.R. Evaluated nuclear data file/B. Version V, MAT-1395, 1977.

Статья поступила в редакцию 10 марта 1986 г.

УДК 539.173.4

АБСОЛЮТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СЕЧЕНИЙ ДЕЛЕНИЯ ВАЖНЕЙШИХ НУКЛИДОВ

В.И. Ш п а к о в

THE ABSOLUTE MEASUREMENTS OF THE FISSION CROSS-SECTIONS FOR IMPORTANT NUCLIDES. The precise experimental results of the fission cross-sections for ^{233}U , ^{235}U , ^{237}Np , ^{239}Pu are presented with errors 2,1-3,6%. The energy interval is 1,9-18,8 MeV. The measurements are made in ZFK (Rossendorf, GDR) and RI (Leningrad, USSR) by method of time correlation associated particles. The error analysis is made.

С 1975 г. - Радиевый институт им. В.Г. Хлопина в Ленинграде и Технический университет г. Дрездена ведут совместные работы по абсолютным измерениям сечений деления важнейших реакторных нуклидов. В статье рассмотрены результаты измерений, проведенных в 1984-1985 гг. Цель сотрудничества - измерение методом коррелированных по времени сопутствующих частиц (КСЧ) прецизионных значений сечений деления при фиксированных энергиях нейтронов, которые необходимы для уточнения и нормировки данных относительных измерений. Постановка таких работ поддержана решениями Международного совещания консультантов МАГАТЭ [1], в которых рекомендовано проведение измерений методом КСЧ при возможно большем числе энергий нейтронов.

В Дрездене измерения проведены на тандем-ускорителе Центрального института ядерных исследований (г. Россендорф). Были измерены сечения деления ^{235}U нейтронами с энергиями 4,45 и 18,8 МэВ и ^{239}Pu с энергиями 4,8; 8,65 и 18,8 МэВ. В Радиевом институте на ускорителе Ван-де-Граафа измерены сечения деления ^{233}U , ^{235}U , ^{237}Np и ^{239}Pu нейтронами более низких энергий.

Используемый метод КСЧ хорошо известен и детально описан ранее [2]. Поэтому целесообразно отметить лишь принципиальные особенности метода. Источником нейтронов служила реакция $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ или $\text{T}(d, n)^4\text{He}$. Сопутствующие нейтронам гелионы регистрировались детектором сопутствующих частиц. Его входная диафрагма определяет конус регистрируемых гелионов и тем самым задает конус коррелированных с ними нейтронов, которые бомбардируют мишень исследуемого делящегося нуклида. Деления регистрируются в совпадении с сопутствующими частицами. Если нейтронный конус полностью находится в пределах мишени делящегося вещества, сечение деления определяется простым выражением $i=N_f/(N_0n)$, где N_f - число зарегистрированных совпадений; N_0 - число зарегистрированных сопутствующих гелионов; n - число ядер делящегося вещества на 1 см^2 мишени.

Принципиально этот метод прост и имеет определенные преимущества: отпадает необходимость измерения потока нейтронов или хотя бы полного интеграла сопутствующих частиц, не нужен расчет телесных углов на мишень и детектор, исключается фон от рассеянных нейтронов от побочных реакций и т.д. Однако практическая реализация его связана с существенными трудностями, вызванными необходимостью регистрации сопутствующих частиц на большом фоне рассеянных дейтронов и заряженных частиц, возникающих в сопутствующих реакциях на материалах мишени – источника нейтронов, подложке и конструкционных материалах. Это требует создания специфических каналов сопутствующих частиц для каждого значения энергии нейтронов.

В измерениях, проводившихся в Техническом университете на нейтронах с энергией 4,45; 4,8; 8,65 МэВ, для получения нейтронов использовалась реакция $D(d, n)^3He$. При этом мишенью служила тонкая (около 1 мг/см²) пленка из дейтерированного полиэтилена.

В измерениях на нейтронах с энергией 18,8 МэВ для получения нейтронов служила реакция $T(d, n)^4He$ с использованием тонких (около 1 мг/см²) пролетных самоподдерживающихся титан-третиевых мишеней. Для регистрации сопутствующих частиц использовались модификации (E-E_T)-телескопа. Обычные методы анализа спектров E-E_T были непригодны из-за их длительности. Поэтому для выделения гелионов использовался метод, описанный в работе [3]. Он заключался в формировании комбинации сигналов $E_g = (E + E_T)$ и $A_p = (aE + bE_T)$ и в отборе их в амплитудных окнах E_g и A_p . Соответствующий подбор величин a , b , E_g и A_p определял оптимальную область регистрации в двумерном спектре E-E_T для каждой энергии нейтронов. Такая система обеспечивала разрешающее время дискриминатора не более 100 нс и эффективную регистрацию сопутствующих частиц при фоне в канале, не превышающем 2-5%. Величина фона определялась заменой дейтерированного полиэтилена обычным или (в случае использования мишени) титановой пленкой, не насыщенной тритием. Подробно методика эксперимента описана в работах [4, 5].

В измерениях, проводившихся в Радиовом институте, источником нейтронов служила пленка дейтерированного полиэтилена (толщиной 1-2 мг/см²). Использовались нейтроны, вылетающие в заднюю полусферу; при этом регистрировались гелионы, вылетающие под малыми углами по направлению к пучку дейтронов. Это приводило к очень большому фону рассеянных дейтронов. Для исключения этого фона, а также фона других заряженных частиц, в частности протонов от взаимодействия пучка дейтронов с остаточным водородом мишени, была использована магнитная сепарация продуктов реакции. При этом для регистрации гелионов использовался поверхностно-барьерный кремниевый детектор большой площади с малой глубиной зоны. Сочетание магнитной сепарации с таким детектором обеспечило снижение фона в канале сопутствующих частиц до величины, не превышающей 0,1%. Величина фона определялась заменой дейтерированного полиэтилена обычным. Остальные детали эксперимента во всех измерениях были одинаковыми.

Поправки, составляющие погрешностей (%) и результаты измерений

Изотоп	Энергия нейтронов, МэВ	Счет совпадений		Счет делений		Поглощение осколков
		Статистика	Случайные совпадения	Коррелированный фон	Экстраполяция к нулю	
²³⁵ U	1,88	-/1,95*	1,82/0,26	-/-	3,96/0,50	1,98/0,85
²³⁵ U	4,45	-/1,26	1,40/0,17	-/-	1,18/0,26	2,00/0,85
²³⁵ U	18,8	-/1,01	2,82/0,21	1,72/0,04	1,67/0,16	1,73/0,78
²³⁷ Np	1,90	-/1,91	4,68/0,43	-/-	4,45/0,60	0,95/0,30
²³⁹ Pu	1,92	-/2,10	9,06/0,60	-/-	2,03/0,76	0,63/0,30
²³⁹ Pu	4,8	-/1,27	0,64/0,11	-/-	1,50/0,31	1,21/0,46
²³⁹ Pu	8,65	-/1,08	1,86/0,17	-/-	1,04/0,24	1,20/0,43
²³⁹ Pu	18,8	-/2,52	4,55/0,63	0,34/0,13	2,57/0,85	1,30/0,39
²³³ U	1,94	-/2,94	13,3/1,1	-/-	1,8/0,5	0,99/0,3 (3,6/0,25)**

* Числитель – поправка, знаменатель – погрешность.

** Вклад других изотопов.

Положение и профиль нейтронного конуса непрерывно контролировались во время эксперимента посредством сцинтилляционного счетчика с кристаллом стиблена и $(n-\gamma)$ -дискриминацией в совпадении с детектором сопутствующих частиц.

Потери нейтронов в конусе вследствие рассеяния на подложках мишеней, окнах и конструктивных материалах рассчитывались методом, представляющим собой решение обратной задачи переноса излучения [6]. Уравнения переноса решались методом Монте-Карло.

Деления регистрировались посредством многослойных мелких ионизационных камер, содержащих в разных экспериментах от 3 до 6 слоев делящегося вещества, в импульсном токовом режиме. Малая глубина камеры (около 3 мм) позволяла эффективно отделять осколочные импульсы от импульсов α -частиц и обеспечивала достаточно протяженную область плато. Эффективность регистрации делений в такой камере определялась потерями в счете из-за дискриминации в счетном канале и поглощением осколков в слое делящегося вещества. Потери в счете из-за дискриминации определялись экстраполяцией амплитудного спектра осколков к нулевой амплитуде. Поглощение осколков в слое рассчитывалось исходя из толщины слоя с учетом анизотропии и переносной скорости, обусловленной импульсом нейтрона [7]. При этом средний пробег осколков в веществе предполагался равным $7,5 \text{ мг/см}^2$.

Поправки на случайные совпадения определялись путем анализа временных спектров совпадений, а также путем одновременной регистрации полного числа совпадений и числа случайных совпадений одной и той же схемой.

Мишени делящихся веществ изготавливались в Радиовом институте высокочастотным распылением и термораспылением вещества на эксцентрически вращающиеся подложки. Для изготовления мишеней, за исключением мишеней ^{233}U , использовались изотопно чистые вещества, полученные масс-сепараторным методом. Изотопный состав мишеней ^{233}U следующий, %: $^{232}\text{U} - 0,003$; $^{233}\text{U} - 82,899 \pm 0,144$; $^{234}\text{U} - 0,332 \pm 0,014$; $^{235}\text{U} - 0,141 \pm 0,010$; $^{238}\text{U} - 6,628 \pm 0,038$.

Число ядер в мишени определялось измерением α -активности в установке с малой геометрией. При расчете числа ядер использовались рекомендованные значения периодов полураспада [8]. Однородность активного слоя мишеней контролировалась сканированием поверхности α -детектором с малым телесным углом или α -счетом с закрытием поверхности мишени диафрагмами разного диаметра. Отклонения от однородности во всех использованных мишенях не превышали 1%.

Значения поправок и соответствующие составляющие погрешностей результатов измерений, а также сами результаты приведены в таблице.

Полученные результаты для ^{235}U , ^{239}Pu , ^{237}Np и ^{233}U в сравнении с оценками различных библиотек представлены соответственно на рис. I-4.

Окончание таблицы

Счет сопутствующих частиц (фон)	Нейтронный конус		Делящийся слой		Полная погрешность	σ_f, σ
	Рассеяние нейтронов	Эффективная толщина слоя мишени из-за апертуры конуса	Поверхностная плотность	Неоднородность слоя		
0,05/0,02	0,35/0,40	0,12/0,08	-/0,93	-/0,72	2,52	(1,26 \pm 0,03)
2,32/0,67	0,25/0,40	0,05/0,05	-/0,93	-/0,72	2,10	1,057 \pm 0,022
5,62/1,35	0,44/0,40	0,12/0,08	-/0,93	-/0,72	2,25	1,999 \pm 0,045
0,10/0,05	0,43/0,40	0,12/0,08	-/2,00	-/0,76	3,01	1,73 \pm 0,05
0,10/0,05	0,38/0,40	0,12/0,08	1,00/1,00	-/0,88	2,72	2,01 \pm 0,05
2,30/0,36	0,25/0,40	0,08/0,05	-/1,00	-/0,88	2,00	1,740 \pm 0,035
1,62/0,32	0,36/0,40	0,07/0,05	-/1,00	-/0,88	1,85	2,350 \pm 0,044
5,92/1,74	0,34/0,40	0,12/0,08	-/1,00	-/0,88	3,55	2,487 \pm 0,088
0,1/0,05	0,49/0,40	0,12/0,08	-/2,00	-/0,35	3,8	1,93 \pm 0,07

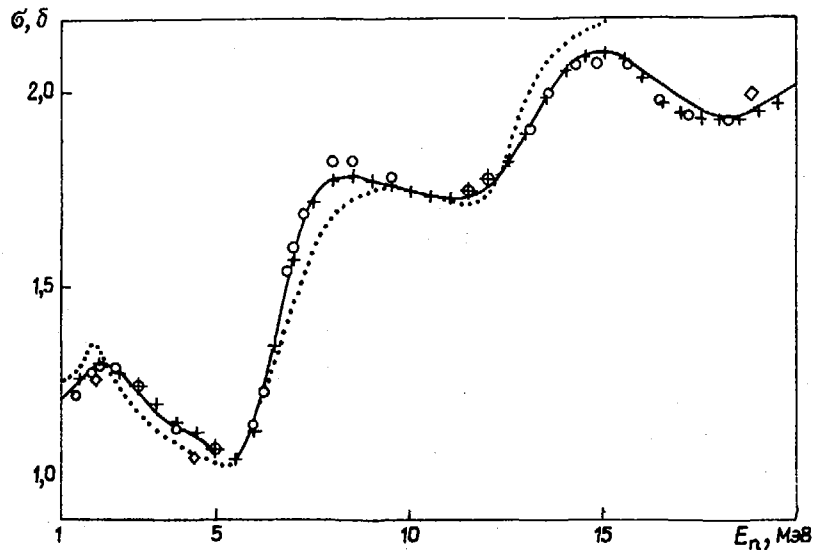


Рис.1. Результаты измерений сечения деления ^{235}U в сравнении с оценками: — — ENDF/B-V; — UKNDL; ○ — ENDF-82; + — JENDL-II; ◇ — настоящей работы

22

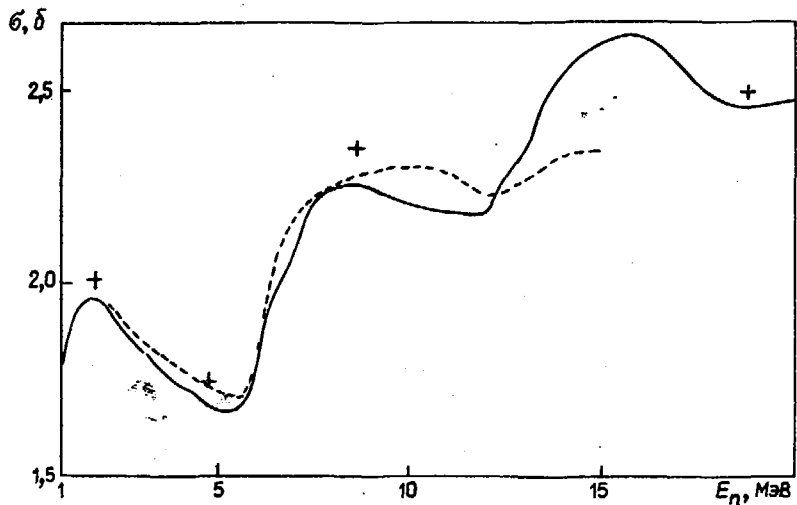


Рис.2. Результаты измерений сечения деления ^{239}Pu в сравнении с оценками: — — ENDF/B-V; - - - - [9]; + — настоящей работы

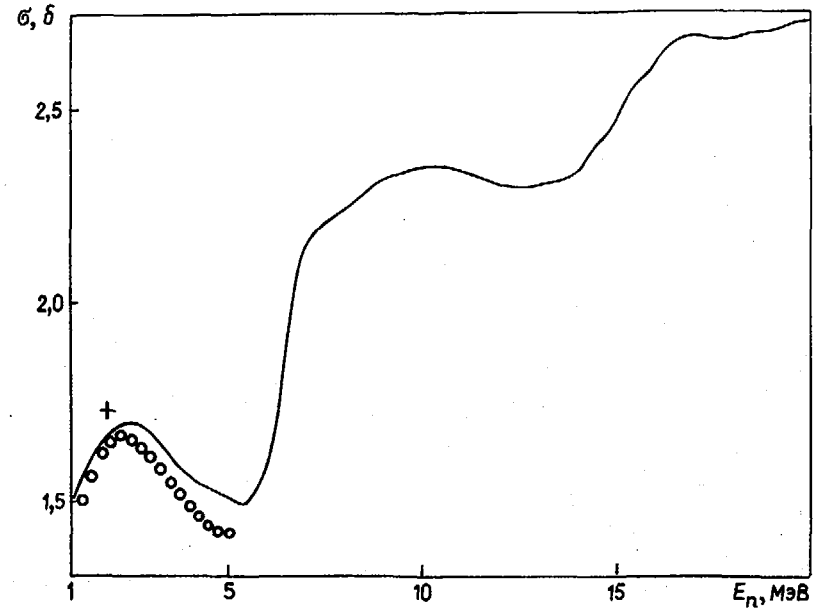


Рис.3. Результаты измерения сечения деления ^{237}Np в сравнении с оценками: — — ENDF/B-V; ○ — [10]; + — настоящей работы

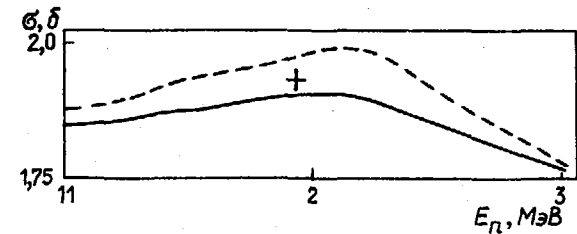


Рис.4. Результаты измерения сечения деления ^{233}U в сравнении с оценками: — — ENDF/B-IV; - - - - UKNDL - DFNS/B; + — настоящей работы

В дальнейшем предполагается проведение абсолютных измерений методом КСЧ на ^{238}U , сечение деления которого принято МАГАТЭ нейтронным стандартом, однако данные абсолютных измерений для него практически отсутствуют. В проведении измерений принимали участие сотрудники Радиового института И.Д. Алхазов, Е.А.Ганза, Л.В.Драпчинский, В.А.Калинин, С.С.Коваленко, И.О.Косточкин, В.Н.Кузьмин, Л.М.Солин, А.В.Фомичев и Технического университета М.Иош, К.Мерла, Г.Музиоль, Х.Ортлепп, Г.Пауш, К.Хербах.

Список литературы

1. Proc. of the IAEA consultant's meeting on the U-235 fast-neutron fission cross-sections: INDC(NDS)-146, Smolenice, 1983, p.13.
2. Arlt R. e.a. In: Proc. of the Intern. conf. on nucl. cross-sections for technology. NBS Spec. Publ. 594, Knoxville, 1979, p.990.
3. Arlt R.e.a. In: Proc. of the advisory group meeting on nuclear standard reference data: IAEA-TECDOC-335. Geel, 1984, p.774.
4. Herbach C.M. e.a. Preprint 05-06-87 of TU-Dresden, 1985.
5. Herbach C.M. e.a. Preprint 05-07-85 of TU-Dresden, 1985.
6. Dushin V.N. ZfK-382. Dresden, 1979, p.153.
7. Arlt R. e.a. Preprint 05-05-79 of TU-Dresden, 1979.
8. Nuclear data standards for nuclear measurements. IAEA Nuclear Standard File 1982: INDC/INBANDC. Vienna: IAEA, 1983.
9. Анципов Г., Баханович Л.А., Жарков В.Ф. и др. Оценка ядерных данных для ^{239}Pu . - Препринт ИТМО АН БССР, 1981, № 14.
10. Darrien H., Doat J., Fort E. Evaluation of ^{237}Np neutron cross-sections. - Rep. IAEA INDC(FR)-42/L, 1980.

Статья поступила в редакцию 19 марта 1986 г.

УДК 539.172.4

ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗ СЕЧЕНИЙ РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА НЕПТУНИЯ И ИЗОТОПОВ УРАНА

В. А. Толстиков

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF RADIATIVE CAPTURE CROSS-SECTIONS OF NEPTUNIUM AND URANIUM ISOTOPES. The paper deals with the state of knowledge of cross-sections of fast neutron radiative capture by ^{236}U , ^{238}U and ^{237}Np . The latest experimental data and evaluations of radiative capture cross-sections of these isotopes are discussed. The conclusion is drawn on the necessity of the further improvement of the techniques and experimental devices required for precise measurements. The directions of the further investigations are proposed.

Требования к погрешности оцененного сечения радиационного захвата ^{238}U очень велики. Согласно запросам, собранным Комитетом по ядерным данным США [1], требуемая погрешность в интервале 10-300 кэВ не хуже 1,5%, в интервале 0,3-1 МэВ около 2%, в интервале 1-10 МэВ до 7%. Ясно, что соответствующие требования налагаются и на исходную экспериментальную информацию.

Знание сечений радиационного захвата нейтронов ^{236}U и ^{237}Np важно как с точки зрения познания процессов взаимодействия быстрых нейтронов с актинидными ядрами и получения информации для тестировки моделей ядерных реакций, так и с точки зрения технологических процессов, связанных с

топливным циклом быстрых реакторов. Расчет технологических процессов, связанных с накоплением α -активных ^{236}Pu и ^{238}Pu , требует знания оцененных сечений захвата ^{238}U с погрешностью около 5%, а ^{237}Np с погрешностью около 7-10%.

Уран-238. Сопоставим две широко используемые оценки $\sigma_{n,p}^{238\text{U}}$: БНАБ-78 [2] (СССР) и ENDF/B-V (США). Обе оценки сделаны сравнительно давно: БНАБ-78 в 1975-1978 гг., ENDF/B-V в 1977 г. Развитие методов оценки сечений и их погрешностей, появление новых экспериментальных данных и развитие методик измерения сечений приводят к необходимости внесения коррекций в ранее проведенные оценки, к пересмотру степени надежности опубликованных данных, на основе которых проводились оценки, к проведению в широком диапазоне энергий прецизионных измерений $\sigma_{n,p}^{238\text{U}}$. Это связано с тем, что требования технологии к точности оцененного значения $\sigma_{n,p}(E)^{238\text{U}}$ еще не достигнуты. Первоначально в оценке БНАБ без изменений была использована оценка работ [3,4] (БНАБ-МИКРО). Оцененная кривая была проведена методом дробно-рациональной аппроксимации. Далее оценку пересмотрели, и в области $E_n < 0,4$ МэВ методом максимального правдоподобия с использованием статистической теории ядерных реакций одновременно оценили сечения σ_t , σ_{in} , $\sigma_{n,p}$. В области перекрытия данные плавно "сливались" с кривой для $E_n < 0,4$ МэВ. В оценке ENDF/B-V использовалась следующая процедура: отдельно оценивались четыре группы данных, полученные абсолютными методами или относительно сечений (n,p)-рассеяния, $\sigma_{n,p}^{197\text{Au}}$, $\sigma_{n,f}^{235\text{U}}$, $\sigma_{n,\alpha}^{10\text{B}}$. Сопоставлением и комбинацией данных четырех групп измерений получались окончательные данные для рекомендованной кривой $\sigma_{n,p}(E)$ для ^{238}U . Грубо говоря, в обеих оценках использовался близкий набор исходных экспериментальных данных.

Обсудим область энергий $E_n < 0,4$ МэВ, где существует наибольшее число экспериментальных данных. Состояние в этой области энергий подробно проанализировано в работах [3-6]. Поэтому только отметим, что было получено согласованное теоретическое описание экспериментальных данных по σ_t , σ_{el} , $\sigma_{n,p}$ и σ_{in} . Оцененная кривая $\sigma_{n,p}(E)^{238\text{U}}$ в области энергий 40-100 кэВ примерно на 4-5% ниже оценки БНАБ-78 [2], а ниже 40 кэВ идет на 3-4% выше ее. Отметим также, что для согласования с интегральными данными БНАБ-78 для $E_n \approx 0,1$ МэВ сечение $\sigma_{n,p}$ было понижено на 3-5% относительно данных БНАБ-МИКРО (оцененные экспериментальные данные). В области 0,1-0,4 МэВ оценки БНАБ-78 и ENDF/B-V близки.

На рис. I проводится сопоставление этих оценок при 0,4 МэВ. Для сравнения приведены экспериментальные данные более поздних работ, данные которых в оценках не учитывали или были приняты только частично. Как видно на рис. I, а, в диапазоне 0,4-1,5 МэВ оценки БНАБ-78 и ENDF/B-V хорошо согласуются. Их максимальное различие в диапазоне 0,5-0,9 МэВ не превышает 4%, при этом оценка ENDF/B-V идет выше. Данные работы [7] для $E_n < 1,1$ МэВ в основном идут выше оценок, а в районе 1,38-1,52 МэВ несколько ниже их. В области энергий 1,5-3 МэВ (см. рис. I, б) обе оценки по существу совпадают, так как в оценках использовался практически совпадающий набор данных. Данные работы [7] при энергиях 2,053 и 3,033 МэВ значительно выходят за пределы оценок. Надежного теоретического расчета в этой области энергий нет, поэтому требуется тщательная экспериментальная проработка для установления степени реальности этого факта. Создается впечатление, что экспериментальные данные в старых работах в области $E_n > 2$ МэВ (выполненные в основном методом активации) завышены в связи с недоучетом эффектов рассеяния. В интервале 7-14 МэВ (см. рис. I, в) экспериментальных данных нет и характер оцененной кривой определяется принятым при 14 МэВ значением сечения, к которому из области 4-7 МэВ ведется плавная экстраполяция.

В файле БНАБ-78 экстраполяция проведена к 2,6 мб при 14 МэВ. В свете работы [11] эта цифра кажется завышенной: в диапазоне массовых чисел 50-240 при 14 МэВ экспериментальные сечения захвата имеют величину около 1 мб. Поэтому в диапазоне 5-15 МэВ в файле БНАБ-78 данные должны быть пересмотрены в сторону уменьшения.

Из изложенного можно сделать выводы:

I. Состояние экспериментальных данных и основанных на них оценок в области энергий 1,5-7 МэВ неудовлетворительное. В практике и для тестирования методов расчета сечений актинидов, которые в ближайшем будущем трудно получить экспериментально, необходимы прецизионные измерения сечений захвата ^{238}U . В области энергий 1-7 МэВ желательны подробные измерения $\sigma_{n,p}^{238\text{U}}$ с шагом не более 100 кэВ для обнаружения возможных немонотонностей в сечении. Поэтому необходимо дальнейшее совершенствование методов измерений.

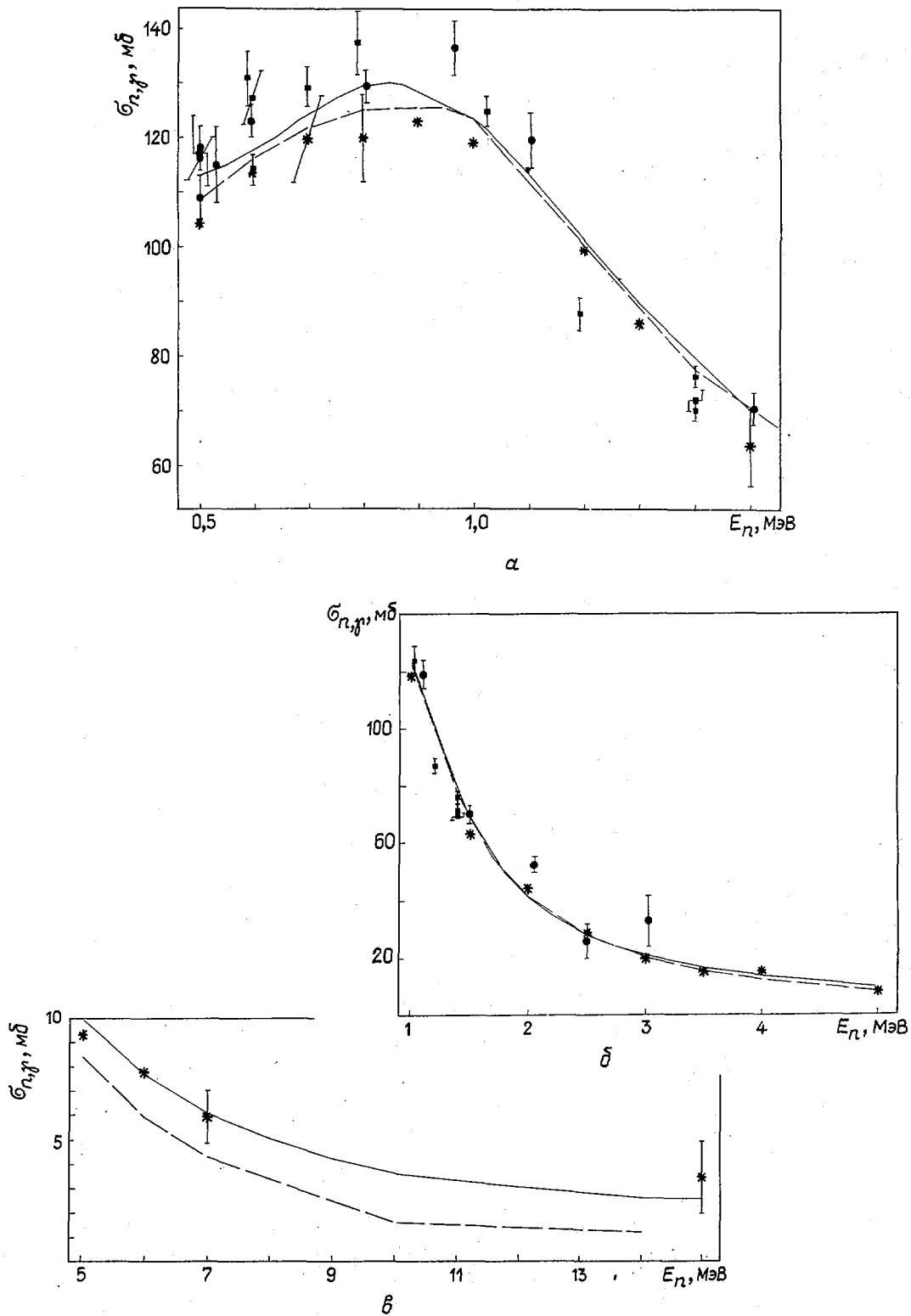


Рис. 1. Сечения радиационного захвата нейтронов ядром ^{238}U в области энергий 0,5-1,5 МэВ (а), 1-5 МэВ (б), 5-14 МэВ (в). Данные: ● - [7]; ■ - [8]; * - [9, 10]; --- БНАВ-78 [2]; - - - ENDF/B-V

2. В области энергий 0,3–1 МэВ метод активации уже в современном его развитии обладает потенциальной возможностью получить $\sigma_{n,\gamma}^{238\text{U}}$ с погрешностью менее 3%. Другие методики пока не в состоянии обеспечить такую погрешность.

3. Для $E_n < 0,3$ МэВ необходимы новые серии независимых измерений $\sigma_{n,\gamma}^{238\text{U}}$ и коэффициентов блокировки методом времени пролета в разных группах экспериментаторов для получения согласованных экспериментальных данных с малыми погрешностями. Только при наличии набора экспериментальных данных, полученных разными методами, с обоснованной заявленной погрешностью около 3%, которые в пределах погрешностей находятся в согласии, можно удовлетворить высокие запросы энергетики.

4. В файлах БНАБ-78 и ENDF/B-V не приведена достаточно обоснованная оценка погрешностей оцененных данных в разных энергетических интервалах. В новых оценках необходимо осуществить такую работу и привести таблицу погрешностей по типу содержащихся в файле стандартов МАГАТЭ, например для $\sigma_f^{235\text{U}}$.

Уран-236. Состояние с ^{236}U частично было проанализировано ранее [12], позднее в работе [13]. Своеобразие этого положения состоит в том, что до 1970 г. существовали только две плохо согласующиеся в перекрывающихся интервалах энергий нейтронов работы [14, 15] ($E_n = 0,3\text{--}4$ МэВ). В 1970 г. появилась работа [16] ($E_n = 0,1\text{--}20$ кэВ). Они послужили основой для построения оцененного сечения $\sigma_{n,\gamma}(E)^{236\text{U}}$ в оценке ENDF/B-V. Отметим, что работы [14, 15] были выполнены методом активации, а [16] – методом времени пролета.

В прошедшем пятилетии новые измерения выполнены методами времени замедления в свинце [17], активации [18–21] и времени пролета на пульсирующем ускорителе Ван-де-Граафа [22]. Одновременно с использованием аппарата статистической теории ядерных реакций определены силовые функции для ^{236}U , проведено их сравнение с силовыми функциями ^{238}U и ^{232}Th [23]. С использованием методики дробно-рациональной аппроксимации проведена оцененная кривая по данным эксперимента, положенная в основу одной из оценок $\sigma_{n,\gamma}(E)^{236\text{U}}$ [24]. Современное состояние $\sigma_{n,\gamma}^{236\text{U}}$ представлено на рис. 2 для нейтронов в диапазоне энергий нейтронов 0,001–4 МэВ. Надо будет отметить, что к этому времени стали доступны числовые данные работы [16].

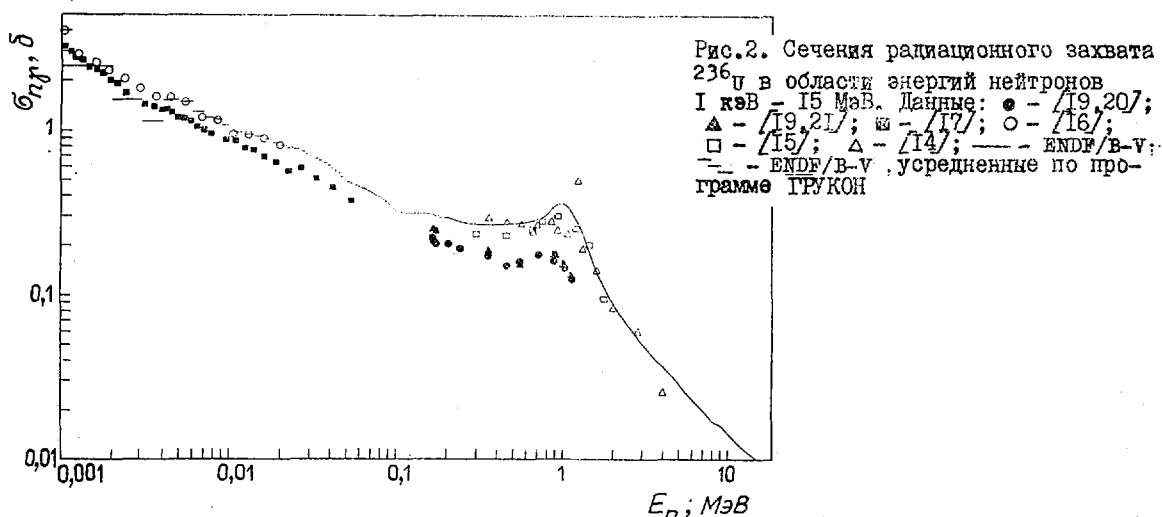


Рис. 2. Сечения радиационного захвата ^{236}U в области энергий нейтронов 1 кэВ – 15 МэВ. Данные: ● – [19, 20]; ▲ – [19, 21]; ■ – [17]; ○ – [16]; □ – [15]; △ – [14]; — — ENDF/B-V; - - - ENDF/B-V, усредненные по программе ГРУКОН

Не вдаваясь в методические особенности проведения экспериментов, отметим, что уже наши первые измерения $\sigma_{n,\gamma}^{236\text{U}}$ методом активации [18] показали, что результаты получаются на 50–60% ниже, чем в оценке ENDF/B-V, основанной на работах [14, 15]. Последующие измерения относительно разных стандартов [Au(n,γ), (n-p)-рассеяние] с использованием различных методов нормировки (абсолютный и по тепловым сечениям) полностью подтвердили этот вывод [19].

Вместе с работой [17] данные [18–21] образуют группу, которая систематически лежит ниже оценки ENDF/B-V во всей области энергий, за исключением диапазона 1–4 кэВ, где усредненные из ENDF/B-V данные лежат близко (1–3 кэВ) или на 20% ниже (3–4 кэВ), чем данные работы [17]. Для

энергий нейтронов 4-53 кэВ данные ENDF/B-V (экспериментальные данные работы [16]) в среднем на 20-25% выше данных работы [17]. Эти расхождения лежат в пределах двух среднеквадратичных погрешностей экспериментов (10% в [16] и 5% в [17]). Несколько различаются и энергетические зависимости сечений. На наш взгляд, должен быть более внимательно изучен вопрос, связанный с блокировкой сечений в области малых энергий и с их абсолютной нормировкой.

Гораздо значительнее расхождения (свыше 50%) в области энергий более 200 кэВ. Возможно, причина различий также кроется в систематических погрешностях, связанных с нормировкой и учетом влияния рассеянных нейтронов. С другой стороны, теоретические расчеты [18,23] показали, что группа данных с более низкими сечениями предпочтительнее, так как описывается параметрами расчета $\bar{\sigma}_n^{pe3}$ и \bar{D}^{pe3} , лежащими в пределах их погрешностей. Кроме того, извлеченные из сопоставления теории с экспериментом силовые функции (радиационная и γ -нейтронная) хорошо согласуются с силовыми функциями ядер с одинаковой четностью и близким числом нуклонов (нейтронов) - ^{238}U и ^{232}Th . В то же время описание группы с более высокими значениями данных требует примерно в два раза меньшего значения \bar{D} .

Для $E_n > 1,2$ МэВ, кроме старой работы [14], данных нет. Но наши предварительные данные при 0,96 и 3,3 МэВ, полученные попутно в эксперименте по измерению выходов продуктов деления, видимо, свидетельствуют о том, что сечения [14] завышены примерно в 2 раза.

В 1985 г. была опубликована работа [22], в которой методом времени пролета были измерены $\sigma_{n,\gamma}^{236\text{U}}$ в интервале 3-420 кэВ. В области перекрытия (0,17-0,4 МэВ) данные этой работы практически повторяют данные нашей работы [19] (метод активации). В интервале 6-50 кэВ данные [22] близки к данным работы [16]. В области ниже 6 кэВ они резко отклоняются от данных работ [16,17].

Можно сделать вывод, что для области энергий нейтронов более 1 МэВ нужны новые эксперименты, осуществленные разными методами, в том числе повторные измерения активационной методикой. Повторные измерения необходимы также в области энергий менее 0,15 МэВ, особенно в области менее 30 кэВ.

Нептуний-237. Доступная нам информация по реакции $^{237}\text{Np}(n,\gamma)$ приведена на рис.3. Первая работа по этой реакции - активационные данные [29] в области энергий нейтронов 0,15-1,5 МэВ - появилась только в 1967 г. В 1976 г. появились данные [28] (активационный метод, $E_n = 0,1-3$ МэВ), по которым была проведена оценка ENDF/B-V. Данные авторов [19], полученные относительно сечения реакции $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ и сечения рассеяния на водороде, хорошо согласуются с результатами работы [28]. Данные работы [27], за исключением значения при 330 кэВ, в области энергий более 600 кэВ расходятся с оценкой ENDF/B-V до 50%.

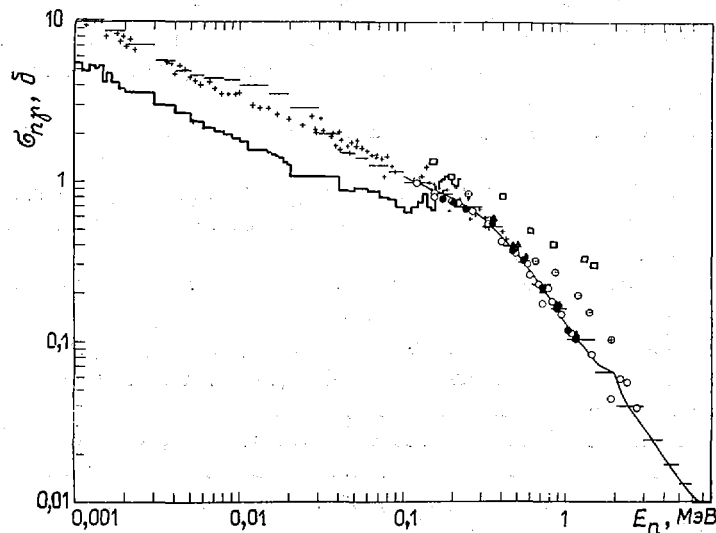


Рис.3. Сечения радиационного захвата ^{237}Np в области энергий нейтронов 1 кэВ - 15 МэВ. Данные: ● - [19,25]; ▲ - [19,26]; ○ - [27]; □ - [28]; + - [30]; L - [31]; — - [32]; - - - усредненные оценки ENDF/B-V в 74-групповой системе констант по постоянному спектру

Результаты работы [29], видимо, надо считать сильно завышенными. Частично это может быть связано с нормировкой. Однако систематическое нарастание расхождения с ростом энергии нейтронов может быть связано с недоучетом деления ^{237}Np и влиянием рассеянных нейтронов. Данные работ [30] и [31] (численных результатов и подробного описания которых у нас нет) для энергий нейтронов более 150 кэВ сильно расходятся. Для этих энергий результаты работы [30] близки к активационным. Анализ данных рис.3 показывает, что имеется настоятельная необходимость в проведении новых серий экспериментов для энергий менее 200 кэВ и более 1,5 МэВ.

Анализ данных по $\sigma_{n,\gamma}^{238\text{U}}$ показывает, что наличие даже нескольких работ с высокой объявленной точностью результатов не дает никакой гарантии получения оцененных данных с требуемой погрешностью.

Особо следует отметить состояние знаний о сечении $\sigma_{n,\gamma}^{237\text{Np}}$ для скоростей 2200 м/с. Максимальный разброс этих данных составляет 17% среднего значения (187-158 б [33,34]). Оценки также колеблются в пределах 181 [35] - 169 б [32,36]. Необходимы новые прецизионные измерения и соответствующий анализ всех опубликованных работ.

Список литературы

- I. Compilation of requests for nuclear data. January 1983: BNL-NCS-51572. US Department of Energy, 1983.
2. Абагян Л.П. и др. Групповые константы для расчета реакторов и защиты: М.: Энергоиздат, 1981.
3. Виноградов В.Н., Давлетшин А.Н., Кривцов А.С. и др. Оцененные средние сечения захвата ^{238}U в области энергий 0,001-7 МэВ. - В кн.: Ядерно-физические исследования в СССР, 1976, вып. 22, с.4.
4. Виноградов В.Н., Давлетшин А.Н., Платонов В.П. Радиационный захват быстрых нейтронов ядром урана-238. - В кн.: Нейтронная физика: Материалы 3-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 9-13 июня 1975 г. Ч.4. М.: ЦНИИАтоминформ, 1976, с.104.
5. Николаев М.Н., Абагян Л.П., Корчагина Ж.А. и др. Нейтронные данные для урана-238. Ч.I: Аналитический обзор А-34 (ОВ-45). Обнинск: ФЭИ, 1978.
6. Мантуров Г.Н., Лунев В.П., Горбачева Л.В. Оценка нейтронных данных ^{232}Th и ^{238}U в области неразрешенных резонансов. - В кн.: Нейтронная физика: Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 2-6 октября 1983 г. Т.2. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984, с.231.
7. Fawcett L.R., Poenitz W.P.Jr., Smith D.L. Measurement of the fast neutron capture cross-section. - In: Nucl. cross-sections for technol.: Proc. of the Intern. conf. of nuclear cross-sections for technology (Knoxville, 1979). Washington, 1980.
8. Давлетшин А.Н., Тихонов С.В., Тилунков А.С., Толстиков В.А. Измерение сечений радиационного захвата нейтронов для ^{238}U и ^{197}Au относительно сечения упругого рассеяния на протонах. - Атомная энергия, 1980, т.48, вып.2, с.87.
9. Паниткин Ю.Г., Толстиков В.А. Радиационный захват нейтронов в ^{238}U с энергиями 1,2-4 МэВ. - Там же, 1972, т.33, с.782.
10. Паниткин Ю.Г., Стависский Ю.Я., Толстиков В.А. Измерение сечений радиационного захвата нейтронов урана-238 в диапазоне энергий 0,024-1,1 МэВ: Материалы Всесоюзного совещания по нейтронной физике. Ч.1. Киев, 1972, с.321.
11. Drake D., Bergqvist I., Me Daniels D.K. Dependence of 14 MeV radiative neutron capture on mass number. - Phys.Letters, 1980, v.36B, N 6, p.557.
12. Давлетшин А.Н., Тилунков А.О., Толстиков В.А. О расхождении двух групп экспериментальных данных по сечениям радиационного захвата урана-238 для быстрых нейтронов: Доклад на МСЯД, INDC/P (83-49) (Бразилия, Рио-де-Жанейро, май 1983 г.).
13. Tolstikov V.A., Manokhin V.N. Status of neutron radiative capture data for ^{236}U and ^{237}Np . Transactinium isotope nuclear data - 1984: Proc. of the third advisory group meeting on transactinium isotope nuclear data (Uppsala, 21-25 May 1984). Vienna: IAEA, 1985, p.323-328.
14. Barry J.F., Bunce I.L., Perkin J.L. The radiative capture cross-section of ^{236}U for neutrons in the energy range 0,3-4,0 MeV. - Proc. Soc., 1961, v.78, N 503, p.801.
15. Stuepgia D.C., Heinrich R.R., Maccloud I.H. Neutron capture cross-sections of ^{236}U . - J. Nucl. Energy, 1961, parts A/B, v.15, p.200.

16. Carlson A.D., Friesenhahn J.F., Lopez W.M., Fricke M.P. The ^{236}U neutron capture cross-section. - Nucl. Phys., 1970, v.A141, p.577-594.
17. Бергман А.А., Медведев А.Н., Самсонов А.Е. и др. Измерение сечения радиационного захвата нейтронов для ^{236}U в области энергий 0,1-50 кэВ. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1982, вып. I (45), с.3-7.
18. Грудзевич О.Т., Давлетшин А.Н., Тихонов С.В. и др. Сечения радиационного захвата нейтронов ядрами ^{236}U в интервале энергий 0,15-1,1 МэВ. - Там же, 1983, вып.2 (51), с.3-15.
19. Давлетшин А.Н., Типунков А.О., Тихонов С.В., Толстиков В.А. Сечение радиационного захвата быстрых нейтронов ядрами ^{197}Au , ^{236}U , ^{237}Np . - Атомная энергия, 1985, т.58, вып.3, с.183-188.
20. Давлетшин А.Н., Типунков А.О., Тихонов С.В. и др. Результаты измерений $\sigma_{n,\gamma}^{236}\text{U}$ относительно $\sigma_{n,\gamma}^{197}\text{Au}$ в диапазоне энергий нейтронов 0,16-1,15 МэВ. - В кн.: Нейтронная физика: Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 2-6 октября 1983 г. Т.2. М.: ЦНИИатоминформ, 1983, с.181-184.
21. Давлетшин А.Н., Типунков А.О., Тихонов С.В. и др. Результаты измерений $\sigma_{n,\gamma}^{236}\text{U}$ относительно $\sigma_{n,p}$ в диапазоне энергий нейтронов 0,16-1,15 МэВ. - Там же, с.164.
22. Казаков Л.Е., Кононов В.Н., Полетаев Е.Д. и др. Измерения сечений радиационного захвата нейтронов для ^{236}U и ^{197}Au в области энергий 3-420 кэВ. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1985, вып.2, с.44.
23. Лунев В.П., Мантуров Г.Н., Типунков А.О., Толстиков В.А. Оценка нейтронных сечений ^{236}U в области неразрешенных резонансов. - См. [20], т.1, с.97.
24. Бадиков С.А., Гай Е.В., Работнов Н.С. и др. Оценка сечения захвата ^{236}U в интервале энергий $1 \text{ кэВ} \leq E_n \leq 1,1 \text{ МэВ}$ на основе паде-аппроксимации. - Там же, с.106.
25. Давлетшин А.Н., Типунков А.О., Тихонов С.В. и др. Результаты измерений $\sigma_{n,\gamma}^{237}\text{Np}$ относительно $\sigma_{n,\gamma}^{197}\text{Au}$ в диапазоне энергий нейтронов 0,16-1,15 МэВ. - Там же, т.2, с.189.
26. Давлетшин А.Н., Типунков А.О., Тихонов С.В. и др. Результаты измерений $\sigma_{n,\gamma}^{237}\text{Np}$ относительно $\sigma_{n,p}$ в диапазоне энергий нейтронов 0,16-1,15 МэВ. - Там же, с.185.
27. Трофимов Ю.Н., Немялов Ю.А. Сечение радиационного захвата ^{237}Np при $E_n = 0,3-1,9 \text{ МэВ}$. - Там же, с.142.
28. Lindner M., Nagle R.I., Landrum J.H. Neutron capture cross-sections from 0,1 to 3 MeV by activation measurements. - Ibid., 1976, v.59, p.381.
29. Stuepegia D.C., Smith M., Keedy C.R. The capture cross-section of ^{237}Np . - Nucl. Sci. and Engng, 1967, v.29, N 2, p.218.
30. Weston L.W., Todd I.H. Neutron capture cross-section of neptunium-237. - Nucl. Sci. and Engng, 1981, v.79, p.184.
31. Hoffman M.M. e.a. Bull. Amer. Phys. Soc., 1971, v.16, p.1181, см. также [36].
32. Mann F.M., Scheater R.E. e.a. ENDF/B-V data file for ^{237}Np (MAT 1337). BNL, 1979.
33. Eberle S.H. e.a. Project Actiniden. Rep. KFK-1456. Karlsruhe, 1971.
34. Брова Л.И., Поляков А.А., Рухло В.П. и др. Экспериментальное определение тепловых сечений и резонансных интегралов радиационного захвата ^{230}Th , $^{231,232,233}\text{Pa}$, ^{236}U , ^{237}Np . - В кн.: Нейтронная физика: Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 2-6 октября 1983 г. Т.2. М.: ЦНИИатоминформ, 1984, с.177.
35. Derrien H., Deat J.P., Fort E., LaFord D. Evaluation of ^{237}Np neutron cross-sections in the energy range from 10^{-5} eV to 14 MeV: Rep. INDC(FR)-42/L. Cadarache, September 1980.
36. Derrien H., Fort E. Proc. Intern. conf. neutron cross-section and technology, oct.22-26, 1979. Knoxville, 1980, p.872.

Статья поступила в редакцию 17 марта 1986 г.

А. В. Мурзин, В. П. Вертебный, А. Л. Кирилюк, В. А. Либман,
Л. Л. Литвинский, Г. М. Новоселов, В. Ф. Разбудей,
С. Б. Сидоров, Н. А. Трофимова

THE INTERMEDIATE NEUTRON INTERACTION AVERAGE PARAMETERS FOR ^{238}U . The total neutron cross-sections at 2, 55 and 144 keV neutron energies, the elastic neutron scattering cross-sections at 55, 144 keV and the inelastic one at 144 keV had been measured for ^{238}U on the Kiev WWR-M reactor by means of filtered neutron high flux beams. The neutron capture γ -ray spectra of ^{238}U had been investigated at 2, 24 and 55 keV. The p-wave strength function value $S_1 = (2,42 \pm 0,09) \cdot 10^{-4} \text{ eV}^{-1/2}$ and other neutron parameters of ^{238}U had been extracted from the neutron cross-section analysis.

Современные требования, предъявляемые к погрешности нейтронных микроконстант ^{238}U - основного сырьевого материала реактора-размножителя на быстрых нейтронах, - составляют 2-8% в интервале энергий 1-200 кэВ [1,2]. Такой энергетический диапазон важен при расчете атомных реакторов, поскольку на него приходится почти половина выхода многих реакций в спектре реактора на быстрых нейтронах [3]. Однако, несмотря на большое число экспериментальных работ и оценок, необходимая точность определения нейтронных сечений и нейтронных резонансных параметров для ^{238}U еще не достигнута.

В области энергий нейтронов менее 200 кэВ основной вклад во взаимодействие с тяжелыми атомными ядрами дают парциальные нейтронные s- и p-волны. Как показывает анализ результатов исследований в области разрешенных резонансов ($E = 0,5-4000$ эВ), даже для s-резонансов систематическая ошибка в определении нейтронных ширин Γ_{ps} увеличивается от 4% при низких энергиях до 20% вблизи верхней границы области разрешенных резонансов [4]. Более сложной задачей является определение средних резонансных параметров для p-нейтронов. Результаты различных исследований и оценок p-нейтронной силовой функции S_1 дают значения $(1,3-6) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$.

Особенностью ^{238}U является проявление промежуточной структуры в сечении радиационного захвата при усреднении сечения с интервалом 0,5 кэВ в области $E = 20-50$ кэВ [5,6]. Такая промежуточная структура может быть связана с преимущественным вкладом в захватное состояние ядра относительно простых конфигураций типа "входных состояний" [7], что может проявиться в характере спектров первичных γ -переходов в ^{239}U .

На реакторе ВВР-М ИЯИ АН УССР успешно используются квазиодноэнергетические пучки нейтронов с энергиями 2-144 кэВ, выделяемые с помощью различных фильтров. Высокая интенсивность фильтрованных пучков позволяет с высокой точностью измерять полные и парциальные нейтронные сечения в указанном энергетическом диапазоне [8].

В настоящей работе приведены результаты измерений для ^{238}U полных сечений, дифференциальных и полных сечений упругого и неупругого рассеяния нейтронов, исследованы эффекты резонансного самоэкранирования в нейтронных сечениях, а также измерены спектры γ -переходов из захватного состояния ^{239}U при различных энергиях нейтронов. На основе полученных результатов измерений определены средние резонансные параметры взаимодействия с ^{238}U нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов. Особое внимание обращено на отработку и анализ методов, обладающих наибольшей чувствительностью к величине p-нейтронной силовой функции S_1 и позволяющих определить ее значение с наилучшей точностью.

Для получения нейтронов со средними энергиями 2, 24, 55 и 144 кэВ использовались скандиевый, железный и кремниевый фильтры [8]. Характеристики фильтров приведены в табл. I. При измерениях полных нейтронных сечений методом пропускания толщина фильтров из кремния (п.3 и 4 табл. I) увеличивалась соответственно до 530 и 300 г/см². Методика измерений полных нейтронных сечений описана в работе [9]. Исследуемые образцы располагали вблизи выхода фильтра. Нейтроны регистрировались с помощью пропорциональных счетчиков, наполненных ^3He (СНМ-52) или водородом (СНМ-38) соот-

ответственно при измерениях с энергией 2 или 55 и 144 кэВ. Счетчики располагали на расстоянии около 4 м от выхода фильтра. Для исследования резонансного самоэкранирования в полных нейтронных сечениях ^{238}U для различных толщин образцов от 0,00128 до 0,279 ядро/б были проведены измерения "наблюдаемого" полного сечения, определяемого как $\hat{\sigma}_t^n = -\ln T/n$, где n - толщина образца (рис. 1, а, б).

Таблица 1

Характеристики нейтронных фильтров

Но- мер п.п.	Материал фильтра	Толщина фильтра, г/см ²	Средняя энергия, кэВ	Полная ширина на половине высоты спектра нейтронов, кэВ	Поток нейтронов на расстоянии 1 м от конца фильтра $\times 10^6$, см ⁻² ·с ⁻¹
1	Кремний	258	2	0,8	5
	В ₄ С	0,3			
2	Железо	156	24	2	1,5
	Алюминий	81			
	Сера	13,6			
	В ₄ С	0,3			
3	Кремний	200	55	2	1,1
	Сера	41			
	10В	0,2			
4	Кремний	200	144	25	8
	Титан	6,8			
	10В	0,2			

Усредненное полное нейтронное сечение при $E = 2$ кэВ $\langle \sigma_t \rangle$ определялось по анализу экспериментальных данных путем моделирования резонансной структуры сечения методом Монте-Карло [10]. При энергиях 55 и 144 кэВ величина этого сечения определялась путем линейной экстраполяции полученных экспериментальных значений $\hat{\sigma}_t^n$ к нулевой толщине образца. На рис. 1, а, б результаты расчетов показаны кривыми. Полученные значения $\langle \sigma_t \rangle$: при энергии нейтронов 2 кэВ (24,69±0,30)б, при 55 кэВ (13,343±0,051)б, при 144 кэВ (11,551±0,022)б.

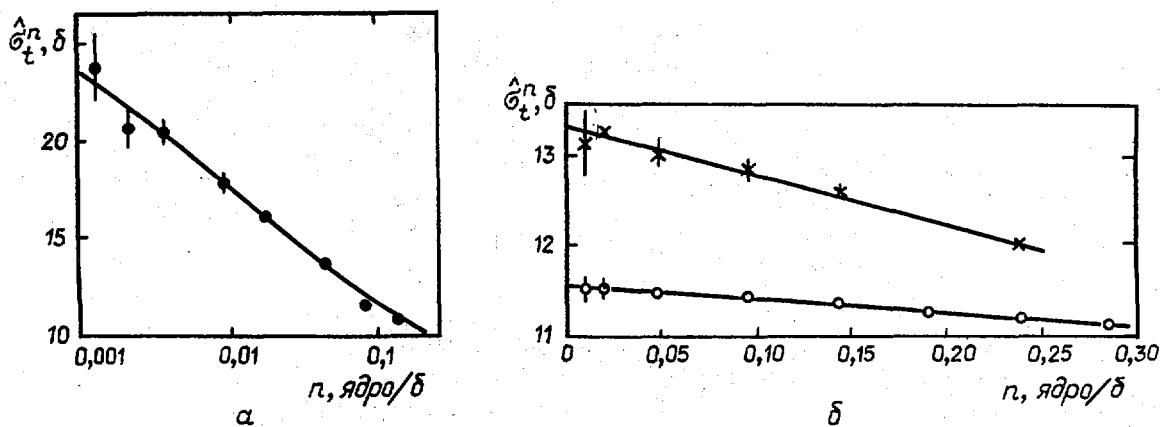


Рис. 1. Резонансное самоэкранирование в полном нейтронном сечении ^{238}U при энергиях 2 кэВ (●), 55 кэВ (×), 144 кэВ (○)

Методика измерения сечений упругого и неупругого рассеяния нейтронов описана в работе [9]. Дифференциальные и полные сечения рассеяния нейтронов с энергиями 55 и 144 кэВ ураном-238 определяли по отношению к сечению рассеяния свинца. Образец ^{238}U диаметром 46,3 мм и толщиной 0,0326 ядро/б устанавливали на расстоянии 1,3 м от края фильтра. Рассеянные нейтроны регистрировали по протонам отдачи спектрометрическим счетчиком СМ-38, находящимся на расстоянии 300 мм от центра образца. Счетчик был защищен от внешнего фона свинцом и борированным полиэтиленом толщиной соответственно 30 и 20 мм. Интервал возможных углов регистрации рассеянных нейтронов составлял 30–150 град. Угловое разрешение составляло около 5° . Измерения проводились в течение 1–2 ч для каждого угла регистрации рассеянных нейтронов (5 углов при $E = 55$ кэВ и 9 при $E = 144$ кэВ). Получаемые спектры протонов отдачи при $E = 144$ кэВ позволяли надежно выделять на фоне упруго-рассеянных нейтронов вклад от нейтронов, испытавших неупругое рассеяние на первом возбужденном уровне ^{238}U с энергией 45 кэВ. Форму спектра протонов отдачи от упругого рассеяния нейтронов определяли при рассеянии нейтронов образцом свинца. Измерения неупругого рассеяния нейтронов при $E = 55$ кэВ не проводили.

Абсолютное значение сечения рассеяния свинца определялось как разность полного сечения, получаемого в эксперименте по пропусканию, и сечения захвата [11]. Поскольку сечение захвата очень мало (около 5 мб), точность сечения рассеяния определялась точностью полного сечения. Полученное значение сечения рассеяния для используемого образца свинца составляло $(10,44 \pm 0,25)$ б и $(9,344 \pm 0,027)$ б при энергиях 55 и 144 кэВ соответственно.

Дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов с энергией 144 кэВ ураном-238 представлены на рис. 2. На этом же рисунке сплошными линиями показаны результаты разложения угловой зависимости сечений по полиномам Лежандра. Как показал анализ, в пределах экспериментальных погрешностей угловое распределение неупругорассеянных нейтронов имеет изотропный характер.

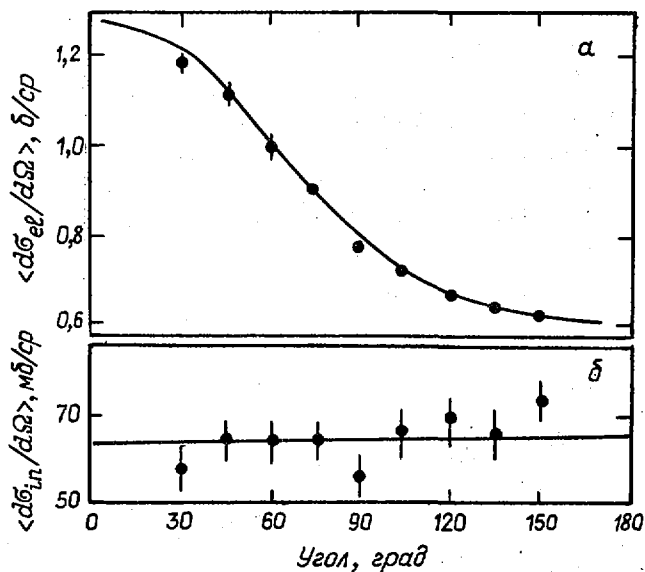


Рис. 2. Дифференциальное сечение упругого (а) и неупругого (б) рассеяния нейтронов с энергией 144 кэВ ураном-238

Полные сечения рассеяния нейтронов ураном-238 определяли путем интегрирования дифференциальных сечений. В табл. 2 приведены полученные экспериментальные значения сечений упругого $\langle \sigma_{el} \rangle$ и неупругого $\langle \sigma_{in} \rangle$ рассеяния, а также поправки на многократные процессы, рассчитанные методом Монте-Карло, и поправки на резонансное самоэкранирование, которые были определены при измерениях σ_{el}^n и σ_{in}^n с пучком нейтронов, перекрывааемым образцами ^{238}U толщиной от 0,05 до 0,3 ядро/б [9].

Определенное в настоящей работе значение сечения неупругого рассеяния превышает по точности все имеющиеся данные [12–17] в области энергий 100–200 кэВ в 3–4 раза (рис. 3). Сплошная кривая на рисунке – результат расчета энергетической зависимости σ_{in} на основе параметров, полученных в настоящей работе.

Таблица 2

Сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов ураном-238

Энергия нейтронов, кэВ	Сечение, б	Поправки на, %	
		многократные процессы в образце*	резонансное самоэкранирование
55	$\langle \sigma_{el} \rangle = 12,887 \pm 0,063$	2-18	2,9
144	$\langle \sigma_{el} \rangle = 10,568 \pm 0,102$	1-22	0,94
144	$\langle \sigma_{in} \rangle = 0,815 \pm 0,024$	9-38	-

* Минимальное и максимальное значения поправок в исследуемом интервале углов регистрации 30-150°.

На основе полученных значений нейтронных сечений были определены резонансные параметры и параметры потенциального рассеяния ^{238}U . Анализ данных по резонансному самоэкранированию в полном сечении при энергии 2 кэВ проводился одновременно с определением абсолютных значений $\langle \sigma_t \rangle$. При анализе экспериментальных данных о сечениях упругого и неупругого рассеяния нейтронов с энергиями 55 и 144 кэВ были использованы усредненные по резонансам одноуровневые выражения для нейтронных сечений [18]. Результат определения резонансных параметров и параметров потенциального рассеяния (R_0^∞ , R_0' , R_1^∞ , R_2^∞ , S_0 , S_1), полученных при анализе перечисленных данных, приведены в табл. 3. В таблице приведены также используемые при расчетах значения среднего расстояния между s-резонансами D_0 , средней радиационной ширины Γ_1 в области разрешенных резонансов и другие резонансные параметры ^{238}U .

В пределах ошибок значения s-нейтронной силовой функции S_1 , определенные из анализа данных при энергиях 2 и 55 кэВ, согласуются между собой. Отличие значений S_0 от рекомендуемой в работах [19, 20] величины $S_0 = (1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$ не превышает флуктуационной погрешности настоящего эксперимента.

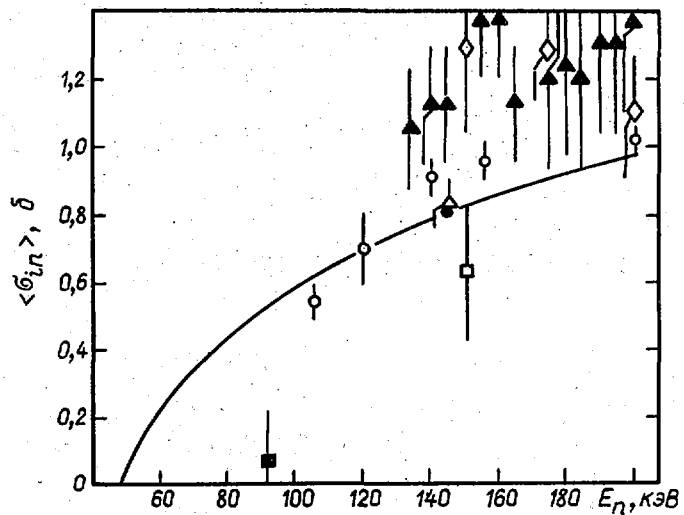


Рис. 3. Сечение неупругого рассеяния нейтронов ураном-238. Данные работ: ● - настоящей; ○ - [12]; △ - [13]; ■ - [14]; □ - [17]; ○ - [15]; ▲ - [16];

Оптический радиус рассеяния s-волны R_0' определен на основе анализа нейтронных сечений ^{238}U при энергиях 2 и 144 кэВ. В пределах погрешностей полученные значения R_0' совпадают. Определенные в настоящей работе значения R_0' , R_0^∞ , R_1^∞ , R_2^∞ в пределах экспериментальных ошибок согласуются с результатами других авторов [19-21].

Согласно проведенным расчетам, основной вклад в величину $\langle \sigma_{in} \rangle$ при энергии 144 кэВ (около 80%) приходится на парциальную p-нейтронную волну, что позволило с высокой точностью (около 4%) определить p-нейтронную силовую функцию S_1 для ^{238}U . Определенное на основе $\langle \sigma_{in} \rangle$ значение S_1 по точности превышает в 4-5 раз результаты, полученные при анализе полных нейтрон-

ных сечений и угловых распределений упругорассеянных нейтронов при энергиях 55 и 144 кэВ, и не противоречит последним.

Полученное в настоящей работе значение ρ -нейтронной силовой функции $S_1 = (2,42 \pm 0,09) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$ по точности превышает в 2-3 раза данные других авторов [4, 19, 20] и сравнимо только со значением $S_1 = (2,07 \pm 0,10) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$, полученным на основе анализа σ_t^n при $E < 30 \text{ кэВ}$ [22].

Следует отметить, что определяемая из анализа $\langle \sigma_{in} \rangle$ величина S_1 слабо зависит от используемых при расчете параметров. При изменении параметров $\Gamma_\gamma, D_0, D_1, S_0, S_2$ на $\pm 30\%$ значение S_1 изменяется не более чем на 5%. В связи с этим авторам кажется более предпочтительным результат, полученный при анализе величины $\langle \sigma_{in} \rangle$, по сравнению с результатом анализа σ_t^n , проведенного в работе [22].

Таблица 3

Средние резонансные параметры ^{238}U

Энергия нейтронов, кэВ	Анализируемая величина	Параметры		Флюктуационная ошибка
		закрепляемые при расчете*	определяемые	
2	σ_t^n	$D_0 = 24,8 \text{ эВ}$	$S_0 = (1,53 \pm 0,03) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$	0,4
		$\Gamma_\gamma = 23 \text{ мэВ}$	$R_0^1 = (9,15 \pm 0,02) \text{ фм}^{**}$	0,2
55	$\langle \sigma_t \rangle, \langle d\sigma_{el}/d\Omega \rangle$	D_0, Γ_γ, S_2	$S_0 = (1,95 \pm 0,35) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$	0,3
		$R_0^\infty, R_1^\infty, R_2^\infty$	$S_1 = (1,89 \pm 0,40) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$	0,2
144	$\langle \sigma_t \rangle, \langle d\sigma_{el}/d\Omega \rangle$	$D_0, \Gamma_\gamma, S_0, S_2$	$S_1 = (2,50 \pm 0,32) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$	0,07
			$R_0^1 = (9,146 \pm 0,24) \text{ фм}$	-
			$R_0^\infty = (-0,093 \pm 0,029) \text{ фм}$	-
			$R_1^\infty = (0,257 \pm 0,027) \text{ фм}$	-
			$R_2^\infty = (0,82 \pm 0,71) \text{ фм}$	-
144	$\langle \sigma_{in} \rangle$	$D_0, \Gamma_\gamma, S_0, S_2$	$S_1 = (2,422 \pm 0,088) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$	0,07

* Использовались следующие значения закрепляемых параметров (за исключением значений D_0 и Γ_γ при $E = 2 \text{ кэВ}$, приведенных в таблице): $D_0 = (21,05 \pm 0,10) \text{ эВ}$; $\Gamma_\gamma = (23,5 \pm 0,5) \text{ мэВ}$; $S_0 = S_2 = (1,06 \pm 0,10) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$; $S_1 = (2,42 \pm 0,10) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^{-1/2}$; $R_0^\infty = -(0,093 \pm 0,029)$; $R_1^\infty = 0,257 \pm 0,027$; $R_2^\infty = 0,82 \pm 0,71$.

** 1 фм (фемтометр) = 10^{-15} м .

Измерение высокоэнергетической части спектров γ -квантов радиационного захвата нейтронов с энергиями 2, 24 и 55 кэВ проведены с помощью парного спектрометра, состоящего из Ge(Li) -детектора объемом 28 см^3 и двух сцинтилляционных детекторов NaI размером $200 \times 100 \text{ мм}$. Исследуемый образец ^{238}U размером $46,5 \times 10 \text{ мм}$ располагали под углом 50° по отношению к оси пучка нейтронов. Поток нейтронов определяли с помощью образца ^{10}B , расположенного на месте образца урана. Относительную эффективность спектрометра определяли по γ -линиям из реакции $\text{Cl}(n, \gamma)$ на тепловых нейтронах. Пропускание нейтронов исследуемым образцом, поправки на многократные процессы и резонансное самоэкранирование определяли так же, как и $\langle \sigma_t \rangle$ и $\langle \sigma_s \rangle$. На основе полученных спектров γ -квантов были определены парциальные сечения первичных переходов $\sigma_{\gamma i}$ в ^{239}U .

Характерная особенность полученных спектров первичных переходов - значительное снижение флюктуаций $\sigma_{\gamma i}$ по сравнению со спектрами γ -квантов при распаде отдельных резонансов. Величины $\sigma_{\gamma i}$ оказываются зависящими только от энергии и мультипольности перехода, а также от спина конечного состояния, что хорошо согласуется с предсказаниями статистической теории о независимости каналов γ -распада захватного состояния от природы нижних возбужденных уровней. Измеренные первичные переходы в ^{239}U [23] представляют собой смесь переходов различной мультипольности из s- и p-резонансов. По соотношениям радиационных ширин E1, M1 и E2-переходов, определенных

измерениями на разрешенных S -резонансах ^{238}U [24], методом последовательных приближений из полученных значений σ_{γ_i} были выделены вклады, соответствующие $E1$ -переходам $\sigma_{\gamma_i}^-(E1)$. Очевидно, что для переходов на уровни отрицательной и положительной четности парциальные сечения $\sigma_{\gamma_i}^-(E1)$ и $\sigma_{\gamma_i}^+(E1)$ определяются соответственно распадом S - и P -резонансов. Чтобы исключить зависимость $\sigma_{\gamma_i}^-(E1)$ от энергии перехода, использовали величину $\sigma_{\gamma_i}^-(E1)E_{\gamma_i}^{-5}$, пропорциональную приведенной вероятности первичных $E1$ -переходов. Соотношение средних значений $\langle \sigma_{\gamma_i}^-(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ и $\langle \sigma_{\gamma_i}^+(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ пропорционально соотношению парциальных сечений захвата S - и P -нейтронов σ_{γ_s} , σ_{γ_p} , которые рассчитывали на основе средних резонансных параметров, полученных при измерениях $\langle \sigma_t \rangle$ и $\langle \sigma_s \rangle$.

На рис. 4 показаны результаты расчета величин σ_{γ} , σ_{γ_s} , σ_{γ_p} и σ_{γ_d} с использованием параметров, приведенных в табл.3, и значения $\langle \sigma_{\gamma_i}^-(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ и $\langle \sigma_{\gamma_i}^+(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ соответственно для 9 переходов на уровни со спином J^π , равным $1/2^-$, $3/2^-$, и 11 переходов со спином, равным $1/2^+$, $3/2^+$. Значения $\langle \sigma_{\gamma_i}^-(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ нормированы по величине σ_{γ_s} при $E = 2$ кэВ.

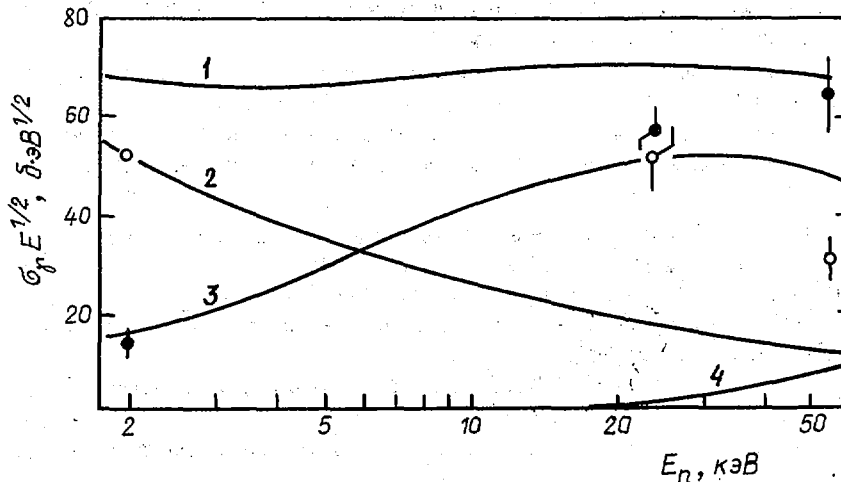


Рис.4. Сравнение экспериментальных значений $\langle \sigma_{\gamma_i}^-(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ (○) и $\langle \sigma_{\gamma_i}^+(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ (●) с расчетными значениями σ_{γ} , σ_{γ_s} , σ_{γ_p} , σ_{γ_d} (соответственно кривые 1,2,3,4)

Как видно из приведенных данных, значения $\langle \sigma_{\gamma_i}^+(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ хорошо согласуются с расчетными значениями σ_{γ_p} . В то же время значение $\langle \sigma_{\gamma_i}^-(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ при $E = 24$ кэВ почти в 3 раза превышает соответствующее значение σ_{γ_s} . Поскольку флуктуационная ошибка величины $\langle \sigma_{\gamma_i}^-(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ составляет 5%, достоверность того, что наблюдающееся отклонение $\langle \sigma_{\gamma_i}^-(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ носит нестатистический характер, должна быть достаточно высокой. Сумма парциальных сечений $\sigma_{\gamma_i}^-(E1)$ данных $E1$ -переходов по отношению к сечению σ_{γ_s} составляет 2 и 6% при энергиях соответственно 2 и 24 кэВ. В полном сечении радиационного захвата, при энергиях 2 и 24 кэВ также наблюдается увеличение сечения [5], но интенсивность этого отклонения значительно меньше, чем следовало бы ожидать при увеличении сечения σ_{γ_s} в 3 раза. Таким образом, наблюдающееся отклонение $\langle \sigma_{\gamma_i}^-(E1)E_{\gamma_i}^{-5} \rangle$ вызвано, по-видимому, усилением только жесткой части первичных переходов в ^{239}U .

В заключение отметим, что измерения на фильтрованных пучках атомного реактора, как показал пример с ^{238}U , обеспечивают высокую точность определения нейтронных сечений и резонансных параметров. Разработанные новые методики определения P -нейтронной силовой функции могут быть использованы для исследования многих ядер.

Список литературы

1. Усацев Л.Н., Бобков Ю.Г. Теория возмущений и планирование эксперимента в проблеме ядерных данных для реакторов. М.: Атомиздат, 1980.
2. Rowlands J.L. Nuclear data for reactor design, operation and safety: Proc. Intern. conf. on neutron phys. and nucl. data for reactors (Harwell, 1978). Paris: OECD, 1978, p.7-27.
3. Бобков Ю.Г., Пятницкая Л.Т., Усацев Л.Н. Планирование экспериментов по нейтронной физике и оценка для реакторов. Обнинск, 1974.
4. De Saussure G., Olsen D.K., Perez R.B. e.a. Evaluation of the ^{238}U neutron cross-sections for incident neutron energy up to 4 keV. - Progress in Nuclear Energy, 1979, v.3, p.87-125.
5. Perez R.B., de Saussure G., Macklin R.L. e.a. Statistical tests for the detection of intermediate structure: application to the structure of the ^{238}U neutron capture cross-section between 5 keV and 0,1 MeV. - Phys. Rev. C, 1979, v.20, N 2, p.528-545.
6. Moore M.S., Corvi F., Mewissen L. e.a. Parity assignment of the pronounced structure in radiative capture of neutrons by ^{238}U below 100 keV: Proc. Intern. symp. on neutron capture gamma-ray spectroscopy and related topics (Grenoble, 1981). London, 1982, p.415-416.
7. Feshbach H., Kerman A.K., Lemmer R.H. Intermediate structure and doorway states in nuclear reactions. - Ann. Phys., 1967, v.41, p.230-286.
8. Вертебный В.П. Исследование нейтронных резонансов атомных ядер на стационарных атомных реакторах: IV Школа по нейтронной физике. Дубна: ОИЯИ, 1982, с.66-87.
9. Литвинский Л.Л., Либман В.А., Мурзин А.В. Установка для определения угловых распределений упруго- и неупругорассеянных нейтронов с помощью нейтронных фильтров: Препринт КИЯИ-85-35. Киев, 1985.
10. Новоселов Г.М., Вертебный В.П. Применение метода Монте-Карло для расчета нейтронных сечений в неразрешенной области: Препринт КИЯИ-77-9. Киев, 1977.
11. Gerber D.I., Kinsey R.R. Neutron cross-sections. BNL-325, 1976, v.2.
12. Guenther P., Havel D., Smith A. Note on neutron scattering and the optical model near A-208; ANL/NDM-22. Argonne nat. lab., 1976.
13. Tsang F.Y., Brugger R.M. The differential neutron scattering cross-section of uranium-238 at 144 keV. - NSE, 1978, v.65, p.70-75.
14. Strömberg L.G., Schwarz S. Inelastic scattering of 95 keV neutrons from the 45 keV level in ^{238}U . - Nucl. Phys., 1965, v.71, N 3, p.511-523.
15. Barnard E., Ferguson A., McMurray W. e.a. Scattering of fast neutrons by ^{238}U . - Nucl. Phys., 1966, v.80, N 1, p.46-61.
16. Barnard E., Ferguson A., McMurray W. e.a. Inelastic scattering of fast neutrons from ^{238}U ; Proc. Second Intern. conf. on nuclear data for reactors (Helsinki, 1970). Vienna: IAEA, 1970, p.103-104.
17. Allen R.C. The interaction of 0,5 to 1,0 MeV neutrons with U-238, U-235 and Pu-239. - Nucl. Sci. and Engng, 1957, v.2, p.787-793.
18. Лукьянов А.А. Замедление и поглощение резонансных нейтронов. М.: Атомиздат, 1974.
19. ENDF/B-IV Dosimetry file. Ed. by V.A. Magurno: BNL-NCS-50446. Brookhaven National Laboratory, 1975.
20. Maghabghab S.F. Neutron cross-sections. Academic Press, 1984.
21. Tsabone I., Nakajima Y., Furuta Y. Neutron cross-sections of ^{181}Ta and ^{238}U from 24.3 keV to 1 MeV and average resonance parameters. - Nucl. Sci. and Engng, 1984, v.88, p.579-581.
22. Ваньков А.А., Гостева Л.С., Украинцев В.Ф. Анализ экспериментов по пропусканию для ^{238}U в области неразрешенных резонансов. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1983, вып.3(52), с.27.
23. Мурзин А.В., Либман В.А., Кононенко И.В. и др. Спектры γ -лучей из реакции $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$ при захвате нейтронов со средней энергией 2,24 и 55 кэВ. - В кн.: Нейтронная физика: Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 2-6 октября 1983 г. Т.2. М.: ЦНИИатоминформ, 1984, с.313-317.
24. Wasson O.A., Chrien R.E., Slaughter G.G. e.a. Distribution of partial radiation widths in $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$. - Phys. Rev. C, 1971, v.4, N 3, p.900-912.

Статья поступила в редакцию 25 марта 1986 г.

THE EVALUATION OF FAST NEUTRON FISSION CROSS-SECTION FOR CURIUM ISOTOPES. The method and tentative results of fission cross-section evaluation of curium isotopes with mass numbers 242-244 and 246-248 for the energy range $E_n = 0,1-20$ MeV are described and available. The fission cross-section curve evaluated are compared with the experimental data and alternative evaluations.

Экспериментальные результаты измерения сечений деления изотопов юрия характеризуются низкой точностью и большими расхождениями между данными разных работ. Это объясняется прежде всего трудностями измерения сечения деления, связанными с высокой вероятностью α -распада и спонтанного деления изотопов юрия. Неудовлетворительное состояние экспериментальных данных, а также трудности теоретического описания зависимости $\sigma_f(E_n)$ приводят к большим расхождениям в оценках сечений деления. По мнению авторов, в настоящее время ни одна из оценок сечений деления в области быстрых нейтронов не может быть рекомендована к использованию в диапазоне энергий нейтронов 0,1-20 МэВ. Основой для более совершенных оценок могут быть только новые более точные экспериментальные данные. В настоящее время такие данные, представленные в работе [1], имеются только для ^{245}Cm . Качество этих результатов по точности, подробности и широте изученного диапазона энергий такое, что данные работы [1] заменяют собой оценку сечения деления ^{245}Cm быстрыми нейтронами. Однако и для других изотопов юрия можно получить более реальную оценку на основе имеющихся экспериментальных данных, что и послужило целью настоящей работы.

Особенность подхода к оценке сечений деления изотопов юрия состоит в следующем:

- рассмотрены многочисленные экспериментальные данные, полученные не только в реакциях (n, f) , но и в прямых реакциях $(^3\text{He}, df)$, $(^3\text{He}, tf)$, (t, pf) , (d, pf) , $(p, p'f)$ из работ Бритта с соавторами;

- осуществлен единый подход к отбору и взаимному согласованию экспериментальных результатов;

- в качестве основы оценки использована систематика сечений и других характеристик деления трансурановых ядер [2].

Метод оценки

Расчеты сечения деления в околороговой области энергий нейтронов с приемлемой точностью невозможны из-за неполного знания спектра каналов деления, особенно для четно-четных делящихся ядер. Однако именно при низких энергиях (не более 1 МэВ) экспериментальные данные о сечениях деления и делимостях изотопов юрия наиболее подробно изучены. Для более высоких энергий нейтронов число данных заметно уменьшается, тем не менее создаются более благоприятные условия для использования теории. С увеличением энергии возбуждения число доступных каналов деления экспоненциально возрастает, стираются индивидуальные особенности ядер и становится пригодным статистическое описание, лишенное указанной выше трудности.

Результаты теоретического и феноменологического анализ вероятности деления показывают, что в области выше порога ($E_n \approx 2-5$ МэВ) средняя делимость тяжелых ядер $\langle P_f \rangle$ слабо зависит от энергии. Это приводит к существованию областей так называемого "плато" в энергетической зависимости $P_f(E)$. Такое обстоятельство использовано в оценке авторов: при энергии нейтронов не менее 2 МэВ для всех изотопов юрия принято $P_f(E_n) = P_f^0 = \text{const}$.

Зависимость величины P_f^0 от нуклонного состава ядер детально исследовалась в работах [2,3]; показано, что для трансурановых ядер (уран-эйнштейний) совокупность значений P_f^0 со среднеквадратичной погрешностью около 15% описывается простой физической моделью, которую авторы в дальнейшем показывают систематикой P_f^0 . Использование результатов систематики для оценки сечения деления изотопов юрия в качестве опорных значений в области плато ($E_n = 2-5$ МэВ) позволяет избежать грубых ошибок при анализе несоответствующих экспериментальных данных.

Для совместного рассмотрения и описания данных о нейтронных сечениях деления $\sigma_f(E_n)$ и делимости ядер в прямых реакциях $P_f(E)$ необходима информация о нейтронном сечении образования компаунд-ядра, позволяющего сопоставлять между собой данные по величинам P_f и σ_f : $P_f(E) = \sigma_f(E_n) / \sigma_c(E_n)$, если $E = E_n + B_n$, и, наоборот, $\sigma_f(E_n) = \sigma_c(E_n) P_f(E_n + B_n)$. В настоящей работе использованы результаты расчетов $\sigma_c(E_n)$ по модели связанных каналов с параметрами для ^{246}Cm согласно данным работы [4]. Для других ядер-мишеней с массовым числом A принималось $\sigma_c^A(E_n) = \sigma_c^{246}(E_n)(A/246)^{2/3}$. При делении компаунд-ядра с A в диапазоне энергий нейтронов выше 6 МэВ включается реакция $(n, n'f)$, а выше 12 МэВ - реакция $(n, 2nf)$, в которых делятся соответственно ядра с $A-1$ и $A-2$. Если известны данные о делимости $P_f(E)$ в области энергии возбуждения от порога деления до плато для цепочки изотопов $A, A-1, A-2$, можно рассчитать полное сечение деления в области энергии выше порогов реакций (n, nf) и $(n, 2nf)$, т.е. для энергий нейтронов более 5 МэВ

$$\left. \begin{aligned} \sigma_f(E_n) &= \sigma_f^A(E_n) + \Delta\sigma_f^{A-1}(E_n) + \Delta\sigma_f^{A-2}(E_n), \\ \text{где } \sigma_f^A(E_n) &= \sigma_c(E_n) P_f^0(A); \quad \Delta\sigma_f^{A-1}(E_n) = \sigma_c(E_n) \left[1 - P_f^0(A) \right] \int_0^{E_n} P_f^{A-1}(E_n - \varepsilon) N(\varepsilon) d\varepsilon; \\ \Delta\sigma_f^{A-2}(E_n) &= \sigma_c(E_n) \left[1 - P_f^0(A) \right] \left[1 - P_f^0(A-1) \right] \int_0^{E_n - B_n^{A-1}} N(\varepsilon_2) d\varepsilon_2 \int_0^{E - B_n^A - \varepsilon_2} P_f^{A-2}(E_n - B_n^{A-1} - \varepsilon_2 - \\ &- \varepsilon_1) N(\varepsilon_1) d\varepsilon_1. \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

Для спектра испускаемых нейтронов $N(\varepsilon) = \varepsilon / T^2 \exp(-\varepsilon/T)$ было принято значение $T_1 = T_2 = T = 0,5$ МэВ, близкое к данным работы [5].

Оценка величины сечения деления для каждого изотопа кюрия осуществлялась следующим образом:

1. Для цепочки делящихся ядер кюрия с $A = 241-249$ во всем изученном диапазоне энергий анализировалась совокупность экспериментальных данных о вероятности деления $P_f(E)$, полученных из нейтронных экспериментов и в прямых реакциях. Отдельные экспериментальные результаты отвергались ввиду их несоответствия по форме энергетической зависимости другим, более надежным данным или физическим представлениям, основанным на сравнении с другими ядрами той же четности.

2. Отобранные экспериментальные значения $P_f(E)$ нормировались в интервале энергий нейтронов 2-4 МэВ на значение P_f^0 из систематики работы [2]. Как правило, смещение данных при нормировке не превышало экспериментальных погрешностей.

3. Совокупность отнормированных экспериментальных значений аппроксимировалась рациональными функциями (программа RADE-2). В результате аппроксимации для всех компаунд-ядер кюрия с числами $A = 241-249$ был получен набор функций $P_f(E)$ от порога деления до области плато ($E_n = 2-5$ МэВ). Ниже этой энергии значение $P_f(E)$ основано на сглаженной экспериментальной зависимости, а для более высоких энергий (вплоть до 20 МэВ) это значение принималось равным $P_f^0 = \text{const}$ [2].

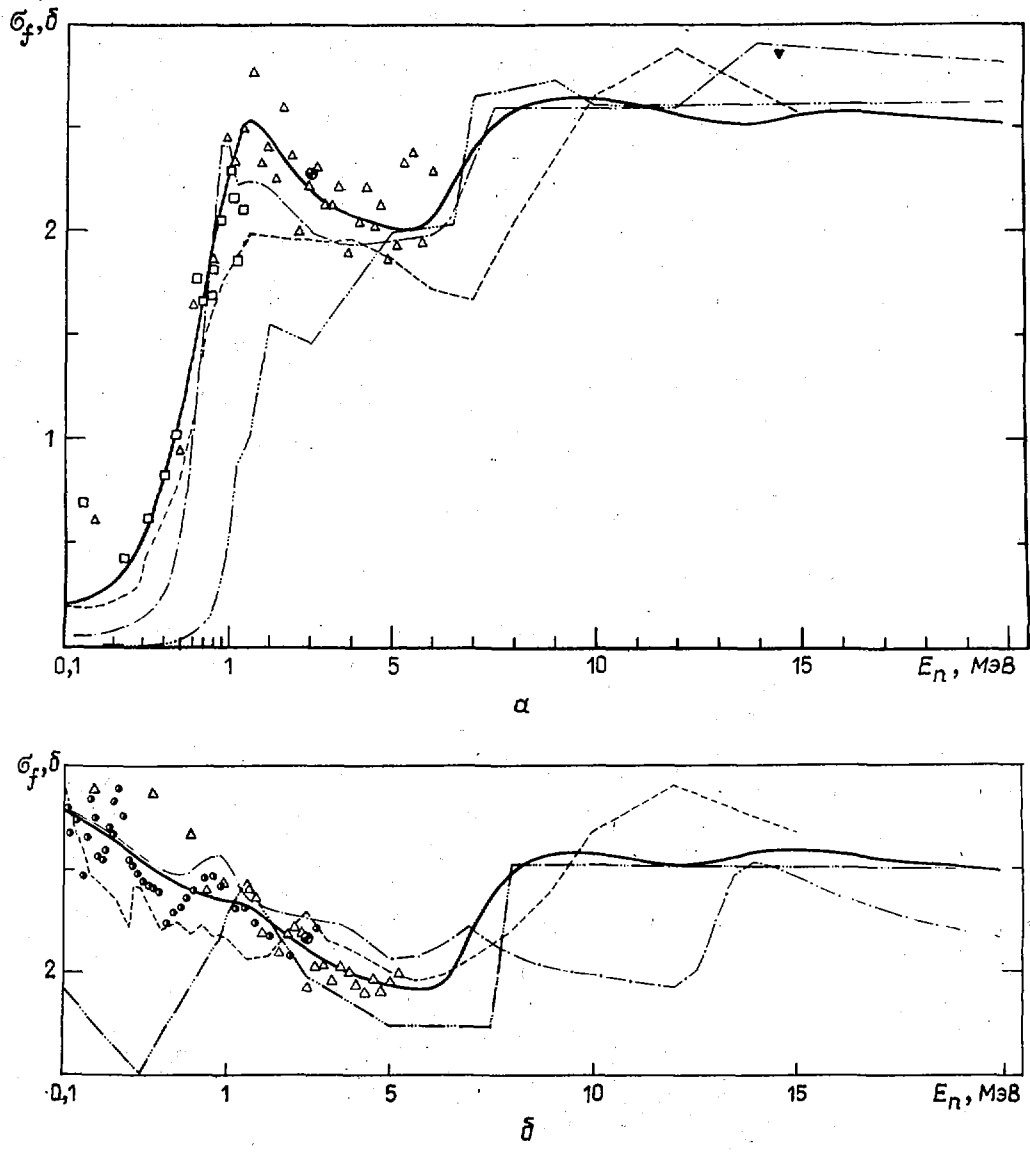
4. На основе соотношений [1] рассчитывалась зависимость $\sigma_f(E_n)$ в диапазоне энергий нейтронов 0,1-20 МэВ для ядер-мишеней кюрия с $A = 242-248$.

Обсуждение результатов

^{242}Cm (рис.1,а). Для согласования с систематикой [2] данные работы [6] увеличены в 1,23 раза. В области порога деления они удовлетворительно согласуются с нейтронными данными работы [7] (измеренными со статистической ошибкой 15-20%), которые были усреднены по энергии и подняты на 9%. Настоящая оценка выше других, представленных на рис.1,а в области ниже порога реакции (n, nf) ; в диапазоне энергий нейтронов более 7 МэВ она имеет самые низкие значения. Величина $\sigma_f = 2,86 \pm 0,30$ б для энергии нейтронов 14,5 МэВ из работы [8] уменьшена на 5,5% в связи с изменением стандарта $\sigma_c(^{235}\text{U})$. Тем не менее она превышает значение сечения образования компаунд-ядра $\sigma_c = 2,68$ б [4] и, возможно, является завышенной.

Для расчетов сечения деления в области выше порогов реакций (n, pf) , $(n, 2nf)$ использовались данные работы [6] для компаунд-ядер ^{242}Cm и ^{241}Cm (коэффициенты нормировки на систематику соответственно 1,09 и 1,08).

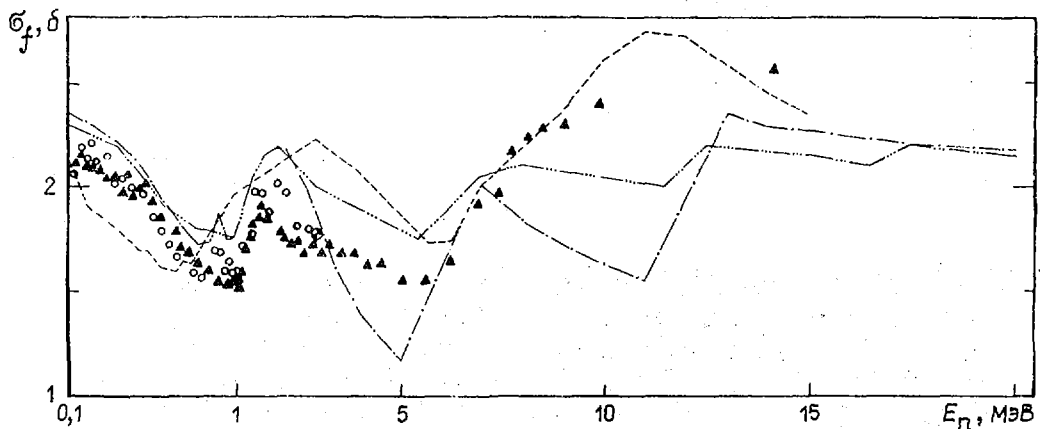
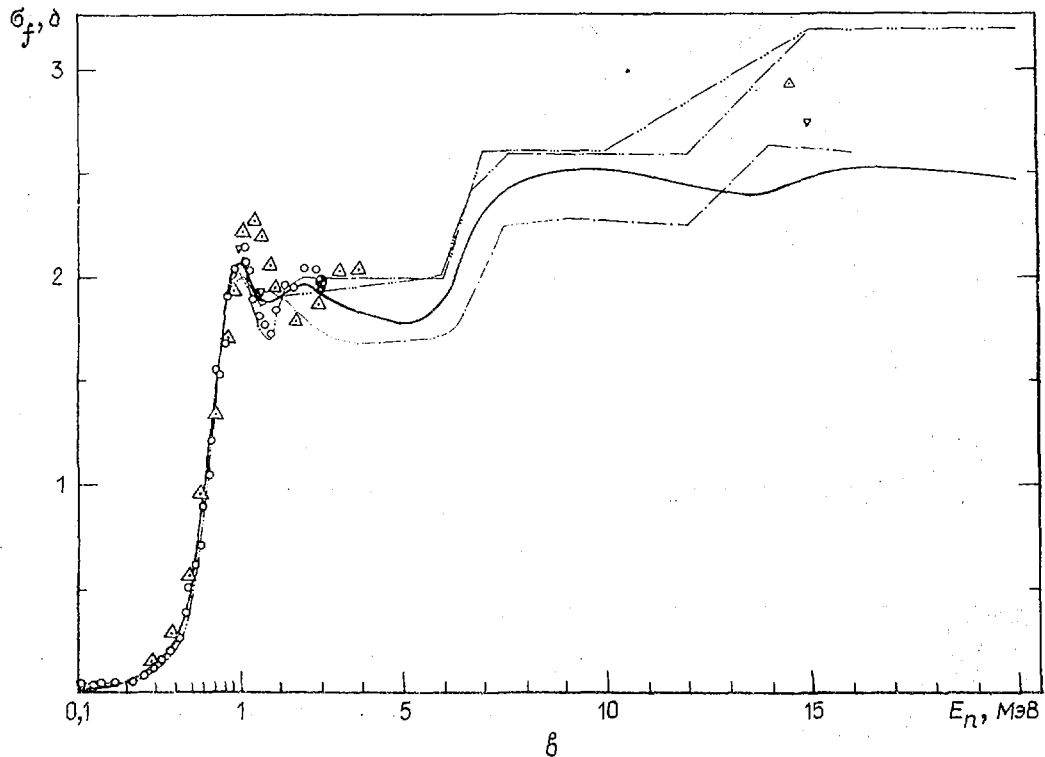
^{243}Cm (рис. 1, б). Усредненные по энергии данные [9] и результаты работы [6], приведенные в согласии с систематикой умножением соответственно на 0,95 и 1,07, удовлетворительно согласуются между собой. Данные работы [16] резко отличаются по форме энергетической зависимости от данных [6, 9] и по этой причине отвергнуты. Основанная на этих результатах оценка ENDF/B-V, вероятно, является ошибочной в диапазоне энергий нейтронов менее 8 МэВ.



Сечение деления ^{242}Cm (а), ^{243}Cm (б), ^{244}Cm (в), ^{245}Cm (г), ^{246}Cm (д), ^{247}Cm (е), ^{248}Cm (ж). Оценка: — — — — — настоящей работы; - - - - - INDI/A (Италия); — · — · — JENDL-II (Япония); ····· KEBAK (ФРГ, Израиль); ····· ENDF/B-V (США). Экспериментальные точки работ: ● — [2] (значение систематики); △ — [6]; □ — [7]; ▼ — [8]; ○ — [9]; ○ — [10]; △ — [8, 11]; ▽ — [12]; ▲ — [1]; + [13, 14]; ● — [15]

^{244}Cm (рис. 1, в). Оценка основана на нейтронных данных работ [10-12], имеющих коэффициенты нормировки на систематику [2] соответственно 1,02; 1,11 и 1,06. В области порога деления данные работы [11] сдвинуты по энергии на - 100 кэВ для лучшего согласия с работой [10] в области порога. Для энергии нейтронов 14,5 МэВ величина $\sigma_f = 3,1 \pm 0,3$ б [8] приведена к современным значениям периодов полураспада и стандарта. Тем не менее эта измененная величина $\sigma_f = 2,93 \pm 0,30$ б, как и в случае ^{242}Cm , представляется завышенной ($\sigma_c = 2,69$ б [4]).

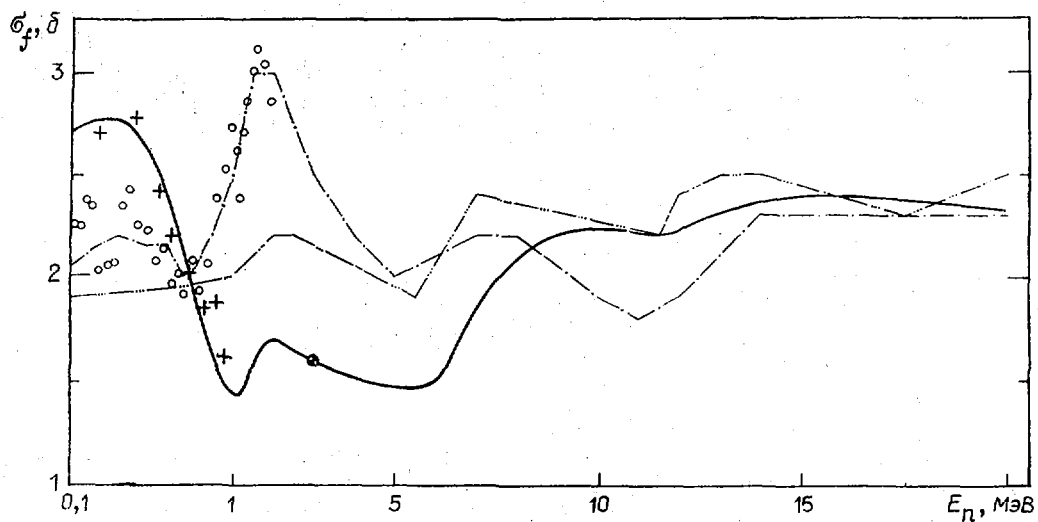
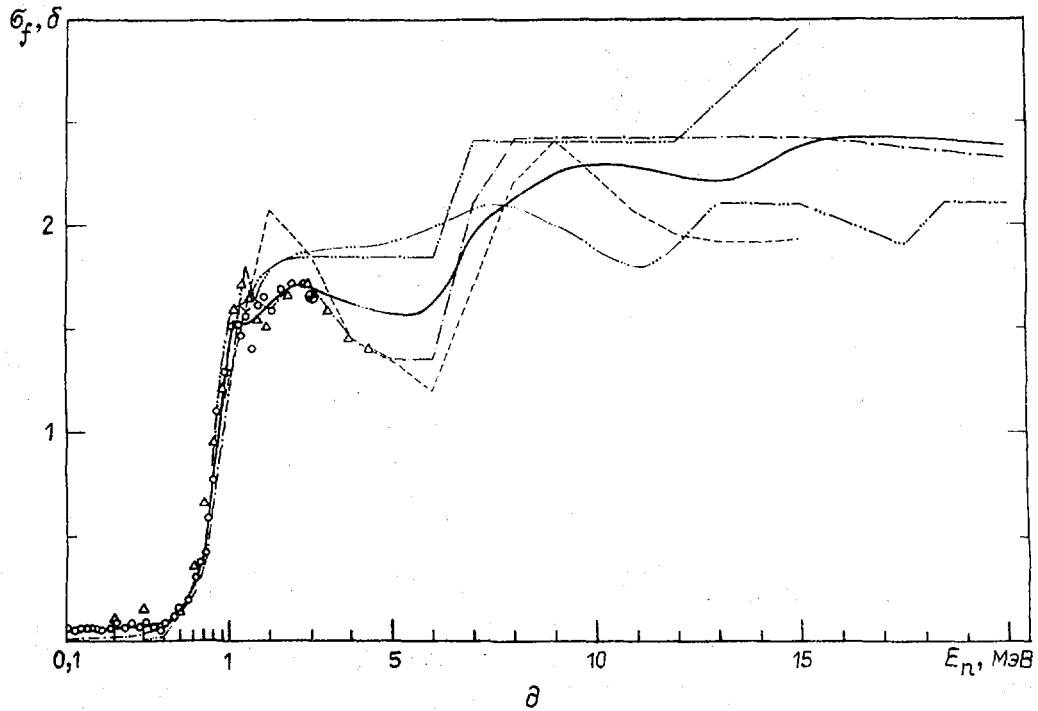
^{245}Cm (рис. 1, г). Данные работы [1] дают оценку сечения деления ^{245}Cm . Расчетная кривая не увеличит точности и надежности этих экспериментальных данных, измеренных с погрешностью 3-5%. К сожалению, мы не располагаем численными значениями работы [1], за исключением одной точки для энергии нейтронов 14 МэВ. На рис. 1, г приведены снятые с графика данные [1], а также экспериментальные результаты [10], которые усреднены по энергии и снижены на 10%. При этом результаты [1, 10] хорошо согласуются между собой и с систематикой [2] для энергий нейтронов 3 МэВ. Из рисунка очевидно, что все имеющиеся оценки сечения деления ^{245}Cm в области 0,1-20 МэВ должны быть отвергнуты.



Продолжение рисунка

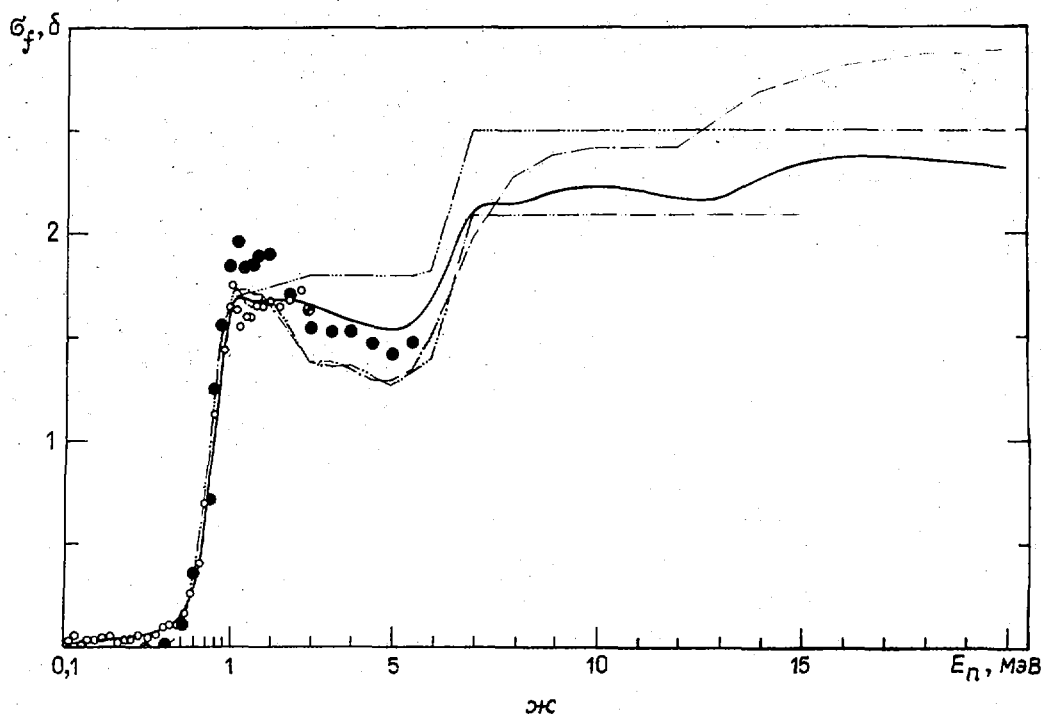
^{246}Cm (рис. 1, д). Данные работы [11] согласуются с систематикой [2] в области плато и использованы в оценке без перенормировки. По энергии они сдвинуты на - 100 кэВ, как и в случае ^{244}Cm . Результаты работы [10] усреднены по энергии и снижены на 7%, что улучшило их согласие с данными работы [11]. Настоящая оценка по сравнению с другими занимает промежуточное место во всем энергетическом диапазоне.

^{247}Cm (рис. 1, е). Результаты работы [10] отвергнуты ввиду расхождения примерно в 2 раза с систематикой [2] и противоречия с данными работ [13, 14] по энергетической зависимости величины $P_f(E)$. Настоящая оценка опирается на результаты работ [13, 14] для энергий менее 2 МэВ и на расчетные данные согласно систематике [2] для более высоких энергий. Наша оценка резко отличается от оценок JENDL-II и ENDF/B-V во всем диапазоне энергий нейтронов менее 10 МэВ.



е
Продолжение рисунка

^{248}Cm (рис. I, ж). Оценка основана на результатах работы [15] (коэффициент нормировки 1,12), а также данных [10], которые уменьшены на 4%. Возможно, такая перенормировка внесла небольшое искажение в энергетическую зависимость в интервале энергий нейтронов 1-2 МэВ.



ж
Окончание рисунка

В настоящей оценке реализован единый для всех рассмотренных изотопов и последовательный в физическом отношении алгоритм описания экспериментальных данных и прогнозирования их в тех областях энергий нейтронов, где эти данные отсутствуют. Несмотря на вынужденную значительную перенормировку противоречивых данных в области первого плато и упрощенности модели для описания сечения деления при высоких энергиях, по мнению авторов, такой подход позволяет достигнуть успехов в оценке сечений деления изотопов кюрия быстрыми нейтронами.

Погрешность рекомендованных кривых в области энергий менее 6 МэВ оценена примерно в 10-15% (20% для ^{242}Cm , ^{247}Cm). В диапазоне более 6 МэВ погрешность возрастает примерно в 1,5 раза.

Для дальнейшего изучения величины $\sigma_f(E_n)$ для изотопов кюрия потребуются новые более надежные измерения и успехи в теоретическом анализе экспериментальной информации.

Список литературы

1. White R.M., Browne J.C. In: Nucl. data for sci. and technol.: Proc. Intern. of conf. (Antwerp, 1983). 1983, p.218.
2. Куприянов В.М., Смиренин Г.Н., Фурсов Б.И. Ядерная физика, 1984, т.39, вып.2, с.281.
3. Куприянов В.М., Истеков К.К., Фурсов Б.И., Смиренин Г.Н. Там же, 1980, т.32, вып.2, с.355.
4. Lagrange Ch. Rep. NEANDC(E) 228 "I", 1982.
5. Knitter H.H., Budtz-Jurgensen C. In: [17], p.744.
6. Britt H.C., Wilhelmly J.V. Preprint LA-UR-79-614, 1979.
7. Воронников П.Е., Дмитриев С.В., Молчанов Ю.Д. и др. Ядерная физика, 1984, т.40, вып.5, с.1141.
8. Фомушкин Э.Ф., Гутникова Е.К., Замятин Ю.С. и др. Там же, 1967, т.5, вып.5, с.966.
9. Silbert M.C. Rep. LA-6239-MS, 1976.
10. Moore M.S., Keyworth G.A. Phys. Rev. C, 1971, v.3, N 4, p.1656.

11. Фомушкин Э.Ф., Новоселов Г.Ф., Виноградов Ю.И. и др. Ядерная физика, 1980, т.31, вып.1, с.39.
12. Koontz P.G., Barton D.R. Proc. conf. neutron cross-sections and technology. V.1. Washington: D.C., 1968, p.597.
13. Britt H.C., Gavron A., Goldstone P.D., Wilhelmy J.B. Phys.Rev. Letters, 1977, v.38, p.1457.
14. Back B.B., Hansen Ole, Britt H.C., Garrett J.D. Proc. Symp. of phys. and chem. of fission, V.1, Vienna; IAEA, 1974, p.25.
15. Фомушкин Э.Ф., Новоселов Г.Ф., Виноградов Ю.И. и др. Ядерная физика, 1982, т.36, вып.1, с.582.
16. Fullwood R.R., Dixon D.R., Loughed R.W. Rep. LA-4420, 1970, p.157.

Статья поступила в редакцию 17 марта 1986 г.

УДК 539.172.4

СОГЛАСОВАННАЯ ОЦЕНКА НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗОТОПОВ $^{242-244}\text{Cm}$

А. В. И г н а т ь к, В. М. М а с л о в

CONSISTENT EVALUATION OF NEUTRON CROSS-SECTIONS FOR CURIUM ISOTOPES $^{242-244}\text{Cm}$. The fission and (n,2n)-reaction cross-sections for curium isotopes are calculated within the framework of the statistical approach taking into account shell, superfluid and collective properties of fissile nuclei. The calculation results essentially differ from the other evaluations and point out the necessity of reexamination of data included in the international files for the neutron energy range above 1 MeV.

Нейтронные сечения изотопов кюрия необходимо знать для решения задач внешнего топливного цикла. Экспериментальная информация по сечениям весьма скудна и не удовлетворяет этих потребностей. В то же время имеющиеся оценки нейтронных сечений в библиотеках ENDF, JENDL и INDL значительно расходятся; эти расхождения особенно велики для сечений деления и реакции (n, 2n). Такая ситуация требует критического пересмотра всей совокупности оценок нейтронных сечений кюрия.

В области энергий до порога реакции (n, n'f) различия между оценками вызваны в первую очередь привязкой рассчитываемых сечений к различным экспериментальным данным по сечению деления нейтронами [1-7] или по делимости в реакциях с заряженными частицами [8]. Выше порога различия оценок обусловлены главным образом расхождениями определений вкладов эмиссионного деления. Детали теоретических моделей, лежащих в основе указанных оценок, свидетельствуют о необходимости анализа существующих экспериментальных данных на основе более строгого теоретического подхода, учитывающего всю совокупность современных представлений об оптико-статистических характеристиках тяжелых деформированных ядер. Существующие феноменологические систематики наблюдаемых делимостей актинидов [9] и опирающиеся на них полуэмпирические описания сечений множественного испускания нейтронов [10] могут лишь частично удовлетворить практические потребности оценки нейтронных данных. Обоснование заложенных в подобные систематики приближений также требует более последовательных и согласованных теоретических расчетов сечений.

Для расчетов нейтронных сечений был использован статистический подход, учитывающий предравновесное испускание нейтронов на начальных этапах образования составного ядра и сохранение углового момента на всех этапах распада составного ядра. Параметры модели предравновесного испарения нейтронов были получены на основе согласованного описания нейтронных спектров, сечений реакций (n, 2n) и (n, 3n), а также сечений деления нейтронами ^{238}U [11], для которого имеется наиболее полная экспериментальная информация по всем рассмотренным данным. Показано, что такой подход обеспечивает также хорошее описание нейтронных сечений близлежащего нечетного изотопа ^{235}U [11].

Плотность уровней в нейтронном и делительном каналах рассчитывалась с помощью феноменологической модели, согласованном образом учитывающей оболочечные, сверхтекучие и коллективные эффекты [12]. Параметры модели для нейтронного канала определены по систематике, полученной при совместном анализе плотности нейтронных резонансов и нарастающих сумм низколежащих уровней [13]. Показано, что для всех актинидов плотность низколежащих уровней может быть хорошо описана моделью постоянной температуры с единым для всех актинидов параметром $T=0,388$ МэВ и четно-нечетными различиями, определяемыми величиной корреляционной функции $\Delta_0 = 12/\sqrt{A}$ МэВ. Выбор параметров плотности уровней делительного канала подробно рассмотрен в работе [14], в которой на примере нейтронных реакций продемонстрирована необходимость учета при расчете коллективных эффектов, связанных с неаксиальной деформацией делящегося ядра на внутреннем барьере и зеркальной деформацией на внешнем барьере. При этом корреляционные функции делительного канала $\Delta_0 + 0,08$ оказываются систематически выше аналогичных величин в нейтронном канале, а необходимые для описания наблюдаемых сечений деления оболочечные поправки на внутреннем $\delta\epsilon_A = 2,5$ МэВ и внешнем $\delta\epsilon_B = 0,6$ МэВ горбах остаются практически неизменными для всей цепочки изотопов урана и плутония [14]. Такая оценка оболочечных поправок хорошо согласуется с феноменологической систематикой параметров двухгорбого барьера актинидов, и это позволяет использовать данные параметры также при расчетах сечений деления нейтронами изотопов кюрия.

Анализ нейтронных сечений в изотопах кюрия осложняется тем, что экспериментальные данные, полученные на нейтронах ядерных взрывов [2,4,5], плохо согласуются между собой как по абсолютной величине, так и по энергетической зависимости сечений. Они также плохо укладываются в имеющиеся систематики изотопической зависимости сечений деления на первом плато [15,16]. В этой ситуации в качестве опорных авторы использовали для первого плато оценки сечений деления кюрия нейтронами с энергией 3 МэВ, полученные в рамках согласованной систематики делимости актинидов в нейтронных реакциях и реакциях с заряженными частицами [9]. Такие опорные сечения позволяют фиксировать параметры делительного канала для всей цепочки изотопов кюрия, и дальнейшие расчеты энергетической зависимости сечений деления, а также сечений реакций ($n,2n$) уже не связаны с какими-либо вариациями параметров. Для расчетов сечений образования составного ядра и соответствующих ему коэффициентов прилипания нейтронов использовалась несферическая оптическая модель с параметрами потенциала, рекомендованными в работе [17].

Результаты теоретических расчетов сечений деления совместно с имеющимися экспериментальными данными [1-7] показаны на рис.1. Для сравнения приведены также результаты различных оценок. Из представленных данных можно видеть значительное расхождение оценок как по абсолютной величине, так и по описанию энергетической зависимости сечений деления. Существенные расхождения имеются и между экспериментальными данными (см.рис.1,в), что заставляет предпочесть оценки сечений деления, опирающиеся на систематику делимости ядер заряженными частицами [9]. Следует отметить, что, хотя авторы использовали такую систематику лишь при энергии нейтронов 3 МэВ, не возникает существенных расхождений между теоретическими расчетами и систематикой сечений деления [9] для области второго и третьего плато (см.рис.1, а-в). Это позволяет считать теоретические расчеты и феноменологическую систематику сечений деления ядер нейтронами [9] достаточно хорошо согласованными для всего диапазона энергий нейтронов более 3 МэВ.

На рис.2 представлены результаты настоящих расчетов и совокупность имеющихся оценок сечений реакции ($n,2n$). Для этой реакции нет экспериментальных данных и разногласия различных оценок являются прямым следствием заложенных в них моделей. Так как во всех оценках сумма сечений практически нормируется на сечение образования составного ядра, значительная часть расхождений в оценках сечений реакции ($n,2n$) непосредственно обусловлена расхождениями в оценках сечений деления, а в области энергий нейтронов выше 14 МэВ также расхождениями оценок сечений реакции ($n,3n$). Нефизический характер энергетической зависимости сечений реакции ($n,2n$) в оценках библиотек ENDF и ENDF очевиден. В то же время оценки работы [10], где использовалась модель, идеологически близкая к нашему подходу, имеют энергетическую зависимость сечений, подобную нашим расчетам, и различия в абсолютной величине сечений обусловлены погрешностью оценок делимости ядер и более грубым моделированием сечений образования составного ядра.

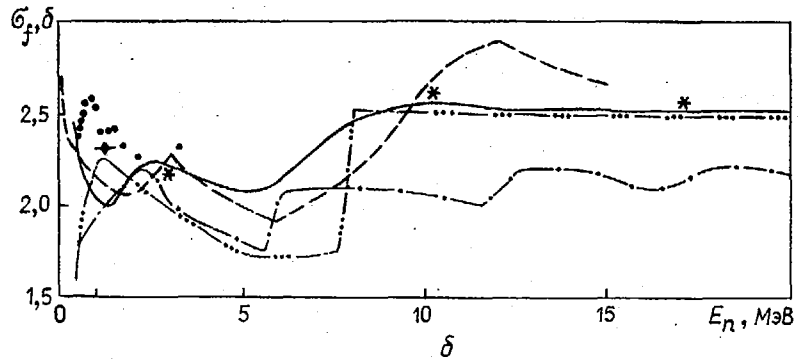
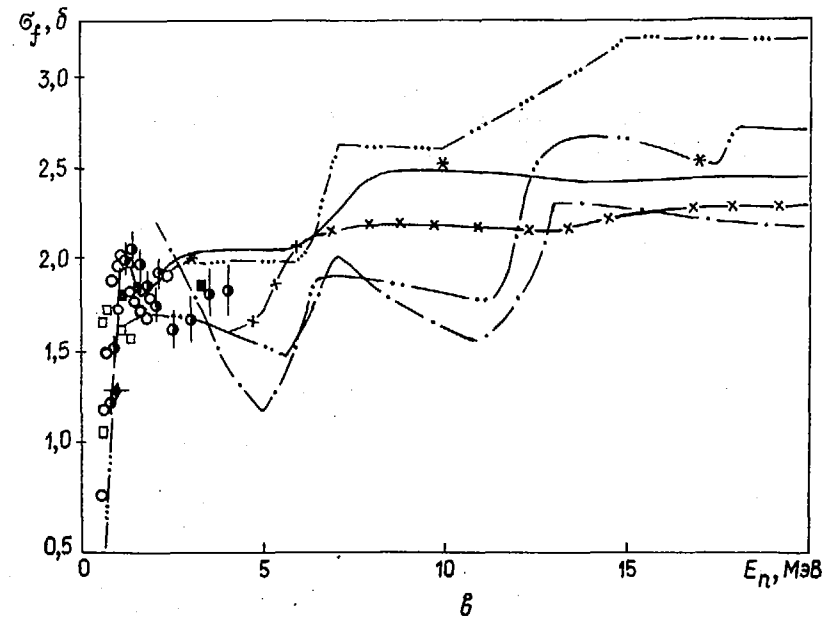
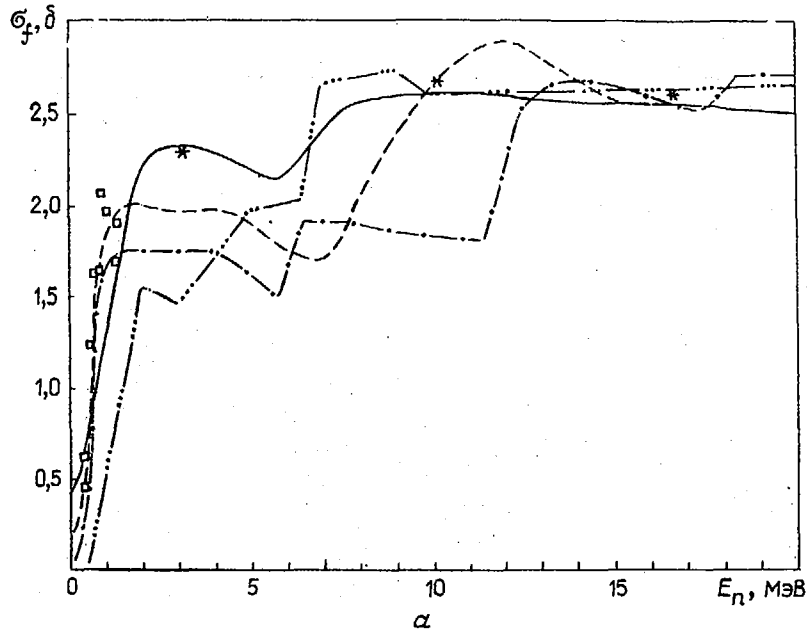
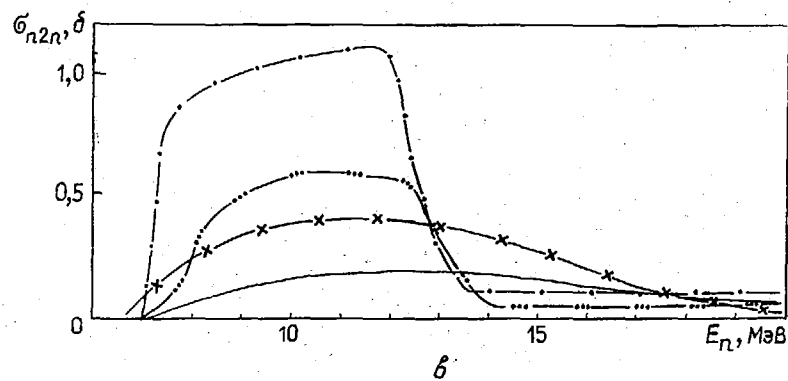
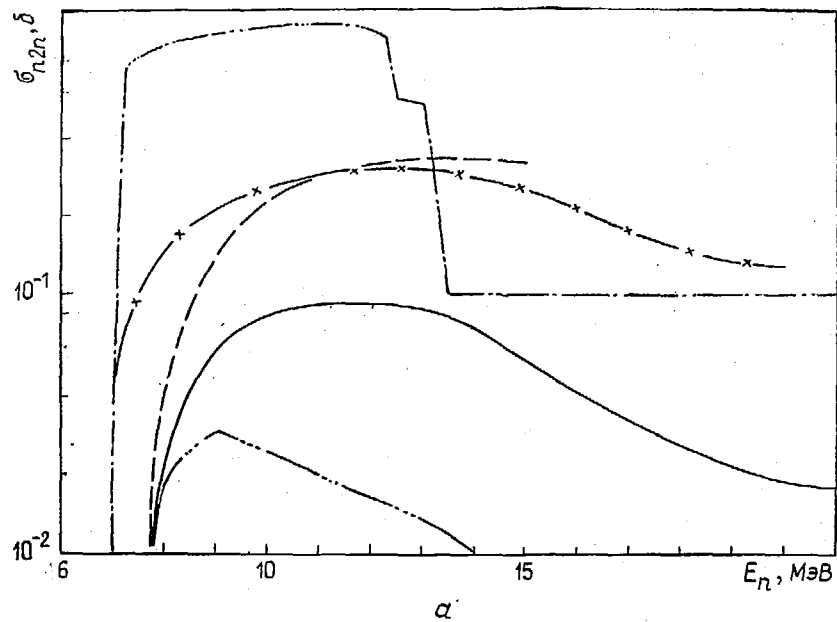


Рис. I. Сечения деления ^{242}Cm (а), ^{243}Cm (б) и ^{244}Cm (в).
 Оценки: — — — — — настоящей работы; — — — — — ENDF; — — — — — JENDL-II; — — — — — ENDF/B-V; — — — — — INDL/A (Bologna);
 — x — [10]. Экспериментальные данные: ■ — [1]; ○ — [2];
 ● — [3]; ● — [4]; ● — [5]; □ — [7]; * — феноменологическая систематика [9]



46

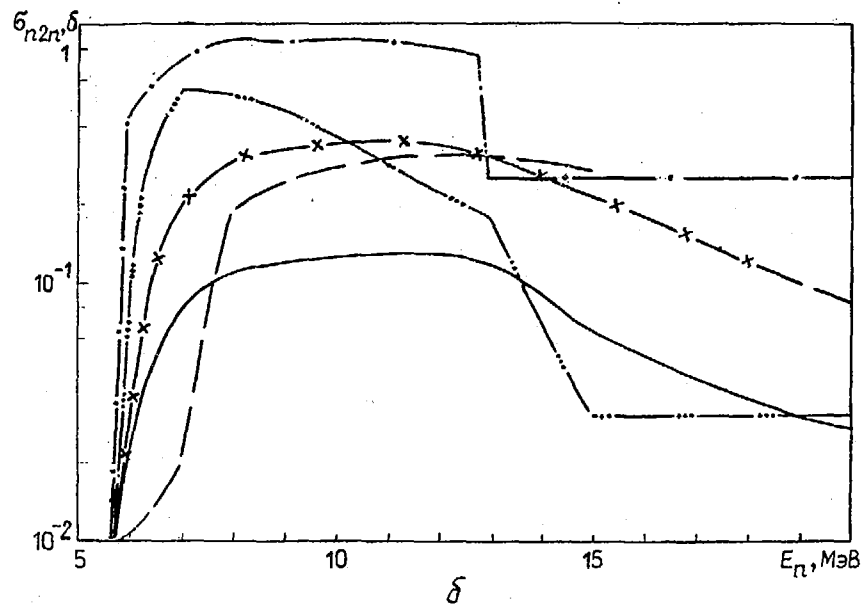


Рис.2. Сечения реакций: а - $^{242}\text{Sm}(n,2n)$; б - $^{243}\text{Sm}(n,2n)$; в - $^{244}\text{Sm}(n,2n)$. Оценки: — — настоящей работы; — — ENDL; — · — JENDL-II; — · — ENDF/B-V; — — INDL/A(Bologna); — x — [10]

Ввиду отмеченных расхождений оценок сечений реакции $(n,2n)$, целесообразно обсудить оценки этой реакции для изотопов урана и плутония. На рис.3 приведены имеющиеся оценки сечений реакции $(n,2n)$ в области их максимального значения, т.е. при энергии нейтронов 10–12 МэВ. Вместе с легкими изотопами кюрия приведены результаты наших расчетов сечений для ^{246}Cm и ^{248}Cm . Анализ изотопической зависимости сечений образования составного ядра [17] демонстрирует лишь сравнительно небольшие вариации таких сечений для рассматриваемых энергий налетающего нейтрона. Это позволяет сделать вывод, что изменения сечений реакции $(n,2n)$ в максимуме практически полностью определяются изменениями делимости ядер. Так как для всех изотопов урана, плутония и кюрия делимость монотонно падает при переходе к более тяжелым изотопам, в сечениях реакции $(n,2n)$ должна проявляться обратная зависимость – монотонное увеличение сечений. Этот результат, естественно, подтверждается имеющимися экспериментальными данными для изотопов ^{235}U и ^{238}U [11]. В последовательных теоретических расчетах монотонный изотопический рост сечений реакции $(n,2n)$ наблюдается для всех актинидов (см.рис.3), но в оценках ENDF/B-V и JENDL-II такая тенденция оказывается нарушенной, что указывает на несогласованность оценок для различных изотопов.

Аналогичные закономерности изотопических изменений проявляются также и в сечениях реакции $(n,3n)$. Однако в настоящей работе их обсуждать нецелесообразно, так как для рассматриваемых изотопов кюрия сечение реакции $(n,3n)$ оказывается очень малым (не превышает 20 мб для ^{244}Cm).

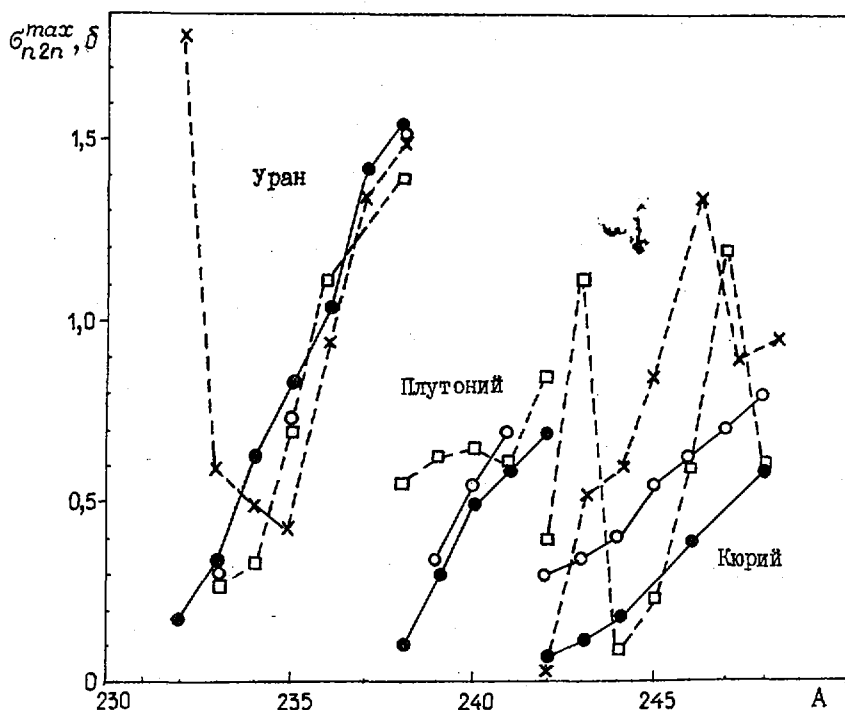


Рис.3. Изотопическая зависимость сечения $\sigma_{n,2n}$ в максимуме по данным:
 ● – настоящей работы; × – ENDF/B-V; □ – JENDL-II; ○ – [10]

Результаты проведенных для изотопов кюрия теоретических расчетов сечений основных нейтронных реакций совместно с результатами феноменологической систематики сечений деления [9], опирающейся на анализ делимости трансактинидов в реакциях с заряженными частицами, указывают на неудовлетворительный характер большей части оценок, вошедших в файлы INDL/A. Ни для одного изотопа имеющиеся оценки нельзя рекомендовать потребителям нейтронных данных. Необходимо провести значительную работу по пересмотру оценок сечений в области энергий нейтронов выше 1 МэВ. По-видимому, только при привлечении последовательных теоретических моделей, согласованных со всей совокупностью представлений о механизмах нейтронных реакций и со статистическим описанием свойств кон-

курирующих каналов распада делящихся ядер, можно обеспечить требуемую надежность таких оценок. Мы надеемся, что результаты настоящей работы дают необходимую основу для практической переоценки файлов нейтронных сечений 242-244См.

Список литературы

1. Koontz P., Barton D. In: Neutron Cross-Sections and Technology, 1968, v.1, p.597.
2. Moore M.S., Keyworth G.A. Phys. Rev., 1971, v.C3, p.1656.
3. Фомушкин Э.Ф. и др. Ядерная физика, 1973, т.17, с.24.
4. Silbert M.G. Rep. LA-6239, 1976.
5. Фомушкин Э.Ф. и др. Ядерная физика, 1980, т.31, с.39.
6. White R.M., Browne J.C. In: Nuclear Data for Science and Technology. Ed. K.N. Bockhoff. Reidel Publ. Conf., 1982, p.218.
7. Воротников П.Г. и др. Ядерная физика, 1984, т.40, с.1141; Атомная энергия, 1984, т.57, с.61.
8. Britt H.C., Wilhelm J.V. Nucl. Sci. and Engng, 1979, v.72, p.222.
9. Куприянов В.М., Фурсов Б.И., Смиренкин Г.Н. Ядерная физика, 1984, т.39, с.281.
10. Бычков В.М., Пляскин В.И. Ядерная физика, 1981, т.34, с.684.
11. Грудзевич О.Т., Игнатюк А.В., Маслов В.М., Пащенко А.Б. - В кн.: Нейтронная физика: Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 2-6 октября 1983 г. Т.2. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984, с.318.
12. Игнатюк А.В., Истеков К.К., Смиренкин Г.Н. Ядерная физика, 1975, т.29, с.875.
13. Андипов Г.В., Коньшин В.А., Маслов В.М. Proc. of Consultants meeting on uranium and plutonium isotope resonance parameters: INDC-129/GJ. Vienna, 1981, p.329.
14. Игнатюк А.В., Клепацкий А.Б., Маслов В.М., Суховицкий Е.Ш. Ядерная физика, 1985, т.42, с.569.
15. Behrens J.W., Howerton R.J. Nucl. Sci. and Engng, 1978, v.65, p.464.
16. Смиренкин Г.Н., Фурсов Б.И. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1985, вып.2, с.31.
17. Lagrange Ch. Rep. INDC(FR)-56/L, 1982.

Статья поступила в редакцию 17 марта 1986 г.

УДК 539.170

ИЗМЕРЕНИЕ И КОМПИЛЯЦИЯ НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ

Т. С т а р и ч к а и, К. С а й л е р

THE MEASUREMENT AND COMPILATION OF NEUTRON CROSS-SECTIONS.
The Institute of Experimental Physics of L.Koshut's University takes part in the work of the CMEA countries on the measurements and evaluations of nuclear data. The main results of this work during 1981-1985 years are described.

Институт экспериментальной физики (ИЭФ) университета им. Л.Кощута (ВНР) уже много лет принимает участие в работах, проведенных в рамках координационного плана стран - членов СЭВ по измерению и оценке ядерных данных для реакторов на быстрых нейтронах. Большинство этих работ выполнено в сотрудничестве с Физико-энергетическим институтом (ФЭИ) в г.Обнинске.

Наиболее важные работы проведены ИЭФ в 1981-1985 гг.: измерение функций возбуждения нейтронных реакций активационным методом, определение этим методом сечений при энергии нейтронов

14 МэВ, изучение дифференциальных сечений реакции $^{56}\text{Fe}(n, n') \gamma$ -корреляционным методом при 14 МэВ, измерение сечений реакции (n, t) , определение дифференциальных угловых распределений осколков деления, компиляция экспериментальных данных по сечениям нейтронных реакций.

Работы, выполненные в 1981-1985 гг.:

1. В сотрудничестве с ФЭИ проведены эксперименты по измерению функции возбуждения реакций $(n, 2n)$ на делящихся ядрах-мишенях ^{238}U , ^{232}Th и ^{237}Np от порога до энергии нейтронов около 11 МэВ. Использовался активационный метод. Большое внимание уделялось определению потока нейтронов путем измерения активностей фольг разными способами. Достигнута сравнительно высокая точность измеренных значений сечений [1-5].

Для уточнения функций возбуждения нейтронных реакций на некоторых конструкционных материалах, а также нейтронных реакций, используемых для определения потока нейтронов, измерены сечения реакций $^{58}\text{Ni}(n, p)$, ^{58}Co и $^{93}\text{Nb}(n, 2n)$, ^{92m}Nb при энергиях нейтронов 8,92; 9,39; 9,90 МэВ и реакции $^{197}\text{Au}(n, 2n)$, ^{196}Au при энергиях 7,07; 7,45; 7,88; 8,92; 9,39; 9,90 МэВ. Характерная погрешность измеренных сечений составляла $\pm 5\%$ [6, 7]. Эта работа проводилась также в сотрудничестве с ФЭИ.

В интервале энергий бомбардирующих нейтронов 5-7,5 МэВ измерены сечения реакций $^{115}\text{In}(n, \gamma)$, $^{115}\text{In}(n, n')$ и $^{113}\text{In}(n, n')$ активационным методом [8]. При обработке данных особое внимание уделено фону от рассеянных нейтронов.

Проведены совместные с ФЭИ измерения функции возбуждения реакции $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ в интервале энергий нейтронов 7-9,5 МэВ с большим разрешением (50-70 кэВ) по энергии. Цель работы - подтверждение и уточнение "тонкой структуры" функции возбуждения вблизи порога реакции. В настоящее время ведется обработка данных.

2. Измерены активационным методом сечения некоторых нейтронных реакций на ядрах-мишенях цинка, палладия и кадмия при энергии нейтронов 14 МэВ. Исследована зависимость сечений реакций $^{90}\text{Zr}(n, 2n)$ и $^{93}\text{Nb}(n, 2n)$, ^{92m}Nb в интервале энергий нейтронов 13,2-15,5 МэВ, а также реакций $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$, $^{27}\text{Al}(n, p)$, $^{28}\text{Si}(n, p)$, $^{46}\text{Ti}(n, 2n)$, $^{58}\text{Ni}(n, 2n)$, $^{65}\text{Cu}(n, 2n)$, $^{181}\text{Ta}(n, 2n)$, $^{197}\text{Au}(n, 2n)$. На основе некоторых из этих реакций можно определить энергии нейтронов в этом диапазоне и отношение потоков атомных и молекулярных ионов дейтерия в пучке нейтронных генераторов [9, 10].

3. В сотрудничестве с ФЭИ было измерено дифференциальное по энергии сечение неупругорассеянных нейтронов на ядре-мишени ^{56}Fe при энергии 14 МэВ. Применен метод времени пролета. Неупругое рассеяние идентифицировалось с помощью измерения числа совпадений нейтронов и γ -квантов, соответствующих переходу остаточного ядра от первого возбужденного состояния к основному [11, 12]. Наносекундный импульсный генератор построен в ИЭФ для измерения мгновенных γ -квантов, вызываемых нейтронами с энергией 14 МэВ на конструкционных материалах [13]. На том же ускорителе изучено поглощение быстрых нейтронов в больших образцах конструкционных материалов [14].

4. Разрабатываемая в ИЭФ методика измерения сечений реакций (n, t) , основанная на измерении β -активности накопленного в упакованном образце трития после его вывода путем нагрева образца, применялась к измерению сечения реакции $^{10}\text{B}(n, t)$. Этот процесс является самым существенным и ответственным за накопление трития в тепловых реакторах. Имеются предварительные результаты измерений при энергиях нейтронов 5,8 и 7,5 МэВ. Ведется совместная с ФЭИ работа по улучшению надежности упаковки образца и точности измерений. Выполнены измерения и расчеты методом Хайзера - Фешбаха, а также компиляция сечений реакции $^9\text{Be}(n, t)$ при 14 МэВ [15]. Функции возбуждения реакций $^{27}\text{Al}[(n, t) + (n, tn)]$ были определены в результате экспериментов на циклотроне в Юлихе (ФРГ); фольги из алюминия облучались нейтронами реакции $\text{Be}(d, n)$ при энергии дейтронов 17,5-30 МэВ [16].

5. Измерены угловые распределения осколков, возникающих при делении ядер ^{235}U и ^{236}U под действием нейтронов с энергией 5-6 МэВ, а также при фотоделении ядра ^{234}U в случае максимальной энергии фотонов 6,4 МэВ. Использовались твердотельные детекторы для регистрации осколков и разработанный в ИЭФ многоэлектродный искровой счетчик для обседа трэков. Обработка полученных данных производилась с помощью ЭВМ. Работа проведена в сотрудничестве с ФЭИ.

6. На основе измерений и литературных данных предложена функция возбуждения для реакции $^{238}\text{U}(n, 2n)$, ^{237}U в интервале энергий 6,5-19 МэВ [17]. Подготовлена компиляция экспериментальных данных по сечениям реакции (n, t) , на основе которой выполнены эмпирические оценки функций возбуждения процессов (n, t) [18, 19]. В рамках экситонно-каскадной модели получено удовлетворитель-

ное описание как функций возбуждения реакций $(n,2n)$ и (n,p) на ядрах ^{181}Ta и ^{56}Fe , так и энергетического распределения вылетающих в этих реакциях частиц.

Работы, запланированные на 1986-1990 гг.:

Планируется проведение работ, относящихся к тому же кругу вопросов, которые рассматривались ранее. В то же время намечается расширение экспериментальной базы и используемых экспериментальных методов, а именно:

- намечено создание экспериментальной установки для измерения функций возбуждения нейтронных реакций на основе активационного метода на лучке циклотрона АТОМКИ АН ВНР. Запланирована совместная с ФЭИ разработка газовой мишени и мониторинга энергии нейтронов на основе метода времени пролета;
- продолжают измерения сечений реакций быстрых нейтронов при 14 МэВ, причем особое внимание уделяется уточнению данных, существенных для реакторов на быстрых нейтронах;
- совместно с ФЭИ планируется проведение измерений спектра нейтронов методом времени пролета;
- продолжается измерение сечения реакции $^{10}\text{B}(n,t)$ при энергиях ниже 6 МэВ с усовершенствованной применяемой экспериментальной техники;
- совместно с ФЭИ намечено продолжить измерения угловых распределений осколков деления. Разрабатывается система контроля искрового счетчика на основе микро-ЭВМ для автоматизации обсчета треков и непосредственной обработки измеренных данных;
- для выяснения вопросов, связанных с протеканием нейтронных реакций и формированием кластеров, намечено проведение расчетов для некоторых реакций с помощью экситонно-каскадной модели.

Список литературы

1. Raics P., Daróczy S., Csikai J. e.a. Phys.Rev., 1985, v.C32, p.87.
2. Райч П., Дарочи Ш., Чикай Й. и др. В кн.: Нейтронная физика: Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 2-6 октября 1983 г. Т.2. М.: ЦНИИатоминформ, 1984, с.168.
3. Корнилов Н.В., Бабыра В.Я., Балицкий А.К. и др. Атомная энергия, 1985, т.58, вып.2, с.117.
4. Корнилов Н.В., Журавлев Б.В., Сальников О.А. и др. Там же, 1980, т.49, с.283.
5. Kornilov N.V., Baryba V.Ya., Balitskiy A.K. e.a. Nucl. data, 1984: Proc. 3rd Advisory group meeting (Uppsala, 21-25 May 1984). Vienna: IAEA, 1985, p.305.
6. Дарочи Ш., Райч П., Папш З. и др. См. [2], с.191.
7. Корнилов Н.В., Бабыра В.Я., Балицкий А.К. и др. Атомная энергия, 1985, т.58, с.128.
8. Корнилов Н.В., Сальников О.А., Бабыра В.Я. и др. См. [2].
9. Csikai J. In: Nucl. data for sci. and technol.: Proc. of the Intern. conf. (Antwerp, 1982). Holland, 1983, p.414.
10. Csikai J., Chimoye T., Vilaihong T. e.a. Nucl. Instrum. and Methods, 1985, v.A239, p.641.
11. Devkin B.V., Lychagin A.A., Nesterenko V.S. e.a. Rep. ZfK-476, 1982, p.71: INDC/GDR/-21-6.
12. Лычагин А.А., Девкин Б.В., Журавлев Б.В. Препринт ФЭИ-1722. Обнинск, 1985.
13. Sztaricskai T., Vasváry L., Petó G., Devkin B.V. АТОМКИ Közl, v.27, p.105.
14. Vasváry L., Divós F., Petó G. Acta Phys. (Hungarica), 1985, v.58, p.57.
15. Bódy Z.T., Cserpák F., Csikai J. In: Nucl. data for sci. and technol.: Proc. of the Intern. conf. Geel, 1983.
16. Wolfe R., Sudár S., Qaim S.M. Nucl. Sci. and Engng, 1985, v.91, p.162.
17. Kornilov N.V., Vinogradov V.N., Gay E.V. e.a. См. [9]; Yadernie Konstanty, 1982, v.1, p.33.
18. Bódy Z.T., Mihály K. INDC-22/L. Vienna: IAEA, 1985.
19. Bódy Z.T., Ignatyuk A.V., Mihály K., Paschenko A.B. Intern. conf. on nucl. data for basic and applied sci. (USA, Santa Fe, 1985). JC38, 1985, p.105.

Статья поступила в редакцию 29 августа 1986 г.

RE-EVALUATION OF THE IRON NEUTRON CROSS-SECTIONS. Methods are considered which have been used in evaluation of the neutron cross-sections of the iron and its isotopes. The results of the intercomparison of this evaluation (CJD-II) with those performed earlier (CJD-I, ENDF/B-IV, JENDL-II) are given. The necessity of performing of new experiments, which could improve the quality of the evaluated cross-sections, is discussed.

Несмотря на обилие файлов оцененных нейтронных сечений железа и его изотопов, существует необходимость продолжения работ по оценке сечений этого важнейшего конструкционного материала. В первую очередь это связано с появлением результатов новых измерений, заметно расширивших область разрешенных резонансов [1] и измерений площади захвата под отдельными резонансами [2-5]. Необходимость в переоценке обусловлена также тем, что ни одна из доступных оценок не обладает хорошим качеством данных для расчета систем с разными спектрами (как, например, для расчета реакторов на быстрых нейтронах и термоядерных реакторов).

Оценка сечений в резонансной области энергий. Основные проблемы, возникающие при оценке сечений в области разрешенных и неразрешенных резонансов, и методы их решения в данной оценке могут быть сформулированы следующим образом:

1. Структура в полном сечении, определяющая их самоблокировку и полученная в экспериментах с высоким разрешением, должна быть сохранена в файле оцененных данных. Это требование связано с тем, что верхняя граница области разрешенных резонансов s -волны для изотопа ^{56}Fe ($E_{\text{Tmax}} = 850$ кэВ) и ^{54}Fe ($E_{\text{Tmax}} = 500$ кэВ) бралась заметно выше, чем для p - и d -волн (350 и 200 кэВ соответственно для ^{56}Fe и ^{54}Fe). Так как формат ENDF-V формально не позволяет вводить для одного изотопа разные границы областей разрешенных резонансов с разными спиновыми характеристиками, то авторы использовали так называемый метод псевдоизотопов, когда резонансные области для разных орбитальных волн считаются принадлежащими разным псевдоизотопам с изотопическим содержанием, равным единице. Такое представление не потребовало какого-либо изменения обрабатывающих программ.

2. Описание сечений в достаточно протяженной области разрешенных резонансов (850 кэВ для s -нейтронов в ^{56}Fe) проводилось с единым радиусом потенциального рассеяния и без использования каких-либо фоновых сечений, за исключением случаев, когда их присутствие обусловлено требованием представления данных в формате ENDF-V (как, например, вклад сечения неупругого рассеяния в полное сечение ^{57}Fe , имеющего низкий порог неупругого рассеяния). Оказалось, что этого можно достигнуть введением некоторого числа удаленных резонансов и использованием формализма Рейха - Мура для восстановления сечений из резонансных параметров. Чтобы проиллюстрировать это, на рис. 1 показано полное сечение ^{56}Fe , полученное из резонансных параметров данной оценки в рамках формализма Рейха - Мура и многоуровневой формулы Брейта - Вигнера. Как видно, наблюдаются заметные различия даже в сечении, усредненном по достаточно широким группам. Различия в форме отдельных резонансов и минимумах сечения являются еще большими. Как правило, формализм Рейха - Мура позволяет описать детальный ход полного сечения в хорошем приближении. Кроме того, сами резонансные параметры для ядер конструкционных материалов получаются из данных по пропусканию в основном с использованием формализма Рейха - Мура.

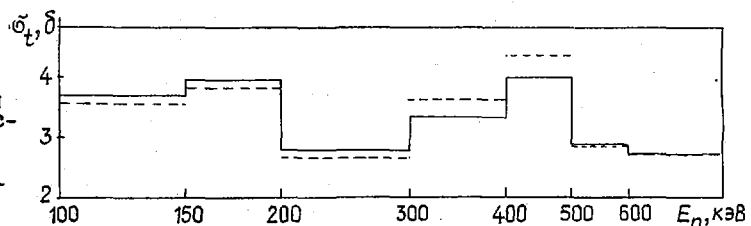


Рис. 1. Полное сечение ^{56}Fe в групповом представлении, вычисленное из резонансных параметров данной оценки в рамках формализма Рейха - Мура (сплошная линия) и многоуровневой формулы Брейта - Вигнера (пунктирная)

3. Средние резонансные параметры для расчетов сечений в области неразрешенных резонансов оценивались первоначально усреднением параметров в области разрешенных резонансов, а затем корректировались программой EVGAR [6] с учетом возможных различий плотности уровней по четности. Вклад f -волны в сечение захвата, являющийся заметным в области неразрешенных резонансов отдельных изотопов $^{56,58}\text{Fe}$, эффективно учитывался путем некоторого завышения средних ширины радиационного захвата для d -волны. Величина этого вклада выбиралась таким образом, чтобы описать имеющиеся экспериментальные данные по средним сечениям в этой области.

4. Сечения для природного железа в резонансной области энергий получаются согласованным образом посредством суммирования вкладов от отдельных изотопов без введения каких-либо дополнительных фоновых компонентов сечения.

Более подробно выбор параметров для отдельных изотопов, а также процедура оценки средних резонансных параметров описаны в работе [7].

Сравнение результатов различных оценок сечений в резонансной области. Сравнение полных сечений и сечений захвата нейтронов в резонансной области энергий для природной смеси изотопов железа, взятых из разных оценок, приводится на рис.2. Для удобства сравнения сечения были усреднены по 74-м энергетическим группам. Полные сечения, за исключением области 1-6 кэВ и в некоторых группах выше 100 кэВ, согласовались между собой с точностью 5-10%. При этом подложка в полном сечении составляла 10-30% величины всего сечения в области энергий до 100 кэВ для оценки JENDL-II, мала для оценки из библиотеки ENDF/B-IV и отсутствует в оценке настоящей работы. Верхняя граница резонансной области, представленная в этих файлах, заметно различается. Она равна 60 кэВ для файла из библиотеки ENDF/B-IV, 250 кэВ для файла JENDL-II и 850 кэВ для файла настоящей оценки.

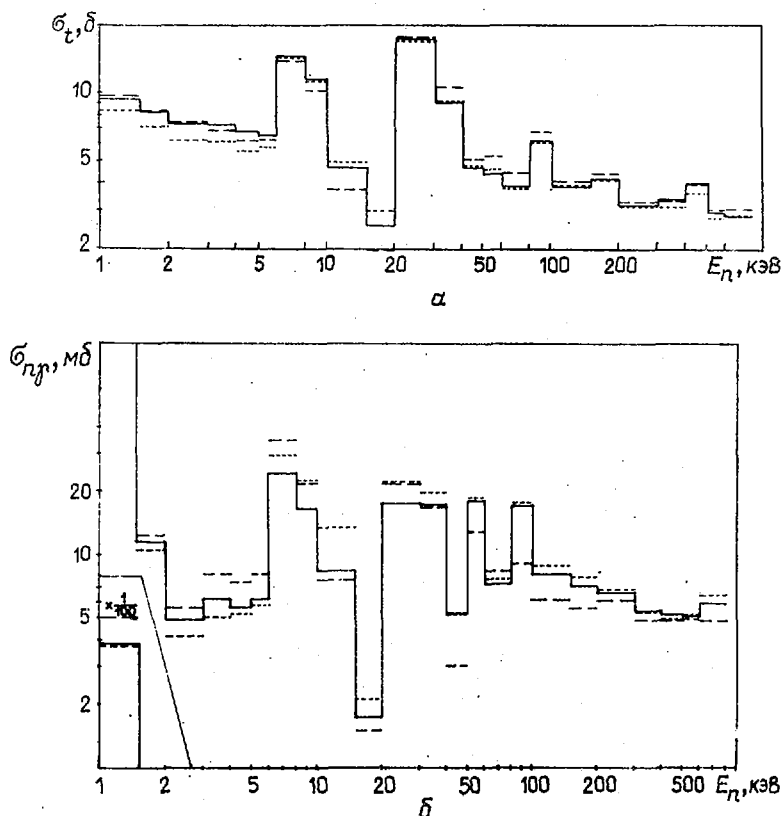


Рис.2. Сравнение результатов различных оценок полного сечения (а) и сечения захвата (б) на природном железе: сплошная кривая - оценка авторов настоящей работы; короткие штрихи - данные JENDL-II, длинные - ENDF/B-IV

Расхождения в величинах полных сечений для некоторых групп с энергией выше 100 кэВ вызваны тем, что в библиотеке JENDL-II для восстановления сечений использовалась многоуровневая формула Брейта - Вигнера с добавлением гладкой подложки, выбор которой основан на имеющихся экспериментальных данных по полному сечению природной смеси изотопов железа. В настоящей оценке полное сечение этой смеси получено согласованным образом на основе оцененных сечений отдельных изотопов; при этом для двух основных изотопов (^{54}Fe , ^{56}Fe) при поточечном восстановлении сечений использовался формализм Рейха - Мура, преимущества которого для этих ядер обсуждались выше.

Оцененные полные сечения железа из библиотеки ENDF/B-IV основываются на экспериментальных данных, полученных до 1972 г.

Наиболее заметные расхождения в сечении захвата между настоящей оценкой и оценкой JENDL-II наблюдаются в области энергий 6 - 40 кэВ, где оценка JENDL-II лежит систематически выше на 20-60%. Причина этого расхождения может быть понята из анализа параметров резонансов, вносящих наибольший вклад в сечение захвата в этой области. Как видно из таблицы, радиационным ширинам резонансов ^{54}Fe в оценке JENDL-II приписана одна и та же средняя ширина 2,5 эВ, а радиационная ширина s-резонанса ^{56}Fe , расположенного при энергии 27,74 кэВ, на 30% превышает ту же величину из настоящей оценки, основывающуюся на результатах последних измерений [2,5]. Сечение захвата в оценке библиотеки ENDF/B-IV для энергий выше 60 кэВ определяется экспериментами с невысоким разрешением, проведенными до 1970 г.

Параметры резонансов, определяющих сечение захвата железа в области 6-30 кэВ для настоящей оценки в сравнении с данными из библиотеки JENDL-II (в скобках)

E_r , кэВ	Изотоп	l	I	Γ_n , эВ	Γ_r , эВ	$ag \frac{\Gamma_n \Gamma_r}{\Gamma_t}$, эВ
7,8	^{54}Fe	0	0,5	1160 (1040)	1,74 (2,5)	0,1008 (0,1447)
11,18	^{54}Fe	1	1,5 (0,5)	3,85 (7,7)	0,4 (2,5)	0,042 (0,110)
14,46	^{54}Fe	1	0,5	1,4 (1,4)	1,12 (2,5)	0,036 (0,055)
22,82	^{56}Fe	1	0,5	0,251 (0,27)	0,54 (0,54)	0,1576 (0,1656)
27,74	^{56}Fe	0	0,5	1474 (1420)	1,06 (1,40)	0,9745 (1,287)

Примечание: E_r - энергия резонанса; Γ_n и Γ_r - нейтронная и радиационная ширины резонанса; $ag(\Gamma_n \Gamma_r / \Gamma_t)$ - захватная площадь с учетом изотопного содержания; I - спин ядра, l - орбитальный момент.

Оценка сечений в быстрой области энергии нейтронов. Основное внимание при оценке сечений нейтронов с энергией выше 850 кэВ было уделено согласованному описанию полного упругого сечения и функций возбуждения уровней при неупругом рассеянии без введения каких-либо дополнительных, физически необоснованных перенормировок. Такой подход предъявляет повышенные требования к выбору параметров, и в первую очередь параметров оптического потенциала, удовлетворяющих одновременному описанию полного сечения, сечения неупругих процессов и сечения упругого рассеяния. Подбор параметров осуществлялся с помощью программы AVAREX, реализующей оптико-статистический подход к расчету сечений. Найденные параметры позволили описать имеющиеся экспериментальные данные о полном сечении и сечении неупругих процессов в интервале 2-20 МэВ с точностью 2-3% (рис.3). В областях, где оцененные сечения имеют резонансную структуру, результаты представлены как средние по энергетическим группам (гистограмма). Экспериментальные данные для сечения неупругих процессов взяты из работ, вошедших в библиотеку EXFOR.

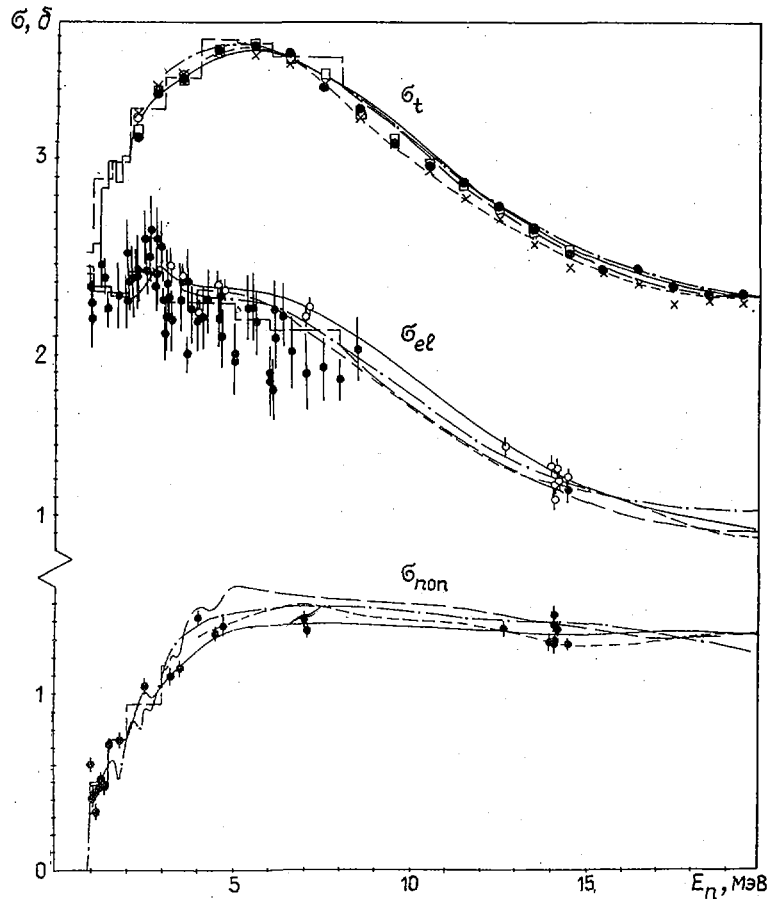


Рис.3. Сравнение результатов различных оценок с имеющимися экспериментальными данными для полного упругого сечения и сечения неупругих процессов взаимодействия нейтронов с природным железом: сплошная кривая - оценка авторов настоящей работы; короткие штрихи - данные JENDL-II, длинные - ENDF/B-IV; штрихпунктирная кривая - ЦЯД-I. Экспериментальные данные для полного сечения, полученные с высоким разрешением и усредненные по энергетическим группам шириной 0,5 или 1 МэВ: \circ - [8]; \bullet - [9]; \times - [10]; \square - [11]

Что касается описания сечения упругого рассеяния, то необходимо отметить следующее. На рис.3 светлыми и темными кружками показаны соответственно сечения упругого рассеяния, полученные как разность между полным сечением, известным с точностью 2-4%, и сечением неупругих процессов, измеренных с высокой точностью (светлые кружки) и интегрированием углового распределения упругого рассеяния (темные кружки). В последнем случае точность определения сечения упругого рассеяния, по-видимому, не превышает 10%, что обусловлено относительно низкой точностью, с которой известно сечение под малыми углами, вносящее основной вклад в интегральное сечение. Как видно из рисунка, сечение рассеяния, определенное интегрированием угловых распределений, лежит в среднем на 10% ниже, чем то же сечение, полученное вычитанием. Необходимо отметить, что эксперименты по определению сечений неупругих процессов были выполнены в середине 50-х годов и с тех пор не повторялись. Тем не менее они вместе с полными сечениями использовались как опорные в настоящей оценке.

На рис.3 для сравнения приводятся также результаты других оценок. Наибольшее расхождение наблюдается для сечений неупругих процессов в области энергий 3-14 МэВ, что объясняется различием в сечении поглощения, предсказываемого оптической моделью с различными параметрами, использованными в разных оценках.

Результаты оценки функций возбуждения отдельных уровней и их групп, а также соответствующих им угловых распределений при начальной энергии нейтронов 5 МэВ показаны на рис. 4 и 5 в сравнении с последними экспериментальными данными и результатами других оценок. В основу настоящей оценки положены сечения, полученные в оптико-статистическом подходе с учетом прямых процессов методом сильной связи каналов. Функция возбуждения уровня 0,847 МэВ в области энергий от порога до 3,3 МэВ, содержащая заметные флуктуации сечения, была оценена на основе известных экспериментальных данных [14,15]. Необходимо отметить, что экспериментальные данные о неупругом рассеянии весьма ограничены и часто противоречивы. Поэтому при их оценке заметно возрастает роль последовательных модельных подходов, опирающихся на согласованное описание широкого круга реакций.

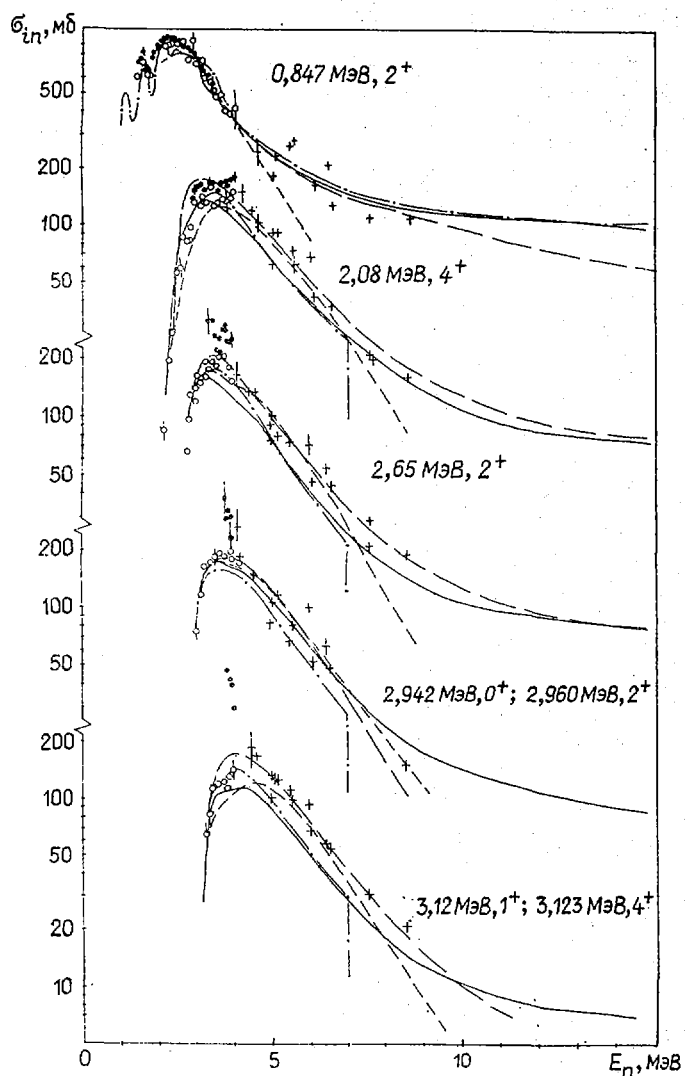


Рис. 4

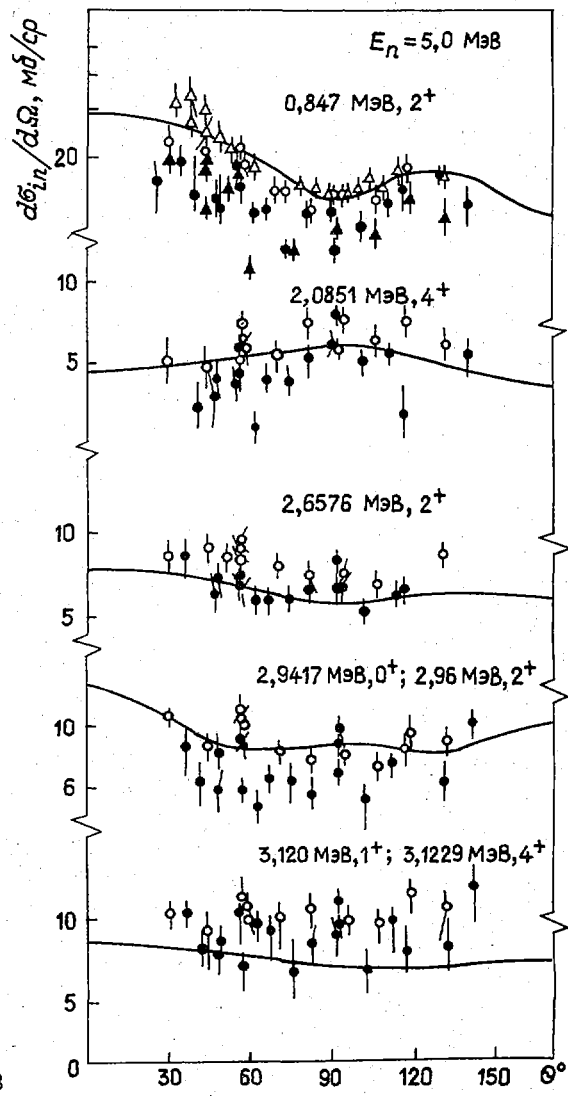


Рис. 5

Рис. 4. Функции возбуждения отдельных уровней или групп уровней природного железа при неупругом рассеянии нейтронов. Оцененные данные: сплошная кривая - оценка авторов настоящей работы; короткие штрихи - данные JENDL-II; длинные - ENDF/B-IV; штрихпунктирная кривая - данные ЦЯД-1. Экспериментальные данные: ϕ - [9]; \circ - [12]; $+$ - [13]

Рис. 5. Угловые распределения неупругого рассеяния нейтронов с начальной энергией 5 МэВ и возбуждением отдельных уровней или групп природного железа. Сплошная кривая - оценка авторов настоящей работы. Экспериментальные данные из работы [13] для нейтронов с начальной энергией, МэВ: ϕ - 5; \circ - 5,04; \blacktriangle - 5,44; \triangle - 5,56

При оценке спектров вторичных нейтронов реакций $(n, 2n)$ и (n, n') использовались следующие предположения:

- вклад прямых процессов в область спектра непрерывных уровней имеет платообразную форму, а вклад процессов, протекающих с образованием составного ядра, соответствует испарительной модели с зависимостью ядерной температуры от начальной энергии нейтрона как в модели ферми-газа;
- конкуренцией γ -квантов с нейтронами на втором каскаде можно пренебречь. Тогда, имея оцененные интегральные сечения реакций $(n, 2n)$ и (n, n') , можно получить вклад каждого механизма реакции в непрерывный спектр вылета первого нейтрона. Результаты такого упрощенного подхода к оценке спектров показаны на рис.6.

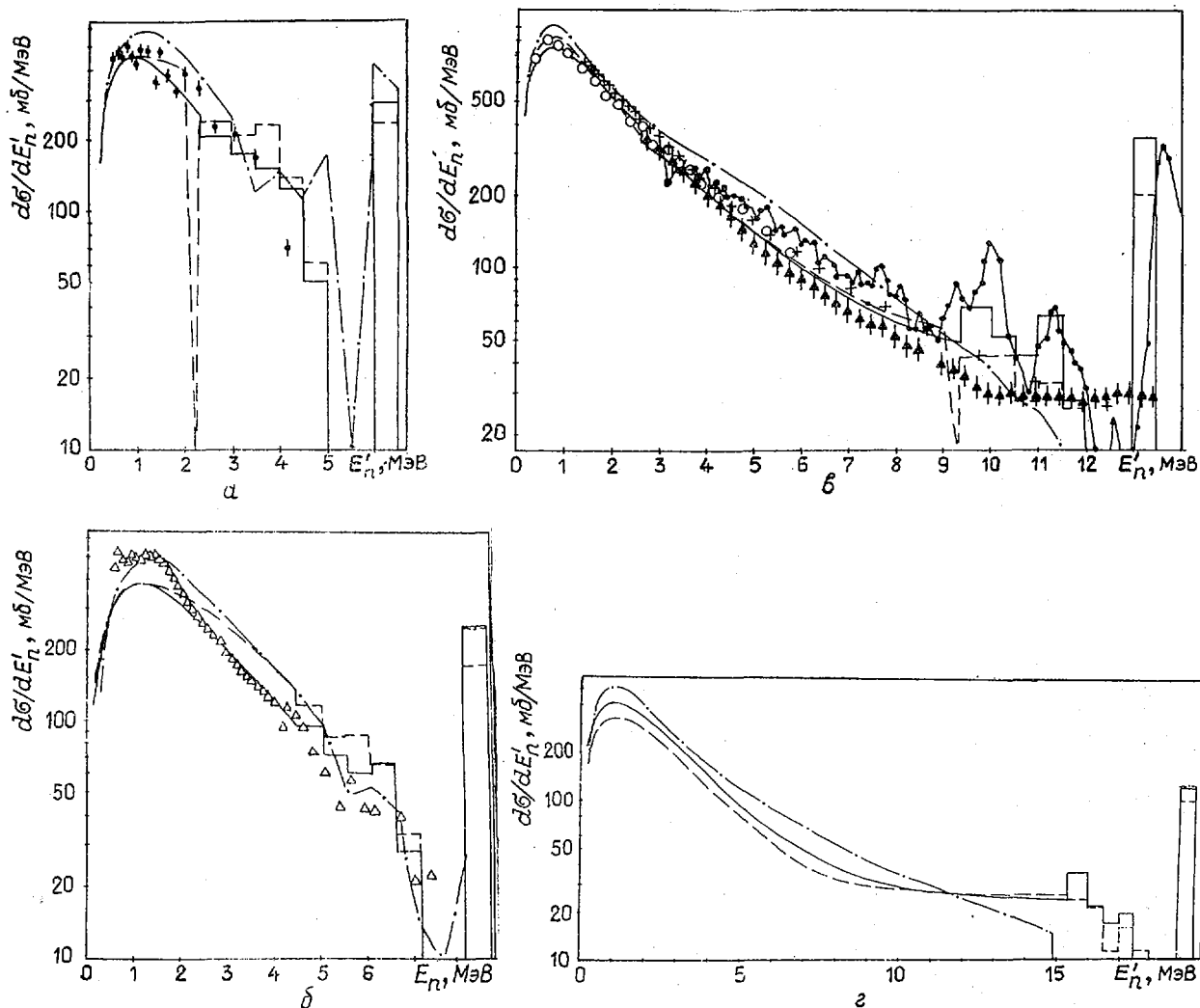


Рис.6. Сравнение результатов различных оценок для спектров нейтронов из реакций $(n, 2n)$ и (n, n') с экспериментальными данными для природного железа. Оцененные данные: сплошная кривая - оценка авторов настоящей работы; короткие штрихи - данные JENDL-II, длинные - ENDF/B-IV, штрихпунктирная - ЦИД-I. Гистограммой в жесткой части спектров показан вклад дискретных уровней. Экспериментальные данные для энергий нейтронов, МэВ: а - 7,0; б - 9,0; в - 14,0; г - 20. Данные работ:

ϕ - [16]; \blacktriangle - $\frac{d^2\sigma(90^\circ)}{dE_n' d\Omega} 4\pi$ из [17]; \circ - [18]; \blacktriangle - [19]; $+$ - $\frac{d^2\sigma(60^\circ)}{dE_n' d\Omega} 4\pi$ из [20];
 \blacktriangledown - $\frac{d^2\sigma(45^\circ)}{dE_n' d\Omega} 4\pi$ из [21]

Наиболее заметные расхождения наблюдаются в оценке сечения радиационного захвата (рис.7). В данной оценке использованы расчеты сечения захвата в оптико-статистическом подходе с учетом вклада прямых и полупрямых процессов. Структура в сечении захвата при энергии ниже 4 МэВ обусловлена конкуренцией со стороны каналов неупругого рассеяния.

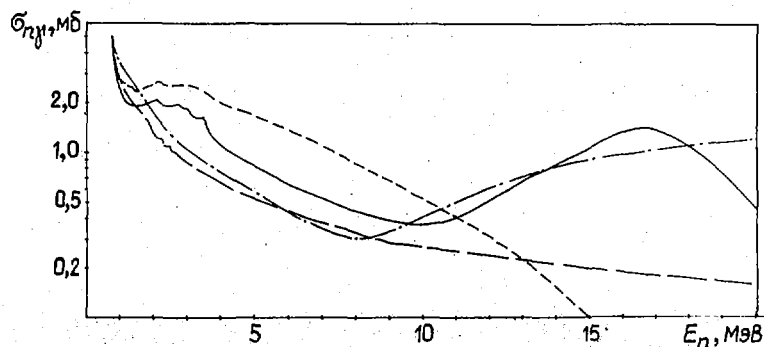


Рис.7. Сравнение результатов различных оценок для сечения радиационного захвата нейтронов в природном железе: сплошная кривая — оценка авторов настоящей работы; короткие штрихи — данные JENDL-II, длинные — ENDF/B-IV; штрихпунктирная кривая — данные ЦЯД-1

Необходимость новых измерений. В связи с проблемами, возникшими при оценке нейтронных сечений изотопов железа и его природной смеси, отметим желательность проведения следующих измерений:

- полного сечения для ^{56}Fe и природной смеси в области энергий 1 – 6 кэВ;
- суммарного сечения неупругих процессов в интервале энергий выше 3 МэВ;
- сечения захвата для энергий выше 1 МэВ;
- сечений (n, pn) и $(n, \alpha n)$, экспериментальные данные для которых практически отсутствуют.

Кроме того, необходимо получение взаимно непротиворечивых данных по неупругому рассеянию нейтронов с возбуждением отдельных дискретных уровней и их групп. Выполнение этих измерений позволит заметно повысить достоверность оцененных данных для рассмотренных сечений и энергий.

Проведенное сравнение оцененных сечений из различных библиотек с результатами настоящей оценки показывает, что последняя обладает следующими преимуществами:

- резонансная структура сечений в ней сохранена до энергии 850 кэВ;
- сечение захвата в некоторых группах заметно изменилось, что связано с появлением новых измерений;
- в резонансной области энергий в файлах отсутствуют какие-либо подложки в сечениях, за исключением случаев, когда это обусловлено требованием формата;
- оценка большинства сечений основывается на использовании физических моделей с параметрами, выбранными таким образом, чтобы описать многочисленные экспериментальные данные. Физически необоснованная перенормировка сечений, исходящая лишь из желания улучшить описание экспериментальных данных по отдельным сечениям, отсутствует;
- файл для природного железа получен из файлов для отдельных изотопов с учетом их содержания в природной смеси.

Настоящая оценка, осуществленная в данной работе, может послужить основой для подготовки констант для расчетов как быстрых, так и термоядерных реакторов.

Список литературы

1. Cornelis E.M., Mewissen L., Poortmans F. In: Nucl. data for sci. and technol.: Proc. of the Intern. conf. (Antwerp, 1982). Holland, 1983, p.135.
2. Brusegan A., Corvi F., Rohr G. e.a. Ibid., p.127.
3. Corvi F., Brusegan A., Buyl R. e.a. Ibid., p.131.

4. Rohr G., Brusegan A., Corvi F. e.a. Ibid., p.139.
5. Wisshak K., Kappler F. In: Proc. of the IAEA consultants meeting on nuclear data for structural materials; INDC(NDS)-152/L, 1984, p.46.
6. Мантуров Г.Н., Лунев В.П., Горбачева Л.В. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1983, вып. I(50), с.50.
7. Проняев В.Г., Игнатюк А.В. Там же, 1986, вып.3, с.13.
8. Carlson A.D., Cerbone R.J. Nucl. Sci. and Engng, 1970, v.42, p.28.
9. Perey F.G.J., Love T.A., Kinney W.E. Rep. ORNL-4823, 1972.
10. Cierjacks S., Forti F., Kopsch D. e.a. Rep. KFK-1000, 1968.
11. Schwartz R.B., Schrack R.A., Heaton H.T. Rep. NBS-MONO-138, 1974.
12. Mittler A., Nardini J., Couchell G.P. Rep. EXFOR-10519, 1975.
13. Kinney W.E., Perey F.G.J. Rep. ORNL-4515, 1970.
14. Kinney W.E., Perey F.G.J. Nucl. Sci. and Engng, 1977, v.64, p.418.
15. Smith A., Guenter P. Ibid.; 1980, v.73, p.186.
16. Towle J.H., Owens R.O. Nucl. Phys., 1967, v.A100, p.257.
17. Биряков Н.С., Журавлев Б.В., Корнилов Н.В. и др. Ядерная физика, 1974, т.19, с.1190.
18. Vonach H., Chalupka A., Wenniger F., Staffel G. Rep. ZFK-382, 1979, p.159.
19. Hermsdorf D., Meister A., Sassonoff S. e.a. Rep. ZFK-277(U), 1975.
20. Сальников О.А., Ловчикова Г.Н., Котельникова Г.В. и др. Ядерные константы, 1973, вып.7, с.102.
21. Takachashi A., Fukusawa M., Yanagi Y., Yamamoto J. OKTAVIAN: Rep. A-83-08, 1984.

Статья поступила в редакцию 14 марта 1986 г.

Библиографический индекс работ, помещенных в настоящем выпуске,
в Международной системе СИИДА

Element	Quantity	Laboratory	Work type	Energy (eV)		Page	Comments	
S	A			min	max			
1	2	3	4	5	6	7	8	
							9	
FE	TOT	FEI	EVAL	8.0+5	2.0+7	51	PRONJAEV+ SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD	
FE	SEL	FEI	EVAL	8.0+5	2.0+7	51	PRONJAEV+ SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD	
FE	NON	FEI	EVAL	8.0+5	2.0+7	51	PRONJAEV+ SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD	
FE	DIN	FEI	EVAL	1.0+6	2.0+7	51	PRONJAEV+ 5LVL, EXIT FN, GRPH, CFD	
FE	DIN	FEI	EVAL	5.0+6		51	PRONJAEV+ 5 ANGDIST, EXPT, EVAL, GRPH	
FE	NEM	FEI	EVAL	7.0+6	2.0+7	51	PRONJAEV+ N - SPEC, EXPT, EVAL, GRPH, CFD	
FE	NG	FEI	EVAL	1.0+3	2.0+7	51	PRONJAEV+ SIG(E), EVALS, GRPH, CFD	
U	DIN	IJE	EVAL	4.6+4	1.8+7	7	KONSHIN. SIG(E), EXCIT FN, 3LVLS, GRPH	
U	233	NF	RI	EXPT	1.0+6	3.0+6	19	SHPAKOV. VDG, SIG, GRPH, CFD
U	235	TOT	IJE	EVAL	1.0+5	2.0+7	7	KONSHIN. SIG(E), THEO, EXPTS, GRPH, CFD
U	235	SEL	IJE	EVAL	1.0+5	2.0+7	7	KONSHIN. SIG(E), THEO, EXPTS, GRPH, CFD
U	235	DIN	IJE	EVAL	1.0+5	2.0+6	7	KONSHIN. EXCIT FN, LVL GROUP, GRPH

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U	235	SIN	IJE	EVAL	1.0+5	4.0+6	7		KØNSHIN. SIG(E), THEØ, EXPTS, GRPH, CFD
U	235	RES	IJE	EVAL	2.5-2	8.0+1	7		KØNSHIN. AVG WN, D. CALC, TBL, CFD
U	235	STF	IJE	EVAL	2.5-2	8.0+1	7		KØNSHIN. AVG SO. CALC, TBL, CFD
U	235	NF	RI	EXPT	1.0+6	2.0+7	19		SHPAKØV. VDG, SIG(E), GRPH, CFD
U	236	NG	IJE	EVAL	4.0+4	3.5+5	7		KØNSHIN. SIG(E), THEØ, EXPTS, GRPH, CFD
U	236	RES	IJE	EVAL	2.5-2	8.0+1	7		KØNSHIN. AVG WN, D. CALC, TBL, CFD
U	236	STF	IJE	EVAL	2.5-2	8.0+1	7		KØNSHIN. AVG SO. CALC, TBL, CFD
U	236	NG	FBI	REVW	1.0+3	1.5+7	23		TØLSTIKØV. SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD
U	238	DEL	IJE	EVAL	7.5+6		7		KØNSHIN. ANGDIST, THEØ, EXPT, GRPH, CFD
U	238	DIN	IJE	EVAL	7.5+6		7		KØNSHIN. ANGDIST, 2LVLS, THEØ, GRPH
U	238	NG	IJE	EVAL	1.0+5	1.3+6	7		KØNSHIN. SIG(E), THEØ, EXPTS, GRPH, CFD
U	238	TØT	IJI	EXPT	2.0+3	1.4+5	30		MURZIN+ REAC, FILTER, AVG SIG(E), TBL
U	238	DEL	IJI	EXPT	1.4+5		30		MURZIN+ REAC, FILTER, ANGDIST, GRPH
U	238	DIN	IJI	EXPT	1.4+5		30		MURZIN+ REAC, FILTER, ANGDIST, GRPH
U	238	SIN	IJI	EXPT	1.4+5		30		MURZIN+ REAC, FILTER, AVG SIG = .82 + - .02
U	238	SEL	IJI	EXPT	5.5+4	1.4+5	30		MURZIN+ REAC, FILTER, 2 AVG SIG
U	238	STF	IJI	EXPT	2.0+3	1.4+5	30		MURZIN+ TRANS, SLBW ANAL, SO, S1, TBL
U	238	POT	IJI	EXPT	2.0+3	1.4+5	30		MURZIN+ TRANS, SLBW ANAL, RO, R1, TBL
U	238	NG	FBI	REVW	5.0+5	1.5+7	23		TØLSTIKOV. SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD
NP	237	NF	RI	EXPT	1.0+6	2.0+7	19		SHPAKØV. VDG, SIG(E), GRPH, CFD
NP	237	NG	FBI	REVW	1.0+3	1.5+7	23		TØLSTIKOV. SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD
PU	238	NF	IJE	EVAL	5.0+4	2.0+7	7		KØNSHIN. SIG(E), CALC, EXPTS, GRPH, CFD
PU	238	N2N	IJE	EVAL	7.0+6	2.0+7	7		KØNSHIN. SIG(E), CALC, EVAL, GRPH, CFD
PU	238	NXN	IJE	EVAL	1.2+7	2.0+7	7		KØNSHIN. N3N, SIG(E), CALC, EVAL, GRPH
PU	239	NF	IJE	EVAL	1.5+5	2.0+7	7		KØNSHIN. SIG(E), CALC, EXPTS, GRPH, CFD
PU	239	N2N	IJE	EVAL	6.0+6	2.0+7	7		KØNSHIN. SIG(E), CALC, EXPT, GRPH, CFD
PU	239	NF	RI	EXPT	1.0+6	2.0+7	19		SHPAKØV. VDG, SIG(E), GRPH, CFD
PU	240	RES	IJE	EVAL	2.5-2	8.0+1	7		KØNSHIN. AVG WN, D, CALC, TBL, CFD
PU	240	STF	IJE	EVAL	2.5-2	8.0+1	7		KØNSHIN. AVG SO. CALC, TBL, CFD
PU	240	NF	IJE	EVAL	1.0+5	2.0+7	7		KØNSHIN. SIG(E), EXPT, CALC, GRPH, CFD
PU	240	N2N	IJE	EVAL	6.0+6	2.0+7	7		KØNSHIN. SIG(E), CALC, EVAL, GRPH, CFD
PU	240	NXN	IJE	EVAL	1.3+7	2.0+7	7		KØNSHIN. SIG(E), N3N, CALC, EVAL, GRPH
CM	242	NF	FBI	EVAL	1.0+5	2.0+7	37		FURSØV+ SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD
CM	243	NF	FBI	EVAL	1.0+5	2.0+7	37		FURSØV+ SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD
CM	244	NF	FBI	EVAL	1.0+5	2.0+7	37		FURSØV+ SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD
CM	245	NF	FBI	EVAL	1.0+5	2.0+7	37		FURSØV+ SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD
CM	246	NF	FBI	EVAL	1.0+5	2.0+7	37		FURSØV+ SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD
CM	247	NF	FBI	EVAL	1.0+5	2.0+7	37		FURSØV+ SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD
CM	248	NF	FBI	EVAL	1.0+5	2.0+7	37		FURSØV+ SIG(E), EXPT, EVAL, GRPH, CFD
CM	242	NF	FBI	EVAL	1.0+5	2.0+7	43		IGNATJUK+ SIG(E), EXPT, CALC, GRPH, CFD
CM	242	N2N	FBI	EVAL	7.0+6	2.0+7	43		IGNATJUK+ SIG(E), EVAL, CALC, GRPH, CFD
CM	243	N2N	FBI	EVAL	5.5+6	2.0+7	43		IGNATJUK+ SIG(E), EVAL, CALC, GRPH, CFD
CM	243	NF	FBI	EVAL	1.0+5	2.0+7	43		IGNATJUK+ SIG(E), EXPT, CALC, GRPH, CFD
CM	244	NF	FBI	EVAL	5.0+5	2.0+7	43		IGNATJUK+ SIG(E), EXPT, CALC, GRPH, CFD
CM	244	N2N	FBI	EVAL	6.5+6	2.0+7	43		IGNATJUK+ SIG(E), EVAL, CALC, GRPH, CFD

СОДЕРЖАНИЕ

сборника "Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы"
за 1986 г.*

НЕЙТРОННЫЕ КОНСТАНТЫ И ПАРАМЕТРЫ

Николаев М.Н., Сеница В.В., Коцеев В.Н. Предложения по модификации формата ENDF для представления данных о структуре сечений в области неразрешенных резонансов	1,3
Пшеничный В.А., Грицай Е.А., Гнидак Н.Л. Изомерное отношение ^{151}Eu для тепловых нейтронов и нейтронов с энергией 2; 55 и 144 кэВ	1,9
Мороговский Г.Б. Резонансные параметры ^{235}U в энергетическом интервале 1-100 эВ	1,12
Аникин Г.В., Котухов И.И. О рассеянии нейтронов на малые углы ядрами ^{238}U	1,20
Блохин А.И., Булеева Н.Н., Денискина М.В., Кравченко И.В., Манохин В.Н., Пахомова О.А., Улаева М.В. Библиотека сервисных программ для работы с оцененными нейтронными данными в форматах KEDAK и ENDF/B	1,26
Довбенко А.Г., Мурогов В.М., Шубин Ю.Н. Функции возбуждения реакций $^{235}\text{U} (n, xn)$ и $^{234}\text{U} (n, xn)$ нейтронами спектра бланкета электроядерной установки и накопление изотопов урана	1,28
Тараско М.З., Филиппов В.В. Оценка моментов полных нейтронных сечений по измеренным пропускам	1,34
Боховко М.В., Казаков Л.Е., Кононов В.Н., Полетаев Е.Д., Тимохов В.М., Воеводский А.А. Измерение сечений радиационного захвата нейтронов для изотопов вольфрама в области энергий 5-400 кэВ	1,39
Журавлев Б.В. Угловые распределения нейтронов в реакциях (d, xn) и (α, xn)	2,3
Бирюков Н.С., Журавлев Б.В., Руденко А.П., Трыкова В.И. Спектры нейтронов из реакций, вызванных дейтронами с энергией 22,3 МэВ	2,6
Довбенко А.Г., Лунев В.П. Сечения взаимодействия нейтронов с энергией 0,001-2,5 МэВ с четно-четными деформированными ядрами в методе сильной связи каналов	2,11
Федоров М.В., Складар Н.Т., Овдиенко В.Д., Яковенко Т.И., Сметанин Г.А. Эффекты энергетической структуры полных нейтронных сечений хрома в области неразрешенных резонансов	3,3
Комаров А.В. Факторы резонансной самоэкранировки для железа, никеля и хрома	3,6
Симаков С.П. Экспериментальные и оцененные данные о спектрах вторичных нейтронов из реакций на ядрах железа, хрома и никеля	3,8
Проняев В.Г., Игнатюк А.В. Оценка нейтронных сечений изотопов железа в резонансной области	3,13

* Цифры после названия статьи обозначают номер выпуска и начальную страницу.

Поляков А.В., Ловчикова Г.Н., Виноградов В.А., Журавлев Б.В., Сальников О.А., Сухих С.Э. Рассеяние нейтронов с энергией 6 МэВ на ванадии _____	3,21
Немилов Ю.А., Крамаровский Я.М., Тетерин Е.Д., Победоносцев Л.А. Неупругое рассеяние нейтронов на ядрах ^{93}Nb _____	3,24
Трофимов Ю.Н. Сечение радиационного захвата нейтронов ^{116}Sn при энергии 0,4-2,0 МэВ _____	3,27
Григорьев Е.И., Трошин В.С., Ярына В.П. Оценка сечения реакции $^{204}\text{Pb}(n,n')^{204\text{m}}\text{Pb}$ для нейтронно-активационного детек- тора _____	3,30
Сухих С.Э., Ловчикова Г.Н., Виноградов В.А., Журавлев Б.В., Поляков А.В., Сальников О.А. Интегральный спектр мгновенных нейтронов деления ^{232}Th при вынужденном делении нейтронов с энергией 1,5 МэВ _____	3,34
Козаков Л.Е., Кононов В.Н., Мантуров Г.Н., Полетаев Е.Д., Боховко М.В., Тимохов В.М., Воеводский А.А. Измерение сечения радиационного захвата нейтронов для ^{238}U в области энергий 4-460 кэВ _____	3,37
Коньшин В.А., Салыхов Н.К. Оценка средних резонансных параметров ^{235}U , изотопов плутония и ^{241}Am по данным в области энергий разрешенных резонансов _____	3,46
Кудяев Г.А., Остапенко Ю.В., Смиренкин Г.Н. О статистическом описании вероятности деления в переходной области ядер (в районе радия) _____	3,55
Гай Е.В. Об аппроксимации рациональными функциями сечений нескольких реакций, проходящих через составное ядро _____	3,62
Манохин В.Н., Блохин А.И. Деятельность Центра ядерных данных по оценке нейтронных данных _____	4,3
Коньшин В.А. Оценка ядерных данных тяжелых делящихся ядер _____	4,7
Шпаков В.И. Абсолютные измерения сечений деления важнейших нуклидов _____	4,19
Толстикова В.А. Измерения и анализ сечений радиационного захвата нептуния и изотопов урана _____	4,23
Мурзин А.В., Вертебный В.П., Кирилук А.Л., Либман В.А., Литвинский Л.Л., Новоселов Г.М., Разбудей В.Ф., Сидоров С.В., Трофимова Н.А. Средние параметры взаимодействия промежуточных нейтронов с ядром ^{238}U _____	4,30
Фурсов Б.И., Кудяев Г.А., Смиренкин Г.Н. Оценка сечений деления изотопов кюрия быстрыми нейтронами _____	4,37
Игнатюк А.В., Маслов В.М. Согласованная оценка нейтронных сечений изотопов $^{242-244}\text{Cm}$ _____	4,43
Старичкай Т., Сайлер К. Измерение и компиляция нейтронных сечений _____	4,48
Проняев В.Г., Игнатюк А.В. Переоценка нейтронных сечений железа _____	4,51

КОНСТАНТЫ И ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ ЯДРА
И ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Дмитриев П.П. Систематика выходов ядерных реакций для толстой мишени при энергии α -частиц 44 МэВ	1,48
ЯДЕРНО-РЕАКТОРНЫЕ ДАННЫЕ	
Абрамов Б.Д. О задаче подбора групповых гомогенизированных констант	1,52
Бедняков С.М., Дулин В.А., Мантуров Г.Н., Можаяев В.К. Изучение поглощения нейтронов продуктами деления в критической сборке	1,62
Голубев В.И., Дулин В.А., Козловцев В.Г., Ланцов М.Н., Датце К., Ферманн К., Лемани Е., Хюттель Г. Проверка точности групповых констант молибдена в экспериментах на быстрых критических сборках	1,68
Звенигородский А.Г., Гужовский Б.Я., Абрамович С.Н., Жеребцов В.А., Пелипенко О.А. Оценка полных сечений образования нейтронов и протонов при взаимодействии дейтронов с ядрами ^{71}Li	1,75
Машкович В.П. О внедрении Международной системы единиц физических величин в области радиационной защиты	2,14
Николаев М.Н., Долгов Е.В., Коцеев В.Н., Кривцов А.С., Кулагин Н.Т., Савоськин М.М., Сеница В.В., Цибуля А.М. Новое в константном обеспечении групповых расчетов нейтронных полей в защите	2,18
Даниэль А.В., Дулин В.Н. Комплекс программ подготовки I75-групповой системы нейтронных сечений с подгрупповым описанием области резонансов	2,20
Дубинин А.А., Колесов В.Е., Кривцов А.С., Сахаров В.К., Строганов А.А., Шикин А.В. Библиотека групповых констант для расчета источников фотонов в ядерно-технических установках	2,22
Возяков В.В., Манохин В.Н., Труханов Г.Я. Состояние ядерных данных в проблеме переноса нейтронов в атмосфере Земли и в средах из основных породообразующих элементов	2,25
Волощенко А.М., Гермогенова Т.А., Исаенко Т.Г., Кац Э.Х., Луховцкая Э.С., Николаев М.Н., Олейник-Овод Г.М., Савоськин М.М., Строганов А.А., Фейгельсон Н.Б. ОКС-3.5 - пакет программ константного обеспечения	2,28
Колесов В.Е., Соловьев Н.А., Цуркова Е.В. Разработка константного обеспечения для негрупповых расчетов защиты методом Монте-Карло	2,31
Кулагин Н.Т., Маркелов И.П., Колесов В.Е., Кривцов А.С., Блохин А.И. Тестировка оцененных нейтронных данных для хрома и никеля на основе макриэкспериментов	2,36
Демин В.П., Липовый Н.М., Носов А.А., Римский-Корсаков А.А., Хасанова М.В. Определение эффективных сечений реакций (n, n') и $(n, 2n)$ на ниобии	2,39
Коробейников В.В., Кулагин Н.Т., Николаев М.Н., Пивоваров В.А., Савоськин М.М., Цибуля А.М. Влияние моделей замедления, резонансной самоэкранировки сечений и анизотропии упругого рассеяния на результаты многогруппового расчета защиты быстрого реактора	2,41
Балашов Ю.И., Болятко В.В., Волощенко А.М., Илюшкин А.И., Машкович В.П., Савицкий В.И. Физика формирования и статистическая корректировка функционалов поля излучения в реакторе и защите	2,44

Балашов Д.И., Болятко В.В., Елисеев И.А., Илюшкин А.И., Инютин Е.И., Савина В.В., Савицкий В.И. Физические закономерности переноса нейтронов во внутрикорпусной защите быстрых реакторов	2,48
Болятко В.В., Машкович В.П., Строганов А.А. Погрешности расчетов защиты реактора на быстрых нейтронах	2,53
Гудков А.Н., Живун В.М., Коваленко В.В., Колдобский А.Б., Кривашеев С.В. Экспериментальное определение выходов групп запаздывающих нейтронов деления ^{233}U и ^{235}U тепловыми нейтронами	2,56
Воротынцева М.Ф., Ринейский А.А., Сатаев Е.А. Метод учета неразрешенной резонансной структуры в уравнении замедления нейтронов	2,60
Груша Н.М., Жук И.В., Ломоносова Е.М., Малькин А.П., Слизов В.П., Ярошевич О.И. Анализ расчетно-экспериментальных расхождений отношений средних сечений изотопов плутония в быстро-тепловой критической сборке БТС-4	3,66
Великанов В.В., Савинов А.П., Савоськин М.М. Исследование метода линейной коллапсации нейтронных сечений	3,74

Редактор Г.В.Зубова
Технический редактор С.И.Халиллулина
Корректоры Г.С.Платонова, Е.М.Спиридонова

Подписано в печать 16.12.86.
Печать офсетная. Печ.л. 13,0.
Индекс 3645.

Т-24251.
Уч.-изд.л. 10,0.
9 статей.

Формат 60x84 1/8.
Тираж 355 экз.
Зак. тип. 1661

Отпечатано в ЦНИИатоминформе
127434, Москва, аб/ящ 971

УДК 539.170

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЦЕНТРА ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ ПО ОЦЕНКЕ НЕЙТРОННЫХ ДАННЫХ/
В.Н.Манохин, А.И.Блохин. - Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Ядерные константы, 1986, вып.4, с.3-7.

В работе описана деятельность Центра ядерных данных Госкомитета по использованию атомной энергии по оценке ядерных данных и формированию Библиотеки рекомендованных оцененных нейтронных данных. Подведены итоги деятельности библиотеки за последние 5 лет, прослежены этапы ее создания: разработка программы, оценка и организация экспертизы оцененных данных, выработка рекомендаций (список лит. - 14 назв.).

УДК 539.172.4

ОЦЕНКА ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ДЕЛЯЩИХСЯ ЯДЕР/В.А.Коньшин. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1986, вып.4, с.7-19.

Приведен краткий обзор методов оценки ядерных данных делящихся ядер. Обсуждаются теоретические модели, используемые для предсказания нейтронных сечений и проблемы их дальнейшего развития: метод связанных каналов, корректные модели плотности уровней и переходных состояний при делении, а также многокаскадная статистическая модель с учетом возможности предравновесного распада (рис.9, табл.1, список лит. - 23 назв.).

УДК 539.173.4

АБСОЛЮТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СЕЧЕНИЙ ДЕЛЕНИЯ ВАЖНЕЙШИХ НУКЛИДОВ/В.И.Шпаков. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1986, вып.4, с. 19-23.

Представлены результаты прецизионных измерений сечения деления нуклидов ^{233}U , ^{235}U , ^{237}Np , ^{239}Pu с погрешностью в пределах 2,1-3,6% при различных энергиях в интервале 1,9-18,8 МэВ. Измерения проведены на тандем-ускорителе Центрального института ядерных исследований (г.Россендорф, ГДР) и ускорителе Ван-де-Граафа (Радиевый институт, СССР) методом коррелированных по времени сопутствующих частиц. Проведен анализ погрешностей и показана высокая надежность результатов измерений (рис.4, табл.1, список лит. - 10 назв.).

УДК 539.172.4

ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗ СЕЧЕНИЙ РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА НЕПТУНИЯ И ИЗОТОПОВ УРАНА/В.А.Толстиков. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1986, вып.4, с. 23-29.

Рассмотрены сечения радиационного захвата быстрых нейтронов $^{236,238}\text{U}$ и ^{237}Np . Обсуждены последние экспериментальные и оценочные данные из библиотек БНАБ-78 и ENDF/V-V. Сделан вывод о необходимости дальнейшего совершенствования методик и экспериментальной техники, требуемых для проведения прецизионных измерений. Предложены направления дальнейших исследований (рис.3, список лит. - 36 назв.).

УДК 539.172.4+621.039

СРЕДНИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ НЕЙТРОНОВ С ЯДРОМ ^{238}U /А.В.Мурзин, В.П.Вертебный, А.Л.Кирилжк, В.А.Либман,Л.Л.Литвинский, Г.М.Новоселов, В.Ф.Разбудей, С.В.Сидоров, Н.А.Трофимова.- Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1986, вып.4, с.30-36.

С помощью высокопоточных пучков фильтрованных нейтронов измерены полные и парциальные нейтронные сечения ^{238}U при энергиях нейтронов 2, 55 и 144 кэВ, а также спектры ρ -квантов захвата ^{238}U при энергиях нейтронов 2, 24 и 55 кэВ. Получены значения полных нейтронных сечений σ_t , полных сечений упругого σ_{el} и неупругого σ_{in} (на уровне $J^\pi=2^+$, $E_{ур}=45$ кэВ) рассеяния: при энергии 2 кэВ $\sigma_t = 24,69 \pm 0,30$ б; при 55 кэВ $\sigma_t = 13,343 \pm 0,051$ б; $\sigma_{el} = 12,89 \pm 0,19$ б; при 144 кэВ $\sigma_t = 11,551 \pm 0,22$ б; $\sigma_{el} = 10,569 \pm 0,091$ б; $\sigma_{in} = 0,815 \pm 0,022$ б. Из анализа сечений определено значение ρ -нейтронной силовой функции $S_1 = (2,42 \pm 0,09) 10^{-4}$ эВ $^{-1/2}$. Исследованы эффекты резонансной самоэкранировки сечений, определены средние резонансные параметры в области разрешенных и неразрешенных резонансов (рис.4, табл.3, список лит. - 24 назв.).

УДК 539.172.4

ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ КУРИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ/В.И.Фурсов, Г.А.Кудяев, Г.Н.Смиренкин. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1986, вып.4, с. 37-43.

Описан метод и представлены предварительные результаты оценки сечений деления изотопов курия с массовыми числами 242-244 и 246-248 для диапазона энергий нейтронов 0,1-20 МэВ. Проведено сопоставление оцененных кривых сечения деления с экспериментальными результатами и другими оценками (рис.1, список лит. - 16 назв.).

УДК 539.172.4

СОГЛАСОВАННАЯ ОЦЕНКА НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗОТОПОВ $^{242-244}\text{Cm}$ /
А.В.Игнатюк, В.М.Маслов. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1986, вып.4, с.43-48.

В рамках оптико-статистического подхода, учитывающего оболочечные, сверхтекучие и коллективные свойства делящихся ядер, рассчитаны сечения деления и реакции $(n,2n)$ для изотопов $^{242-244}\text{Cm}$. Результаты расчетов существенно отличаются от имеющихся оценок нейтронных сечений юрия и указывают на необходимость пересмотра оценок, включенных в международные файлы, в области энергий нейтронов выше 1 МэВ (рис.3, список лит. - 17 назв.).

УДК 539.170

ИЗМЕРЕНИЕ И КОМПИЛЯЦИЯ НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ/Т.Старичкай, К.Сайдер. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1986, вып.4, с.48-50.

ИЭФ университета им. Л.Кочута (ВНР) совместно с ФЭИ (СССР) в течение 1981-1985 гг. провел измерения и оценки ядерных данных для реакторов на быстрых нейтронах. Наиболее существенные работы: измерение функций возбуждения нейтронных реакций активационным методом; определение этим методом сечений при энергии 14 МэВ, а также сечений реакции (n,t) ; изучение дифференциальных сечений реакции $^{56}\text{Fe}(n,n')$ корреляционным методом при 14 МэВ и дифференциальных угловых распределений осколков деления. Перечислены работы, запланированные на 1986-1990 гг. (список лит. - 19 назв.).

УДК 539.172.4

ПЕРЕОЦЕНКА НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗА/В.Г.Проняев, А.В.Игнатюк. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1986, вып.4, с.51-58.

Рассмотрены подходы, использовавшиеся при оценке нейтронных сечений железа и его изотопов в области энергий 10^{-5} эВ - 20 МэВ. Сравниваются результаты настоящей оценки (ЦЯД-2) с оценками, выполненными ранее ЦЯД-1, ENDF/B-IV, JENDL-II. Обсуждается необходимость проведения новых экспериментов, которые позволят улучшить качество и повысить достоверность оцененных сечений (рис.7, табл.1, список лит. - 21 назв.).

1 р. 50 к.

Индекс 3645

Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы, 1986, вып. 4, с. 1-64.