

3. Алексеенко С.А., Аруев Н.Н., Мамырин Б.А. и др. Масс-спектрометрический анализ изотопов водорода и гелия. — Атомная энергия, 1981, т. 51, вып. 1, с. 27—31.
4. Капышев В.К., Милешкин Ю.А., Рязанцева Н.Н. и др. Методика определения изотопного состава водорода и гелия в тритиевой технологической системе установки ТСП. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 1991, вып. 4, с. 38—42.
5. Gentsch H. Inertes Zyklotronresonanz — Massenspektrometer (Omegatron). — Vak. Techn., 1987, Н. 6/7, S. 224—225.
6. Ненарокова В.Т., Масленников А.И., Рязанцева Н.Н. и др. Специализированный масс-спектрометр для анализа легких газов. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Радиационная техника, 1986, вып. 1(22), с. 39—41.
7. Масленников А.И., Ненарокова В.Т., Рязанцева Н.Н. Методическое и программное обеспечение масс-спектрометра МИ 3305. — Там же, 1986, вып. 1(22), с. 95—97.
8. Беловодский А.Ф., Гаевой В.К., Гришмановский В.И. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 104—109.

Поступила в Редакцию 10.09.93

УДК 539.165.4(035.5)

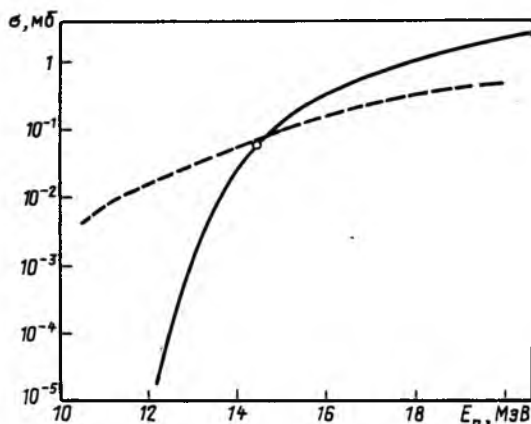
### БИБЛИОТЕКА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА АКТИВАЦИИ И ТРАНСМУТАЦИИ

*Грудзевич О.Т., Зеленецкий А.В. (Институт атомной энергетики, Обнинск),  
Игнатюк А.В., Пащенко А.Б. (ФЭИ)*

Развитие библиотек активационных данных вызвано потребностями расчетов активации конструкционных материалов и трансмутации радиоактивных отходов в ядерно-физических установках с высоким потоком нейтронов. Для удовлетворения этих потребностей современные библиотеки должны содержать данные о более 10 тыс. функций возбуждения реакций, вызванных нейтронами энергией до 20 МэВ. Такой большой объем данных, значительно превосходящих файлы общего пользования (ENDF/V, БРОНД, JENDL), обусловлен необходимостью знания сечений как на стабильных, так и нестабильных (даже короткоживущих) ядрах-мишенях.

Необходимость усовершенствования библиотек. Анализ современных версий активационных библиотек (REAC, EAF) показывает, что большинство сечений получено расчетным путем по упрощенным методикам с последующей нормировкой на систематики или экспериментальные данные при  $E_n = 14,5$  МэВ. Такой подход может быть приемлемым только на первой стадии формирования библиотеки, дальнейшее ее совершенствование связано с применением строгих теоретических моделей для наиболее важных реакций [1], а затем для их все более широкого круга [2]. Кроме того, есть принципиальные доводы о необходимости использования строгих моделей, выявленные в результате специальных исследований [3, 4]. Это относится в первую очередь к реакциям на изомерных мишенях и реакциям, приводящим к образованию ядер-продуктов в изомерных состояниях.

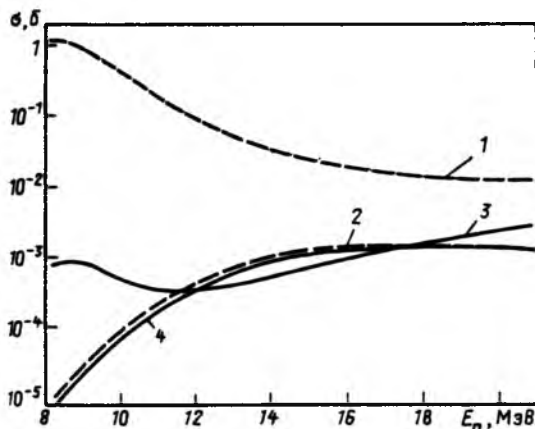
На рис. 1 показано сравнение функции возбуждения реакции  $^{64}\text{Zn}(n, t)$  из библиотеки EAF-3 [5] (программа THRESH) с результатами расчетов по статистической модели ядерных реакций в формализме Хаузера—Фешбаха—Молда-



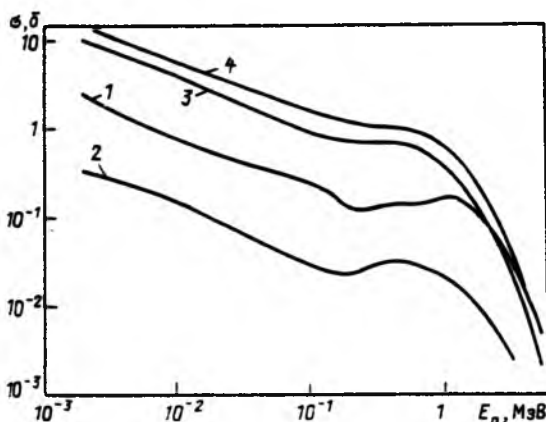
Р и с. 1. Функция возбуждения реакции  $^{64}\text{Zn}(n, t)$ : —, - - - данные библиотеки ADL-3 и EAF-3 соответственно

уэра с учетом вклада неравновесных процессов (модифицированная программа STAPRE) [6, 7]. Энергетические зависимости сечений, полученные по строгой и простой моделям, значительно различаются. Это различие вызвано, скорее всего, некорректностью учета кулоновского барьера в расчетах по программе THRESH.

В библиотеке ADL-91 [8] сечения пороговых реакций вычисляли по статистической модели ядерных реакций в формализме Вайскопфа, в котором конкуренция  $\gamma$ -квантов не может быть учтена достаточно строго. Этот недостаток, как правило, несущественно влияет на результаты расчетов. Однако в некоторых случаях, когда энергия реакций и порог вылета конкурирующих частиц отличаются значительно, подход Вайскопфа неприемлем. На рис. 2 показаны результаты расчетов сечений реакций  $(n, n'\alpha)$  и  $(n, \alpha n)$  на ядре-мишени  $^{145}\text{Pm}$  в формализме Хаузера—Фешбаха (—) и Вайскопфа (---). Сечения реакции  $(n, n'\alpha)$ , вычисленные в различных подходах, отличаются значительно. Сказывается неблагоприятная для расчетов в подходе Вайскопфа ситуация, в результате которой вылет второго нейтрона энергетически невозможен, а  $\gamma$ -кванты не могут конкурировать с вылетом  $\alpha$ -частиц.



Р и с. 2. Функция возбуждения реакции  $^{145}\text{Pm}(n, n'\alpha)$ : 1, 3 — сечения реакции  $(n, n'\alpha)$ ; 2, 4 — сечения реакции  $(n, \alpha n)$ ; - - - расчет без учета конкуренции  $\gamma$ -квантов



Р и с. 3. Влияние начального возбуждения и спина ядра-мишени на сечение реакции  $^{178}\text{Hf}(n, \gamma)$ : 1, 2 — сечение реакции на основном состоянии ядра-мишени и возбужденной ( $E = 2,446$  МэВ) мишени со спином  $I_0 = 0$  соответственно; 3 — изомерная мишень (2,446 МэВ,  $16^+$ ); 4 — с учетом изменения характеристик нейтронного резонанса

возможен, а  $\gamma$ -кванты не могут конкурировать с вылетом  $\alpha$ -частиц.

В библиотеках сечения реакций на изомерных ядрах-мишенях, как правило, приняты равными сечениям на ядрах в основном состоянии. Однако начальное возбуждение и спин ядра-мишени существенно влияют на сечения реакций [3]. Сечение реакции значительно изменяется (рис. 3, кривые 1, 4) за счет наличия у ядра-мишени высокого спина и начального возбуждения.

Принципиальные недостатки имеются в используемых методах оценки выхода изомеров. Обычно функции возбуждения изомерного уровня получают посредством перенормировки сечения соответствующей реакции по изомерному отношению сечений. Этот подход, даже не обсуждая его недостатки в описании энергетической зависимости получаемого сечения, не может быть применен из-за отсутствия надежных систематик изомерных отношений. В то же время развитие  $\gamma$ -каскадной модели распада возбужденного ядра [4] позволило удовлетворительно предсказывать выход изомеров в различных реакциях. На рис. 4 показано сравнение результатов расчетов сечения реакции  $^{179}\text{Hf}(n, 2n) ^{178m2}\text{Hf}$  с экспериментальными данными [1]. Кривые обозначают область неопределенности предсказаний модели [4].

Таким образом, перечисленные аргументы свидетельствуют о том, что сечения реакций, содержащихся в современных версиях активационных библиотек, должны быть пересмотрены, и бо-

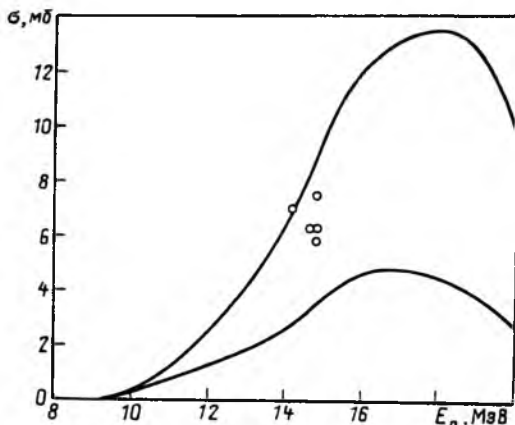
лее высокое качество новых сечений может быть получено только при использовании строгих теоретических моделей.

**Теоретическая модель.** Основными характеристиками статистической модели являются коэффициенты проницаемости для частиц во входном и выходных каналах реакции и плотность возбужденных уровней соответствующих остаточных ядер. Расчеты отдельных сечений по указанной модели ординарны, однако расчеты более 10 тыс. функций возбуждения, необходимых для создания библиотеки активационных данных, по-видимому, ранее не проводились. Авторы настоящей статьи использовали программу SCAT2 [9] для вычисления коэффициентов проницаемости и STAPRE [6] для статистических расчетов сечений.

Последняя программа модифицирована для согласованного описания неравновесных процессов в феноменологическом подходе, предложенном в работе [7]. Плотность уровней вычисляли по сверхтекучей модели ядра с параметрами из систематики [10]. Функции возбуждения изомерных уровней определяли методом, предложенным авторами работы [4] и апробированным по описанию многих экспериментальных данных.

Основной трудностью при выполнении расчетов большого числа функций возбуждения пороговых реакций по строгим моделям является, как известно, подготовка исходных данных. В каждый набор исходных данных должны быть включены схемы дискретных уровней и параметры плотности уровней всех ядер во входном, выходном и конкурирующих каналах реакции. Кроме этого, должны быть заданы характеристики нейтронных резонансов и энергии связи частиц во всех составных ядрах на каждом каскаде реакции. Все схемы уровней должны быть проанализированы относительно пропуска уровней и характеристик отдельных уровней. Принципиально важен выбор параметров плотности уровней. Неизвестные экспериментальные данные о плотности нейтронных резонансов ядер выбираются на основе локальных систематик. В этом случае выбор модели плотности уровней не является решающим, так как нефизичность параметров удастся скомпенсировать их подгонкой. Иная ситуация складывается при проведении массовых расчетов, когда параметры плотности уровней могут быть выбраны только на основе глобальной систематики, поскольку экспериментальные данные о плотности нейтронных резонансов имеются для сравнительно малого числа ядер. В этом случае единственной моделью, которую можно использовать без необходимости индивидуальной верификации параметров, является обобщенная сверхтекучая модель ядра, имеющая физически корректные параметры, возможность хорошей систематизации параметра плотности уровней и извлечения эффективной поправки на четно-нечетные различия независимо от наличия данных о плотности нейтронных резонансов. Таким образом удастся подготовить наборы параметров плотности уровней в ОСМ ядер, для которых имеется экспериментальная схема дискретных уровней.

**Содержание библиотеки.** Третья версия библиотеки ADL содержит функции возбуждения реакций  $(n, \gamma)$ ,  $(n, n')$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, d)$ ,  $(n, t)$ ,  $(n, h)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, n'p)$ ,  $(n, n'\alpha)$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, 2p)$ ,  $(n, n'd)$ ,  $(n, n't)$  и  $(n, 3n)$ . Всего в библиотеку включено 18200 реакций, в том числе на короткоживущих и изомерных ядрах-мишенях. Сечения пороговых реакций вычислены по соотношениям Хаузера—Фешбаха—Молдауэра с учетом вклада неравновесных процессов [6, 7]. В расчетах использованы подготовленные для этой цели библиотеки параметров моделей, схем дискретных уровней и энергии связи ядер [11].



Р и с. 4. Описание выхода изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  (2,446 МэВ,  $16^+$ ) в реакции  $^{179}\text{Hf}(n, 2n)$ :  $\circ$  — эксперимент

Сравнение результатов с экспериментальными данными и данными других библиотек показывает, что применение использованного подхода оправдано высоким качеством получаемых сечений. В некоторых случаях, когда анализ показывал целесообразность этого, авторы использовали оценки других библиотек.

**Заключение.** В работе приведено краткое описание третьей версии библиотеки активационных данных ADL-3. В библиотеке содержатся более 18 тыс. функций возбуждения реакций, вызванных нейтронами энергией до 20 МэВ. Оценки сечений выполнены с использованием расчетов по строгим теоретическим моделям. Показано, что упрощенные методы расчета при создании современных версий библиотек сечений неприемлемы. Авторы не приводят сравнение полученных сечений с оцененными данными других библиотек и с экспериментальными данными, полагая это предметом следующей статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Activation cross-sections for the generation of long-lived radionuclides importance in fusion reactor technology. — In: Proc. IAEA Consultants' Meet. held by Argonne National Laboratory, Argonne, USA, 11—12 Sept. 1989. Rep. INDC (NDS)-232/L, 1990.
2. Грудзевич О.Т., Зеленецкий А.В., Пашенко А.Б. О перспективах развития библиотеки ядерно-физических данных для расчета активаций и трансмутаций: Препринт ФЭИ-2058, 1989.
3. Грудзевич О.Т., Зеленецкий А.В., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б. Нейтронные реакции на ядрах в изомерных состояниях: Препринт ФЭИ-2305, 1993.
4. Грудзевич О.Т., Зеленецкий А.В., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б. Согласованное описание выходов изомеров в нейтронных реакциях: Препринт ФЭИ-2307, 1993.
5. Kopecky J., Nierop D. Contents of EAF-3/ECN-1-91-53.
6. Uhl M., Stromaier B. Vienna, 1976, IRK 76/01.
7. Grudzevich O.T., Ignatyuk A.V., Manokhin V.N., Pashchenko A.B. Vienna, 1986, INDC (NDS)-193/L, p. 81—84.
8. Badikov S.A. e.a. Cross section evaluations for activation data library. — In: Nuclear Data for Science and Technology, 1992, p. 800.
9. Bersilon O. CEA-N-2227, 1981.
10. Grudzevich O.T., Zelenetsky A.V., Ignatyuk A.V. e.a. Nuclear Data for Science and Technology. — In: Proc. Intern. Conf., Mito, Japan, JAERI, 1988, p. 767.
11. Грудзевич О.Т., Зеленецкий А.В., Пашенко А.Б. Библиотека исходных данных для теоретических расчетов сечений ядерных реакций: Препринт ФЭИ-2306, 1993.

Поступила в Редакцию 3 11.93

УДК 539.12.621.039

#### ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ РЕАКТОРА НЕЙТРИННЫМ МЕТОДОМ

*Клизов Ю.В., Копейкин В.И., Микаэлян Л.А., Озеров К.В., Синев В.В.  
(Институт общей и ядерной физики РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Впервые вопрос об использовании нейтринного излучения реакторов был поставлен в середине 70-х годов [1, 2], а с пуском нейтринной лаборатории на Ровенской АЭС выполнены первые демонстрационные измерения и на небольшой статистике показана принципиальная возможность практического применения нейтринного излучения [3, 4].

Недостаток статистики и большой фон постороннего излучения всегда были основным препятствием при регистрации реакторных антинейтрино ( $\bar{\nu}_e$ ). Представленный в настоящей работе прибор — Ровенский нейтринный спектрометр [5] частично решил эти проблемы. Расположенный в нейтринной лаборатории, он предназначен для решения как фундаментальных, так и прикладных задач. В настоящей работе он