

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брохович Б.П., Овчинников Ф.Я., Клименков В.И. и др. Разборка опытного уран-графитового реактора для получения изотопов после его четырехлетней эксплуатации. Докл. советских ученых. Труды 2-й Межд. конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958), 1959, с. 319.
2. Колобашкин В.М. и др. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Круглов А.К., Рудик А.П. Реакторное производство радиоактивных нуклидов. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Занков Ю.Н., Кватор В.М., Мясников С.В., Попыкин А.Н. Примеры расчета выгорания ячейки РБМК по программе WIMS- D4. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1984, вып. 8(45), с. 11.

Поступила в Редакцию 8.06.94

УДК 539.173

СЕЧЕНИЕ ФОТОДЕЛЕНИЯ ^{231}Pa

Солдатов А.С., Рудников В.Е., Смиренин Г.Н. (ГНЦ РФ — ФЭИ)

В настоящей работе приводятся результаты измерения выхода и сечения фотоделения ^{231}Pa в области энергии 7—9 МэВ, являющегося продолжением аналогичных измерений, выполненных для диапазона энергии γ -квантов 4,8—7 МэВ [1]. Обработке подвергалась вся совокупность экспериментальных данных, в которой объединены результаты, полученные в настоящей работе и работе [1].

Измерения, как и в работе [1], проводили на выведенном пучке электронов микротрона ФЭИ. Для генерации тормозного излучения использовали мишень в виде вольфрамового диска толщиной 1 мм с алюминиевым поглотителем прошедших сквозь вольфрам электронов. При таком источнике γ -излучения, имеющем сплошной спектр $N(E, E_{\max})$, измеряется не сечение $\sigma_f(E)$, а выход фотоделений

$$Y(E_{\max}) = C \int_0^{E_{\max}} \sigma_f(E) N(E, E_{\max}) dE, \quad (1)$$

где $E_{\max}$ — граничная энергия тормозного излучения; C — множитель, определяемый количеством ядер в делящейся мишени, расстоянием от нее до источника γ -излучения в тормозной мишени [2]. Решение уравнения (1) с экспериментальной левой частью относится к классу некорректно поставленных задач, и для его нахождения применяли метод минимизации направленного расхождения [3].

В настоящей работе, как и во всех последних работах по изучению сечений фотоделения (см., например, работу [2]), использовали относительный метод измерений, в котором определяется не выход $Y(E_{\max})$ фотоделений исследуемого ядра, а его отношение к выходу $Y_0(E_{\max})$ фотоделений ядра, являющегося стандартом: $R(E_{\max}) = Y(E_{\max})/Y_0(E_{\max})$.

Стандартом служило сечение фотоделения $\sigma_f^0(E)$ ядра ^{238}U , известное лучше, чем у других ядер. Оценка $\sigma_f^0(E)$, которой пользовались, дана в работе [2]. Зная сечение $\sigma_f^0(E)$ и спектр γ -квантов $N(E, E_{\max})$ [4], $R(E_{\max})$ легко привести к уравнению (1), о решении которого уже говорилось (см. также работу [2]). В соответствии с требованиями относительных измерений делящиеся мишени в виде оксидных слоев ^{231}Pa и ^{238}U толщиной 0,33 и 0,74 мг/см² соответственно на тонких алюминиевых подложках

располагали вплотную одна к другой. Параллельно им размещали трековые детекторы из телевизионной слюды, регистрирующие осколки деления. Для «взвешивания» делящиеся мишени в той же геометрии облучали моноэнергетическими нейтронами, для которых сечения деления обоих изотопов известны намного лучше, чем для реакции (γ, f) .

Отношения выходов $R(E_{\max})$, полученные в настоящем эксперименте и работе [1], показаны на рис. 1, а. На рис. 1, б показаны сечения фотodelения $\sigma_f(E)$, полученные в результате решения уравнения (1) по методу [3] для единой зависимости $R(E_{\max})$ от 5 до 9 МэВ. Значения $\sigma_f(E)$ на рис. 1 немного отличаются от приведенных в работе [1] вследствие расширения энергетического диапазона, уточнения сечения стандарта, других улучшений обработки экспериментальных данных [2].

Для того чтобы иметь возможность сравнить результаты с данными исследования деления ^{231}Pa в реакции $^{230}\text{Th}(^3\text{He}, df)$ [5, 6], на рис. 2 сечение фотodelения было представлено в виде делимости $P_f(E) = \sigma_f(E)/\sigma_c(E)$ с сечением фотопоглощения $\sigma_c(E)$, основанным на результатах работы [7], поскольку делимость гораздо слабее зависит от индивидуальных особенностей входного канала, в том числе от энергетической зависимости сечения образования составного ядра разных реакций. Экспериментальные данные о $\sigma_c(E)$ для большой группы ядер,

среди которых, правда, нет ^{231}Pa , в области $E = 9\text{--}18$ МэВ аппроксимировались суммой двух лоренцианов [7], значения параметров которых позволило получить требуемую зависимость при $E < 9$ МэВ. Для нахождения фотodelимости $P_f(E)$ использовали значения $\sigma_c(E)$ для ядра ^{232}Th [7], наиболее близкого по нуклонному составу к ^{231}Pa .

Из рис. 2 следует, что фотodelимость ^{231}Pa на низкоэнергетическом участке до энергии связи нейтрона $B_n = 6,82$ МэВ хорошо согласуется с результатами более раннего измерения делимости реакции $^{230}\text{Th}(^3\text{He}, df)$ [5], специально посвященного исследованию этой области энергии. Лишь на границе исследованного в этой работе диапазона энергии $E > 6,9$ МэВ наши результаты отклоняются от данных [5] и приближаются к результатам работы [6], измерения в которой проведены до 10,5 МэВ и, скорее, посвящены именно высокоэнергетическому участку. Данные работ [5] и

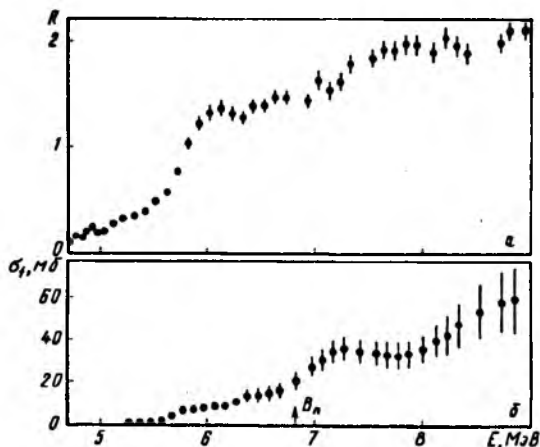


Рис. 1. Отношения выхода $R(E_{\max})$ фотodelения ядер ^{231}Pa и ^{238}U и сечение $\sigma_f(E)$ реакции $^{231}\text{Pa}(\gamma, f)$

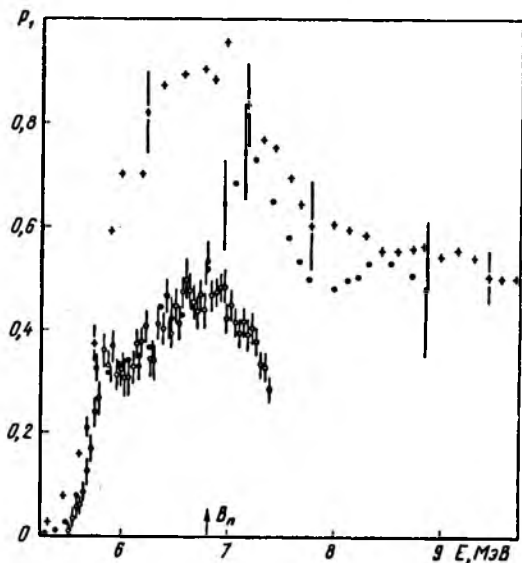


Рис. 2. Делимость реакций $^{230}\text{Th}(^3\text{He}, df)$ и $^{231}\text{Pa}(\gamma, f)$: $\circ$ — [5], $+$ — [6], $\bullet$ — настоящая работа;

[6] в перекрывающемся диапазоне энергии не менее чем в 2 раза различаются, и это расхождение нельзя объяснить погрешностью измерений, которая в работе [6] составляет 10%. При $E > 7,5$ МэВ фотоделимость ^{231}Pa находится в среднем на уровне $P_f = 0,5 \pm 0,03$, на который выходит и быстро уменьшающаяся при $E > B_n$ делимость из работы [6]. $P_f = 0,5$ согласуется с систематиками отношений средней нейтронной и делительной ширины [7, 8] $\Gamma_n/\Gamma_f = P_f^{-1} - 1$, использующими предположение $P_f = \text{const}$, $\Gamma_n/\Gamma_f = \text{const}$, традиционное для области плато делимости $8 \leq E \leq 12$ МэВ.

Ядро ^{231}Pa принадлежит к группе ядер, для которой характерны эффекты торисвой аномалии вероятности и барьеров деления [9]. Резонансная структура (см. рис. 2), наблюдаемая в результатах исследований энергетической зависимости вероятности деления ^{231}Pa в реакциях $^{230}\text{Th}(^3\text{He}, d/f)$ и $^{231}\text{Pa}(\gamma, f)$, по-видимому, является одним из проявлений общих особенностей деления ядер этой группы. Как и у ^{232}Th , при фотоделении ^{231}Pa помимо подбарьерных резонансов в районе наблюдаемого порога (теоретическая оценка [10] — $\sim 7,5$ МэВ) при $E = 7,2$ МэВ наблюдается широкий резонанс. Для понимания его природы, как и в случае ^{232}Th [11], можно привлечь соображения о слабом затухании вибрационных резонансов в мелкой третьей яме, образовавшейся в результате расщепления внешнего горба B двугорбого потенциального барьера деления.

В работе [12] на основании делимости $P_f(E)$ реакции $^{230}\text{Th}(^3\text{He}, d/f)$ [6] была оценена показанная на рис. 3 энергетическая зависимость сечения деления ^{230}Pa нейтронами $\sigma_f(E_n) = \sigma_c(E_n)P_f(E_n + B_n)$, где $\sigma_c(E_n)$ — сечение образования составного ядра быстрыми нейтронами, принимавшееся равным 3,1 б независимо от энергии нейтронов $E_n = E - B_n$ в интервале 0,5—6 МэВ. Точно таким же образом с использованием полученной в настоящей работе фотоделимости ^{231}Pa оценено сечение деления ^{230}Pa нейтронами. Наша оценка в среднем на 20% ниже оценки [12].

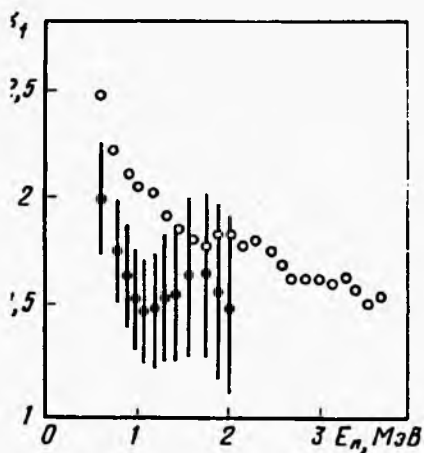


Рис. 3. Сечение деления $^{230}\text{Pa}(n, f)$, оцененное по экспериментальным данным настоящей работы в области энергии нейтронов 0,5—2 МэВ (●) и полученное пересчетом данных реакции $^{230}\text{Th}(^3\text{He}, d/f)$ [12] (○) (в ошибки сечений деления нейтронами включены только ошибки определения сечений фотоделения ^{231}Pa [2])

Таким образом, на тормозном спектре пучка электронов микротрона измерен выход реакции $^{231}\text{Pa}(\gamma, f)$ относительным методом с сечением фотоделения ^{238}U в качестве стандарта. Наряду с выполненными ранее измерениями [1] они позволили в едином уточненном подходе [2] восстановить сечение фотоделения ядра ^{231}Pa в широкой окрестности порога деления $E = 5$ —9 МэВ. Сравнение оцененной здесь фотоделимости ^{231}Pa с делимостью того же ядра в прямой реакции $^{230}\text{Th}(^3\text{He}, d/f)$ [5, 6] показало, что она лучше согласуется в непосредственной близости порога $E < 6,8$ МэВ с результатами [5], в среднем в 2 раза расходясь с результатами [6]. При более высокой энергии фотоделимость сближается с результатами делимости работы [6]. В тех же предположениях, что и в работе [12], оценены сечения деления ядра ^{230}Pa нейтронами в области энергии нейтронов 0,5—2 МэВ. Наша оценка в среднем на 20% ниже оценки по данным из прямой реакции $^{230}\text{Th}(^3\text{He}, d/f)$ [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдатов А.С., Рудников В.Е., Александрова З.А. и др. Фотоделение ^{230}Pa в районе порога. — Ядерная физика, 1987, т. 46, с. 695—699.
2. Солдатов А.С., Смиренкин Г.Н. Выход и сечение деления нечетных ядер γ -квантами с энергией до 11 МэВ. — Ядерная физика, 1992, т. 55, с. 3153—3168.
3. Тараско М.З. Метод минимизации направленного расхождения в задачах поиска распределений: Препринт ФЭИ-1446, 1983.
4. Тараско М.З., Солдатов А.С., Рудников В.Е. Описание спектров тормозного излучения из толстой мишени для электронов энергией 4—12 МэВ. — Атомная энергия, 1988, т. 65, вып. 4, с. 290—291.
5. Back B., Hansen O., Britt H. Experimental fission barriers for actinide nuclei. — In: Proc. of the third IAEA Symp. on the Physics and Chemistry of Fission. Rochester, New York, 1973. Vienna: IAEA, 1974, v. 1, p. 3—23.
6. Gavron A., Britt H., Konecny E. Γ_n/Γ_f for actinide nuclei using ($^3\text{He}, d/f$) and ($^3\text{He}, t/f$) reactions. — Phys. Rev., 1976, v. C13, p. 2374—2383.
7. Caldwell J., Dowdy E., Berman B. e.a. Giant resonance for the actinide nuclei: photoneutron and photofission cross section for ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U and ^{232}Th . — Ibid., 1980, v. C21, p. 1215—1230.
8. Истеков К.К., Куприянов В.М., Фурсов Б.И., Смиренкин Г.Н. О применимости традиционных систематик. — Ядерная физика, 1979, т. 29, с. 1156—1170.
9. Bjornholm S., Lynn J. The double-humped fission barrier. — Rev. Mod. Phys., 1980, v. 52, p. 725.
10. Howard W., Moller P. Calculated fission barriers, ground-state masses, and particle separation energies for nuclei with $76 \leq Z \leq 100$ and $140 \leq N \leq 184$. — Atomic. Data and Nucl. Data Tables, 1980, v. 25, p. 219—285.
11. Солдатов А.С., Смиренкин Г.Н. Выход и сечение деления ^{232}Th и ^{236}U γ -квантами с энергией до 10 МэВ. — Ядерная физика, 1995, т. 58, с. 32—37.
12. Britt H., Wilhelmy J. Simulated (n, f) cross sections for exotic actinide nuclei. — Nucl. Sci. Engng, 1979, v. 72, p. 222.

Поступила в Редакцию 24.03.95

УДК 621.039.586

ОЦЕНКА РАДИОАКТИВНОГО ВЫБРОСА ПРИ АВАРИИ 1986 г. НА 4-м ЭНЕРГООБЛОКЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС (обзор первичных материалов)

Сивинцев Ю.В., Хрулев А.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Непосредственно после получения первых сведений об аварии на Чернобыльской АЭС в ИАЭ им. И.В. Курчатова были образованы группы экспертов, занятых ее анализом, которые позднее получили официальный статус по особому распоряжению президента АН СССР. Группе, в которую входили авторы этого доклада, а также О.Я. Шах, была поручена оценка активности, состава и динамики радиоактивного выброса из аварийного энергоблока по расчетным, экспериментальным и натурным данным.

Все приведенные ниже оценки выполнены в мае—июне 1986 г. [1—6]. Результаты анализов оперативно сообщались руководству Института, в Президиум АН СССР, Правительственную комиссию, Политбюро ЦК КПСС [4, 5]. Они явились основой для соответствующего раздела доклада об этой аварии, представленного в июле 1986 г. советскими экспертами в МАГАТЭ [7].

Объективная оценка параметров выброса продуктов деления и топлива из аварийного реактора возможна только в случаях, когда известны следующие параметры: активность радионуклидов, накопленных в активной зоне; характер и динамика развития аварии; состояние топлива и реактора в целом; регион (зона) распространения и состав радиоактивных выпадений.

Особая сложность возникшей ситуации была обусловлена крайней скудостью исходной информации. Были доступны лишь расчетные данные об активности радио-