

11. Колесов В.Ф., Малинкин А.А. Авт. свид. 786619, МКИ G21C1/28. Двухкаскадный умножитель нейтронов. — Бюллетень изобретений, 1991, № 30, с. 240.
12. Колесов В.Ф., Малинкин А.А. Кинетика двухсекционного бустер-реактора с асимметричной нейтронной связью между секциями. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 4, с. 10—23.
13. Колесов В.Ф. Способы управления двухсекционными импульсными реакторами на основе инвариантов реакторной кинетики. — Там же. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1986, вып. 1, с. 14—25.
14. Kolesov V.F., Malinkin A.A. Two-section pulsed reactor with asymmetrical neutron coupling between sections. — In: Proc. on Intern. Workshop on Pulsed Advanced Neutron Sources «Pulsed Nuclear Reactors: new Capabilities for Scientific Research». Dubna, 25—27 June 1991.
15. Павловский А.И., Малинкин А.А., Колесов В.Ф. и др. Двухсекционный бустер-реактор «Каскад» (БР-К). — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1992, вып. 3, с. 3—11.
16. Босамыкин В.С., Кошелев А.С., Герасимов А.И. и др. Высокоинтенсивный источник нейтронов на базе мощного ускорителя электронов ЛИУ-30 и импульсного ядерного реактора БР-1. — In: Advanced pulsed neutron sources: Physics of/at advanced pulsed neutron sources, PANS-2, 14—17 June 1994; Дубна, ОИЯИ, 1995, с. 114—121.
17. Griffin P., Miller J., Harms G. e.a. Design trade-off study for a large volume short pulse neutron assembly. — In: Physics, Safety and Applications of Pulse Reactors. Proc. Intern. Topical Meeting on Physics, Safety and Applications of Pulse Reactors. Washington, Nov. 13—17, 1994, p. 292—299.
18. Кожевников Д.А., Чеканова С.С. Замедляющая способность неупругих рассеивателей нейтронов. — Атомная энергия, 1969, т. 26, вып. 4, с. 334—337.
19. Босамыкин В.С., Малинкин А.А., Колесов В.Ф. и др. Конструкция и физико-технические характеристики бустер-реактора БР-К1. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996, вып. 1, с. 3—12.
20. Sanford T., Lorence L., Halbleib J. e.a. Photoneutron production using bremsstrahlung from the 14-TW pulsed-power HERMES III electron accelerator. — Nucl. Sci. Engng, 1993, v. 114, № 3, p. 190—213.

Поступила в Редакцию 23.01.98

УДК 539.173

ПРОБЕГ ПРОДУКТОВ С $A = 131—136$ ПРИ ДЕЛЕНИИ ^{237}Np , ^{243}Am РЕАКТОРНЫМИ, ^{233}U , ^{235}U И ^{239}Pu ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Теплых В.Ф., Платыгина Е.В., Петржак К.А.

(Санкт-Петербургский государственный технологический институт)

Кинетическую энергию осколков деления ядер измеряют, применяя как полупроводниковые детекторы или времяпролетную технику [1—4], так и метод определения их длины пробега в поглощающих средах [5—8]. Последний подход наиболее пригоден для определения кинетической энергии осколков, образующихся при симметричном делении тяжелых ядер, когда количество таких событий мало по сравнению с асимметричным делением.

В большей части ранее выполненных исследований надежно измерен пробег радиоактивных продуктов, имеющих приемлемые периоды и хорошо известные схемы распада и, кроме того, не экранированных долгоживущими или стабильными предшествующими нуклидами. Наряду с этим нет работ, в которых была бы измерена длина пробега продуктов массовых цепочек с $A = 134$ и 136 . Так, при делении ^{235}U тепловыми нейтронами был выявлен аномально низкий (на 10—12% меньше пробега близлежащих по массе продуктов) пробег ^{136}Cs и ^{86}Rb в металлическом уране [7]. Однако эта аномалия при измерении кинетической энергии осколков инструментальными методами [1, 4] не подтвердилась.

Интерес к исследованию свойств осколков в этой области массы обусловлен еще и тем, что для большинства четно-четных и некоторых нечетных делящихся ядер при низкой и средней энергии возбуждения наблюдается повышенный выход для $A = 134$ и заниженный для $A = 136$, что проявляется как тонкая структура кривой массового распределения [9, 10].

Для получения экспериментальной информации о пробегах продуктов деления использована техника тонких многослойных мишеней, аналогичная описанной в работе [5]. Трехслойная мишень состояла из алюминиевой подложки со слоем делящегося вещества толщиной $(0,7—1,7)10^{-4}$ г/см², на который был наложен алюминиевый фильтр толщиной 1,5, 2,2 или 2,8 мг/см². Фильтр, в свою очередь, покрывали алюминиевой фольгой толщиной 2,8—3 мг/см². Свернутые в цилиндр мишени помещали в кварцевые ампулы, которые затем запаивали в вакууме.

Мишени облучали в каналах ВВРМ Института ядерной физики. Мишени с ²³³U, ²³⁵U и ²³⁹Pu облучали в каналах с кадмиевым отношением ~ 50 при плотности потока тепловых нейтронов $5 \cdot 10^{13}$ с⁻¹·см⁻². Контейнеры с мишенями, содержащими ²³⁷Np, ²⁴³Am, помещали в кадмиевые чехлы с толщиной стенки 0,5 мм и облучали в каналах с низким кадмиевым отношением. После облучения и выдержки, необходимой для накопления конечных продуктов распада, мишень разделяли на составляющие ее части (подложку, фильтр и алюминиевую фольгу), каждую из которых в вакууме запаивали в кварцевую ампулу. При нагреве ампул до температуры плавления алюминия образовавшиеся стабильные изотопы ксенона выделялись в объем ампулы.

Анализ изотопного состава изотопов ксенона был проведен на масс-спектрометре МИ-1201М. Погрешность измерения относительного изотопного содержания составила в зависимости от количества анализируемого материала от 0,1 до 0,7%.

Основная задача исследования — оценка средней длины пробега и кинетической энергии продуктов деления с $A = 131—136$. Результаты получены на основе данных масс-спектрометрического анализа изотопного состава ксенона. В качестве опорной величины использован пробег R_1 в алюминии продукта с $A = 131$, рассчитанный по известной кинетической энергии первичных осколков [1—3] с учетом испарения нейтронов [11] по формуле, связывающей кинетическую энергию E и пробег R осколка [6]:

$$R = kE^{2/3}. \quad (1)$$

При этом для области $A = 131—137$ коэффициент $k = 0,18 \pm 0,002$ мг/(см²·МэВ^{2/3}) был оценен минимизацией стандартного отклонения при подстановке в эту формулу известных [1—3, 5—8] значений пробега и энергии осколков различных делящихся систем.

Найденный таким образом пробег продуктов с $A = 131$ и соответствующие отношения содержания i -го изотопа ксенона к ¹³¹Xe использовали для расчета пробега продуктов i -й массовой цепочки (табл. 1) по соотношению $R_i = R_1(Y_i^k/Y_i^f) + [1 - (Y_i^k/Y_i^f)](h_f + \Delta h)$. Здесь Y_i^k , Y_i^f — измеренное масс-спектрометрическим методом отношение содержания i -го изотопа ксенона к ¹³¹Xe в алюминиевой фольге и фильтре толщиной h_f соответственно; $\Delta h = 0,5\rho C$ — поправка на толщину слоя делящегося вещества ρ , мг/см²; $C = 1,4$ — эмпирический коэффициент [6] для перевода слоя делящегося вещества в эквивалентную толщину алюминия.

При сопоставлении результатов с имеющейся информацией [5—8] о пробегах продуктов тех же или соседней массы видно, что они согласуются между собой и, кроме того, наши данные заполняют имевшийся ранее пробел для цепочек $A = 134$ и 136 . Данные о пробегах продуктов с $A = 132, 134, 136$ при делении ²³⁷Np и ²⁴³Am реакторными нейтронами представлены впервые.

По измеренным значениям пробега с помощью соотношения (1) была рассчитана средняя кинетическая энергия продуктов E_p , затем с учетом испаренных нейтронов оценена начальная кинетическая энергия фрагментов $E_\phi = E_p(A_p + \nu_A)/A_p$, где A_p — массовое число продукта; ν_A — среднее число нейтронов, испускаемых первичным осколком.

Для делящихся ядер ^{234}U , ^{236}U и ^{240}Pu использовали кривые зависимости эмиссии нейтронов от A осколка, представленные в работе [11]. Кривая эмиссии нейтронов для деления ^{239}Pu тепловыми нейтронами была применена для коррекции первичной массы осколков деления ^{237}Np и ^{243}Am реакторными нейтронами.

Как видно из табл. 1—3, сколько-нибудь заметной аномалии в пробеге и кинетической энергии продуктов и осколков не обнаружено, что согласуется с кинетической энергией осколков, измеренной инструментальными методами [1—3]. Как считают авторы [7], небольшую часть заниженного значения пробега ^{136}Cs можно объяснить большим (на 2, 3 ед.) зарядом ядра $Z = 55$ по сравнению с наиболее вероятным зарядом этой массовой цепочки. Поскольку потери энергии при торможении пропорциональны $Z^{1/2}/A$ [12], увеличение заряда обуславливает некоторое уменьшение пробега этого нуклида. Основным же фактором, по-видимому, следует считать особенности структуры ядра ^{136}Cs : недовысвобождение одного нейтрона до замкнутой нейтронной оболочки $N = 82$ обуславливает большую деформацию этого фрагмента и всей делящейся системы на предразрывной стадии, т.е. большее расстояние между центрами зарядов назревающих осколков. Это в свою очередь приводит к уменьшению начальной кинетической энергии по сравнению с менее деформированными соседями. Аналогичное объяснение подходит и к ^{86}Rb , у которого также не хватает одного нейтрона до заполнения оболочки $N = 50$. Измеренный пробег [7] этого нуклида также примерно на 10% меньше близких по массе продуктов деления.

Т а б л и ц а 1. Пробег в алюминии продуктов с $A = 131—136$ при делении ^{237}Np , ^{243}Am реакторными, ^{233}U , ^{235}U и ^{239}Pu тепловыми нейтронами, мг/см²

Продукт	^{234}U		^{236}U		^{240}Pu		^{238}Np	^{244}Am
	Настоящая работа	[8]	Настоящая работа	[6]	Настоящая работа	[8]	Настоящая работа	Настоящая работа
^{131}I				3,37±0,02		3,43±0,04		
^{131}Xe	3,31		3,32		3,44		3,36	3,47
^{132}Te		3,26±0,02				3,32±0,04		
^{132}Xe	3,27±0,01		3,29±0,01		3,42±0,01		3,34±0,01	3,43±0,01
^{133}Xe						3,4±0,02		
^{134}Xe	3,21±0,02		3,22±0,01		3,37±0,01		3,30±0,02	3,36±0,02
^{135}Xe		3,21±0,03				3,37±0,02		
^{136}Xe	3,11±0,02		3,14±0,02		3,30±0,02		3,24±0,03	3,29±0,03

Т а б л и ц а 2. Начальная кинетическая энергия осколков при делении ^{233}U и ^{235}U тепловыми нейтронами, МэВ

Первичный осколок, а.е.м.	^{234}U		Первичный осколок, а.е.м.	^{236}U	
	Настоящая работа	[1]		Настоящая работа	[1]
131,4	79,0	79,0	131,3	79,5	79,5
132,5	77,8	77,5	132,4	78,3	77,8
134,7	75,5	75,5	134,6	76,2	76,0
137,0	72,4	72,4	136,8	73,2	72,5

Т а б л и ц а 3. Начальная кинетическая энергия осколков
при делении ^{237}Np , ^{243}Am реакторными, ^{239}Pu тепловыми нейтронами, МэВ

Первичный осколок, а.е.м.	^{238}Np		^{240}Pu		^{244}Am	
	Настоящая работа	[3]	Настоящая работа	[1]	Настоящая работа	[2]
131,5	81,0	81,0	84,0	84,0	85,0	85,0
132,7	80,5	79,0	83,2	83,3	83,7	84,0
134,9	79,0	78,0	81,5	81,0	81,4	82,3
137,2	77,2	76,0	79,4	77,6	78,8	80,6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hakoda T., Miyuchi T., Watanabe S. e.a. Fragment Mass and Kinetic Energy Distributions in the Fission of Actinide Nuclei Measured by the Double-Energy Method. Progress report. Japaness Nuclear Data Committe, INDC(JPN)-172/U, August 1994, p. 76—79.
2. Говердовский А.А., Митрофанов В.Ф., Хрячков В.А. Структура массово-энергетического распределения осколков деления ^{243}Am быстрыми нейтронами. — Ядерная физика, 1995, т. 58, № 11, с. 1948—1954.
3. Bennett M., Stein W. Kinetic energy of fragments from seven fission reactions at low excitation energies. — Phys. Rev., 1967, v. 156, p. 1277.
4. Müller R., Naqvi A., Kappeler F., Dickmann F. Fragment velocities, energies and masses from fast neutron induced fission of ^{235}U . — Phys. Rev. C, 1984, v. 29, № 3, p. 885—905.
5. Ramaswami A., Prakash S., Manohar S. e.a. Kinetic-energy distributions in the reactor neutron fission of ^{232}U and thermal neutron fission of ^{241}Pu and ^{245}Cm . — Ibid., 1977, v. 16, № 2, p. 716—720.
6. Alexander J., Gazdik M. Recoil properties of fission products. — Phys. Rev., 1960, v. 120, № 3, p. 874.
7. Niday J. Radiochemical study of the ranges in metallic uranium of the fragments from thermal neutron fission. — Phys. Rev. C, 1961, v. 121, № 5, p. 1471.
8. Prakash S., Manohar S., Dange S. e.a. Kinetic-energy distributions in the thermal neutron fission. — J. Inorg. Nucl. Chem., 1972, v. 34, № 9, p. 2685—2697.
9. Петржак К.А., Платыгина Е.В., Теплых В.Ф. и др. Исследование тонкой структуры выходов осколков при фотоделении и делении быстрыми нейтронами тяжелых ядер. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1977, вып. 24, с. 15—19.
10. Schmitt H., Neiler J., Walter F. Fragment energy correlation measurements for ^{252}Cf spontaneous fission and ^{235}U thermal-neutron fission. — Phys. Rev. C, 1966, v. 141, № 3, p. 1146—1160.
11. Apalin W., Grutsyuk Yu., Kutikov I. e.a. Neutron emission from ^{233}U , ^{235}U and ^{239}Pu fission fragments. — Nucl. Phys., 1965, v. 71, p. 553—560.
12. Alexander J., Gazdin M., Trips A., Wasit S. Kinetic energy realease in 23 MeV deuteron fission of ^{238}U . — Phys. Rev. C, 1963, v. 129, № 6, p. 2659.

Поступила в Редакцию 4.03.98

УДК 621.039.58'68

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ТОПЛИВА В ПОДАППАРАТНОМ ПОМЕЩЕНИИ 305/2 4-го ЭНЕРГБЛОКА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Боровой А.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Лагуненко А.С. (МНТЦ «Укрытие»),
Пазухин Э.М. (НПО «Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина»)

Оценка количества топлива в разрушенном 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС является одной из основных при определении состояния его ядерной, радиационной и экологической безопасности [1]. В процессе многочисленных обсуждений и дискуссий 1986—1996 гг. выяснилось, что есть, по крайней мере, три оценки количества топлива, удовлетворительно совпадающие между собой, и одна, резко от них отличающаяся в меньшую сторону. В последнее время установлены новые факты, которые подтверждают первые, совпадающие оценки. Обсуждение этих фактов и есть цель предлагаемой статьи.