

Стандартные справочные данные по ядерно-физическим характеристикам альфа-излучающих радионуклидов ^{226}Ra , ^{233}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu

В. П. ЧЕЧЕВ

В качестве проекта стандартных справочных данных представлены оцененные значения периода полураспада, энергии и абсолютной вероятности эмиссии альфа-частиц для радионуклидов, входящих в состав образцовых спектрометрических источников альфа-излучения: ^{226}Ra с дочерними продуктами распада, ^{233}U , ^{238}Pu и ^{239}Pu . Рекомендуемые значения получены на основе анализа и отбора опубликованных оцененных и экспериментальных данных (до декабря 2000 г.).

The evaluated values of half-life, alpha particles energies and absolute emission probabilities for radionuclides forming part of the Russian Reference Spectrometric Alpha — Sources ^{226}Ra with daughter decay products, ^{233}U , ^{238}Pu and ^{239}Pu are presented as the draft of the Certified Reference Data (CRD). The recommended values of CRDs have been obtained using an analysis and selection the evaluated and experimental results published up to December 2000.

Для калибровки альфа-спектрометрической и радиометрической аппаратуры в России и ближнем зарубежье широко используют комплекты образцовых спектрометрических источников альфа-излучения (ОСАИ) на основе радионуклидов ^{226}Ra с дочерними продуктами распада, ^{233}U , ^{238}Pu и ^{239}Pu . Паспортизация этих калибровочных источников должна включать стандартные справочные данные (ССД) по ядерно-физическим характеристикам (ЯФХ) радионуклидов, входящих в их состав. Однако существующие сейчас для радионуклидов ОСАИ документы [1] в значительной степени устарели. Поэтому актуальным является создание новых таблиц стандартных справочных данных по характеристикам радионуклидов, входящих в состав ОСАИ. Решению этой задачи посвящена данная статья. В ней представлен проект новых ССД, которые должны заменить ГСССД-103—87. Проект новых ССД в апреле 2001 г. рекомендован Межведомственной комиссией по аттестации стандартных и справочных данных

к утверждению в Госстандарте России. Кроме таблицы ССД, в статье изложена процедура получения оцененных значений периода полураспада, энергии и абсолютной вероятности эмиссии альфа-частиц, которые предлагается принять в качестве стандартных справочных данных.

Рекомендуемые в качестве ССД значения получены в большинстве случаев на основе международного файла ENSDF—2000 [2] с привлечением дополнительного анализа и оценки в тех случаях, когда в литературе имеются новые экспериментальные данные, не учтенные в ENSDF.

Номенклатура радионуклидов для разработки стандартных справочных данных по ядерно-физическим характеристикам выбрана на основе известного состава использующихся в настоящее время комплектов образцовых спектрометрических источников альфа-излучения. Она включает ^{226}Ra с дочерними продуктами распада (^{222}Rn , ^{218}Po , ^{218}At , ^{214}Po , ^{210}Po), ^{233}U , ^{238}Pu и ^{239}Pu .

Список характеристик включает период полураспада, энергии и абсолютные вероятности эмиссии альфа-частиц (в процентах от числа распадов). Перечень групп альфа-частиц, рассмотренных для каждого радионуклида, ограничен альфа-излучением с абсолютной вероятностью эмиссии $P_\alpha > 0,05\%$ от числа распадов (для дочерних продуктов распада ^{226}Ra — числом альфа-частиц больше $0,05\%$ от числа распадов материнского нуклида $^{226}\text{Ra}^*$). В статье для каждого радионуклида указаны источники получения оцененных значений периода полураспада ($T_{1/2}$), энергии (E_α) и абсолютной вероятности эмиссии альфа-частиц (P_α).

Большинство оцененных значений, выбранных в качестве ССД, получены на основе оценок международной сети оценщиков данных ENSDF. Они позволяют провести упорядочение, систематизацию и компьютеризацию большого массива данных по структуре атомных ядер и ядерным реакциям, и содержат также оцененные значения основных характеристик радионуклидов, наиболее достоверные на определенный период времени. Недостатком этих оценок является их относительно медленная ревизия и обновление в связи с публикацией новых результатов измерений. Поэтому для радионуклидов ОСАИ мы выполнили анализ информации, опубликованной после выполнения оценок ENSDF, полученных соответственно для: ^{233}U [3] — в 1990 г., ^{210}Po [4] и ^{239}Pu [5] — в 1992 г., ^{218}Po [6] и ^{218}At [7] — в 1995 г., ^{214}Po , ^{222}Rn [8], ^{226}Ra [9] — в 1996 г., ^{238}Pu [10] — в 1988 г. На основе этого анализа скорректированы некоторые оцененные значения, в частности, P_α в распаде ^{239}Pu .

Энергии наиболее интенсивных альфа-групп взяты в основном из обзорной работы Ритца [11], в которой даны рекомендованные значения E_α на основе ревизованной энергетической шкалы. Энергии менее интенсивных альфа-групп вычислены по данным об энергии соответствующего гамма-излучения.

Ниже даны способы получения оцененных значений $T_{1/2}$, E_α и P_α для каждого из радионуклидов ОСАИ

^{226}Ra в равновесии с ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{218}At , ^{214}Po и ^{210}Po :

$T_{1/2}$ (^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{210}Po), P_α (^{226}Ra , ^{222}Rn) — оценка ENSDF [2];

E_α — из [2, 11], кроме E_α (^{226}Ra 4601 кэВ), которое рассчитано с использованием E_α (^{226}Ra 4784 кэВ) и $E_\gamma = 186,211$ (13) кэВ. Этот расчет приводит к более точному значению по сравнению с оцененным в ENSDF;

P_α (^{218}Po), P_α (^{218}At) в процентах от числа распадов материнского нуклида ^{226}Ra рассчитаны с использованием оцененных данных [2, 12] об интенсивности ветвей альфа- и бета-распада ^{218}Po : 99,980(2) и 0,020(2) %, соответственно.

P_α (^{214}Po) в процентах от числа распадов материнского нуклида ^{226}Ra рассчитано с использованием значения интенсивности ветви бета-распада $^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po}$ 99,979(1) % [2];

P_α (^{210}Po) в процентах от числа распадов материнского нуклида ^{226}Ra в равновесии рассчитано с использованием коэффициента 1,0141(3), определяющего отношение активности равновесного ^{210}Po к активности материнского нуклида ^{226}Ra [12]. Период полураспада ^{210}Pb принят равным 22,3(3) лет [2].

^{233}U :

$T_{1/2}$, E_α , P_α [2] — оценка ENSDF [2, 3].

^{238}Pu :

$T_{1/2}$ — оцененное значение принято по [13]. Оно получено как среднее взвешенное трех результатов лучших измерений, выполненных различными методами. Согласуется с оценкой ENSDF 87,7(1) лет [2, 10];

P_α — из [2], согласуется с оценками [13];

E_α — из [2, 11], кроме E_α (5456 кэВ), которое рассчитано с использованием E_α (5499 кэВ) и $E_\gamma = 43,498(1)$ кэВ [2]. Этот расчет приводит к более точному значению по сравнению с оцененным в ENSDF.

^{239}Pu :

$T_{1/2}$ — оцененное значение принято по [13]. Оно совпадает с независимыми оценками [14, 15] и согласуется с [2];

E_α (5156 кэВ) — из [2, 11]; E_α (5144 кэВ) и E_α (5105 кэВ) рассчитаны с использованием E_α (5156 кэВ) и, соответственно, $E_\gamma = 12,965(3)$ кэВ и $E_\gamma = 51,624(1)$ кэВ [2]. Этот расчет приводит к более точным значениям по сравнению с оцененными в ENSDF.

Значения P_α получены на основе экспериментальных данных [16]. Эти измерения были выполнены в 1992 г. кремниевым детектором с хорошим разрешением (9 кэВ), в низкой геометрии и с очень тонким источником очищенного ^{239}Pu . Они показали, что ранние измерения [17] относительной интенсивности этих альфа-групп, отличающихся по энергии на 12,3 кэВ, имеют систематическую погрешность, хотя сумма интенсивностей двух альфа-групп составляет в измерениях [16] те же 88 %, как и в измерениях [17, 18]. В оценках ENSDF [2, 5] и Ритца [11] не учтены данные [16], поэтому они отличаются от значений P_α (5156 кэВ) и P_α (5144 кэВ), рекомендуемых автором статьи в качестве ССД.

В таблице приведены стандартные справочные данные по периоду полураспада, энергии и абсолютной вероятности эмиссии альфа-частиц радионуклида ^{226}Ra с дочерними продуктами распада (^{222}Rn , ^{218}Po , ^{218}At , ^{214}Po , ^{210}Po), ^{233}U , ^{238}Pu и ^{239}Pu , входящие в состав образцовых спектрометрических источников альфа-излучения.

Для ^{226}Ra с дочерними нуклидами в таблице даны значения (P_α) абсолютной вероятности эмиссии альфа-частиц в процентах от числа распадов конкретного радионуклида и также число альфа-частиц на 100 распадов материнского нуклида ^{226}Ra в равновесии. Равновесие ^{226}Ra с дочерними ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{218}At , ^{214}Po устанавливается через 38 суток после изготовления незманирующего источника ^{226}Ra . Равновесие с ^{210}Po определяется периодом полураспада ^{210}Pb и наступает по прошествии 220 лет. Для расчета $P_\alpha(t)$ (^{210}Po) в любой момент времени t следует использовать следующую формулу [12]:

$$P_\alpha(t) = P_\alpha(\infty) [1 - 1,017 \exp(-0,03065t) + 0,0174 \exp(-1,829t)],$$

$$P_\alpha(\infty) = 1,01437(10),$$

где $t = 0$ соответствует первоначально чистому ^{226}Ra ; $t = \infty$ — равновесию; t — в годах.

Погрешности всех величин в таблице ССД даны в круглых скобках в единицах последней значащей цифры для доверительной вероятности 0,68 (1 σ). Эта погрешность в настоящее время принята для оценки ядерных данных. При паспортизации и применении ОСАИ часто используют доверительную вероятность $P = 0,95$ (2 σ). В этом случае погрешности ССД, приведенные в таблице, следует увеличить вдвое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведева С. А. и др. // Измерительная техника. — 1988. — № 10. — С. 42.

* Кроме ^{218}At , для которого приведены данные о трех группах альфа-частиц с интенсивностью меньше $0,02\%$.

2. ENSDF—2000. Evaluated Nuclear Structure Data File. — Brookhaven Nat. Lab. USA.

3. Aكوالي Y. A. // Nucl. Data Sheets. — 1990. — V. 59. — P. 263.

4. Browne E. // Nucl. Data Sheets. — 1992. — V. 65. — P. 209.

5. Schmorak M. R. // Nucl. Data Sheets. — 1992. — V. 66. — P. 839.

6. Aكوالي Y. A. // Nucl. Data Sheets. — 1995. — V. 76. — P. 127.

7. Aكوالي Y. A. // Ibid. — P. 457.

8. Aكوالي Y. A. // Nucl. Data Sheets. — 1996. — V. 77. — P. 271.

9. Aكوالي Y. A. // Ibid. — P. 433.

10. Shurshikov E. N. // Nucl. Data Sheets. — 1988. — V. 53. — P. 601.

11. Rytz A. // Atomic Data and Nucl. Data Tables. — 1991. — V. 47. — P. 205.

12. Хольнов Ю. В. и др. Оцененные значения ядерно-физических характеристик радиоактивных нуклидов, применяемых в народном хозяйстве / Справ. пособие. — М.: Энергоиздат, 1982.

13. Чечев В. П. и др. Оцененные значения ядерно-физических характеристик трансурановых радионуклидов / Справ. пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

14. Holden N. E. // Nucl. Stand. Ref. Data. IAEA — TECDOC—335. Vienna, 1995. — P. 1.

15. Divadeenam M., Stehn J. R. // Ann. Nucl. Energy. — 1984. — V. 11. — P. 37.

16. Bland G. J., Truffy J. // Appl. Radiat Isot. — 1992. — V. 43. — P. 1241.

17. Baranov S. A., Kulakow V. M., Belenky S. N. Nucl. Phys. — 1963. — V. 41. — P. 95.

18. Ahmad I. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 1994. — V. A339. — P. 151.

СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Период полураспада, энергия и абсолютная вероятность эмиссии альфа-частиц радионуклидов ^{226}Ra с дочерними продуктами распада, ^{233}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu

Радионуклид	Период полураспада $T_{1/2}$	Энергия альфа-частиц E_{α} , кэВ	Абсолютная вероятность эмиссии альфа-частиц	
			в процентах от числа распадов конкретного радионуклида P_{α} , %	число альфа-частиц на 100 распадов материнского нуклида ^{226}Ra в равновесии
^{226}Ra	1600(7) лет	4601,4(3) 4784,34(25)	5,55(5) 94,45(5)	5,55(5) 94,45(5)
^{222}Rn	3,8235(3) сут	4987(1)	0,078(10)	0,078(10)
^{210}Po	138376(2) сут	5304,33(7) 5489,5(3)	99,99878(4) 99,92(1)	101,436(20) 99,92(1)
^{218}Po	3,10(2) мин	6002,35(9)	99,9989(11)	99,9789(23)
^{218}At	1,5(3) с	6653(5) 6693(3) 6747(5)	6,4(5) 90(5) 3,6(4)	0,0013(2) 0,018(2) 0,00072(11)
^{214}Po	0,1643(20) мс	7686,82(7)	99,9895(6)	99,9685(12)
^{233}U	$1,592(2) \cdot 10^5$ лет	4728,8(12) 4753,7(12) 4783,5(12) 4795,6(12) 4804,9(12) 4824,2(12)	1,61(16) 0,163(16) 13,2(2) 0,28(3) 0,051(5) 84,4(5)	
^{238}Pu	87,74(3) лет	5357,48(20) 5456,26(20) 5499,03(20)	0,105(5) 28,98(10) 70,91(10)	
^{239}Pu	$2,410(2) \cdot 10^4$ лет	5105,83(14) 5143,84(14) 5156,59(14)	11,8(2) 17,5(2) 70,7(2)	

Дата одобрения 07.06.2001 г.