

Рис. 3. Распределение потока тепловых нейтронов  $\Phi_2$  при наличии системы из восьми стержней, расположенных равномерно по кольцу в отражателе реактора ( $\Delta K_{эфф} = 11,0\%$ ):

1 — реактор без стержней; 2 —  $\varphi = 0$ ; 3 —  $\varphi = \pi/8$ .

стержней расчет распределения потоков нейтронов по радиусу реактора в указанном приближении (без учета высших членов разложения) приводит к тому, что потоки не «сшиваются» на границе активной зоны с отражателем.

На рис. 1, 2 приведено распределение потока тепловых нейтронов  $\Phi_2$  по радиусу реактора со стержнем в активной зоне и отражателе. Поглощающий стержень диаметром 2,2 см в обоих случаях считается абсолютно черным к тепловым нейтронам — не замедляет и не поглощает быстрые нейтроны. В качестве замедлителя в активной зоне и материала отражателя используется оксид бериллия плотностью 2,8 г/см<sup>3</sup>; нейтронно-физические характеристики системы приведены в работе [5, табл. 3]. Радиус реактора  $R_p = 2,18 R_{a.з}$  — эквивалентная высота активной зоны  $H_{a.з}^{эkv} = 1,65 R_p$ . Как видно из кривых рис. 1 и 2, высшие члены разложения существенно влияют на распределение потока нейтронов, особенно вблизи границы активной зоны с отражателем. В то же время расчетная эффективность стержня, как это следует из данных таблицы (см. также работы [1, 2]), слабо меняется при учете последующих членов разложения.

На рис. 3 приведено распределение потока тепловых нейтронов при наличии системы стержней ( $N = 8$ ), симметрично расположенных в отражателе. Расчет

Эффективность стержня  $\Delta K_{эфф}$  (%) диаметром 2,2 см, вычисленная в различных приближениях

$R_c/R_{a.з}$	$k = 0$			$k = 1$	
	$n = 0$	$n = 0 \div 2$	$n = 0 \div 7$	$n = 0 \div 2$	$n = 0 \div 7$
0,84	3,18	3,08	3,07	3,03	3,03
1,16	1,48	1,48	1,49	1,45	1,45
1,35	0,847	0,852	0,855	0,832	0,835

Примечание.  $R_c$  — расстояние от центра реактора до центра стержня.

распределения был проведен с учетом двух членов разложения в угловой зависимости по реактору ( $n = 0 \div 1$ ) и первого члена ряда в азимутальной зависимости на поверхности поглощающих стержней ( $k = 0$ ). Как видно из рис. 3, при данном симметричном расположении стержней последующие члены разложения можно не учитывать.

Приведенные результаты расчетов получены на электронно-вычислительной машине М-20. Программа для этой машины дает возможность рассчитать эффективный коэффициент размножения нейтронов  $K_{эфф}$ , распределение потоков нейтронов по сечению в реакторе с одним стержнем или с системой поглощающих стержней, расположенных симметрично в активной зоне или в отражателе реактора. Значения  $K_{эфф}$  и распределения потоков нейтронов можно рассчитать как с учетом угловых зависимостей по реактору ( $n = 0 \div 10$ ) и на поверхности стержней ( $k = 0 \div 1$ ), так и в приближении  $k = n = 0$ .

Автор выражает благодарность Н. Н. Пономареву-Стенному и Е. С. Глушкову за помощь в работе. Большой вклад в составление программ для М-20 внесла С. Г. Злобина, которой автор весьма признателен.

Поступило в Редакцию 22/III 1966 г.  
В окончательной редакции 19/V 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Носов. «Атомная энергия», 9, 262 (1960).
2. В. И. Носов. «Атомная энергия», 10, 269 (1961).
3. В. И. Носов. «Атомная энергия», 15, 71 (1963).
4. Г. Н. Ватсон. Теория бесселевых функций. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
5. И. И. Бондаренко и др. Доклад № 362, представленный СССР на Третью международную конференцию по использованию атомной энергии в мирных целях (Женева, 1964).

Определение выгорания в твэлах при помощи полупроводникового германиевого  $\gamma$ -спектрометра

Л. В. ГРОШЕВ, А. М. ДЕМИДОВ, Г. А. КОТЕЛЬНИКОВ, О. А. МИЛЛЕР

УДК 539.107.8:621.038.548.3

Способы определения выгорания ядерного топлива по интенсивности  $\gamma$ -излучения изотопов — продуктов деления — получают все более широкое применение.

Рассмуссеном и др. [1], а позднее Рохлином и др. [2] было предложено использовать для регистрации  $\gamma$ -излучения облученных твэлов дифракцион-

ный  $\gamma$ -спектрометр, Грошевым и Демидовым [3] — магнитный комптоновский спектрометр, Оуэнсом [4], Дигглом и Блакадером [5] —  $\gamma$ -спектрометр с кристаллом NaJ, Хигайтсбергом и др. [6, 7] —  $\gamma$ -спектрометр с кремниевым детектором. В перечисленных работах для определения выгорания ядерного топлива измерялась интенсивность  $\gamma$ -излучения различных долгоживущих изотопов ( $\text{Cs}^{137}$ ,  $\text{Ce}^{144}$ ,  $\text{Ba}^{140}$  и т. д.).

Наиболее пригодным изотопом для определения выгорания твэлов является изотоп  $\text{Cs}^{137}$  ввиду его весьма длительного периода полураспада ( $T_{1/2} = 30$  лет), достаточно большого выхода при делении и почти стопроцентного выхода  $\gamma$ -квантов на один акт  $\beta$ -распада. Определение выгорания по  $\text{Cs}^{137}$  является заманчивым потому, что в этом случае выгорание можно измерять при наиболее реальных режимах работы твэлов — при длительных периодах облучения и хранения и, что наиболее важно, при неизвестных режимах облучения.

Однако следует учитывать, что выделение  $\gamma$ -линии  $\text{Cs}^{137}$  с энергией 661 кэв в спектре облученного твэла представляет значительные трудности, так как при этом необходимо использовать  $\gamma$ -спектрометр с достаточно высоким (лучше 1%) разрешением в этой области энергий  $\gamma$ -лучей и при достаточно хорошей светосиле. Такими параметрами обладает  $\gamma$ -спектрометр с германиевым детектором, который по своим качествам превосходит  $\gamma$ -спектрометры, использовавшиеся в работах [1—7].

Цель настоящей работы — исследование возможности использования германиевых  $\gamma$ -детекторов для определения выгорания в твэлах, поэтому эксперименты проводились не со всем твэлом, а с его частью, вес которой составлял 180 мг.

Образец помещался в свинцовую защиту на расстоянии 100 см от детектора. Пучок  $\gamma$ -лучей коллимирован диафрагмами диаметром 10 мм. Импульсы от германиевого детектора поступали на предусилитель с низким уровнем шумов, затем на усилитель, дискриминатор и 512-канальный амплитудный анализатор.

Германиевые детекторы, использованные в настоящей работе, были изготовлены в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова. Использовался герма-

ний  $p$ -типа, примесная проводимость компенсировалась литием. Детекторы размещались в специальном криостате на медном стержне, охлаждаемом жидким азотом. Высокий вакуум в криостате обеспечивался абсорбентами: цеолитом и силакагелем с палладием. Использовалось два детектора: первый детектор имел толщину 3 мм, диаметр 14 мм и рабочее напряжение 300 в; второй детектор имел толщину 8 мм, диаметр 19 мм и рабочее напряжение 850 в.

Схема малошумящего предусилителя в основном аналогична схеме, описанной в работе [8]. Зависимость величины шумов от входной емкости предусилителя имеет вид

$$\text{ШПВ (кэв)} = 1,8 + 0,05C (нф),$$

где ШПВ — ширина на половине высоты аппаратурной линии. Разрешающая способность спектрометра при собственной входной емкости предусилителя 14 и 17 нф для обоих детекторов составляла 4 кэв на линии 661 кэв  $\text{Cs}^{137}$ .

На рис. 1 приведен спектр  $\gamma$ -лучей  $\text{Co}^{60}$ , измеренный детектором толщиной 8 мм. Стабильность анализирующего тракта составляла примерно 0,2% за 1 ч при энергии 661 кэв.

Спектр  $\gamma$ -лучей твэла, измеренный при помощи детекторов толщиной 3 и 8 мм, показан на рис. 2 и 3. Энергия и интенсивность выделенных  $\gamma$ -линий осколков деления приведены в таблице. Необходимо отметить четкое выделение  $\gamma$ -линии  $\text{Cs}^{137}$  с энергией 661 кэв. Это означает, что германиевый полупроводниковый спектрометр позволяет определить выгорание в твэлах без их разрушения (в частности, для одного из важных случаев, когда история работы твэла неизвестна).

Для нахождения абсолютной интенсивности  $\gamma$ -линии  $\text{Cs}^{137}$  с энергией 661 кэв использовался источник  $\text{Na}^{22}$  с известной активностью. Определенное таким методом выгорание оказалось равным ~6%.

Следует отметить также, что применение германиевого детектора дает возможность выделить большое число  $\gamma$ -линий из спектра твэла. Это число может быть увеличено при наборе большей статистики в спектре, а также при изменении времени облучения и выдержки твэлов.

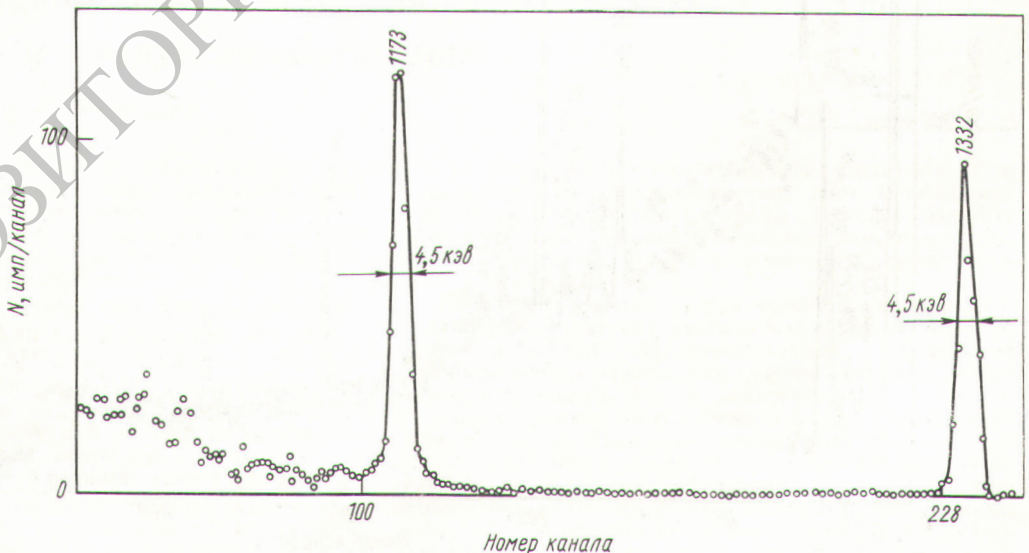


Рис. 1. Спектр  $\gamma$ -излучения  $\text{Co}^{60}$ .

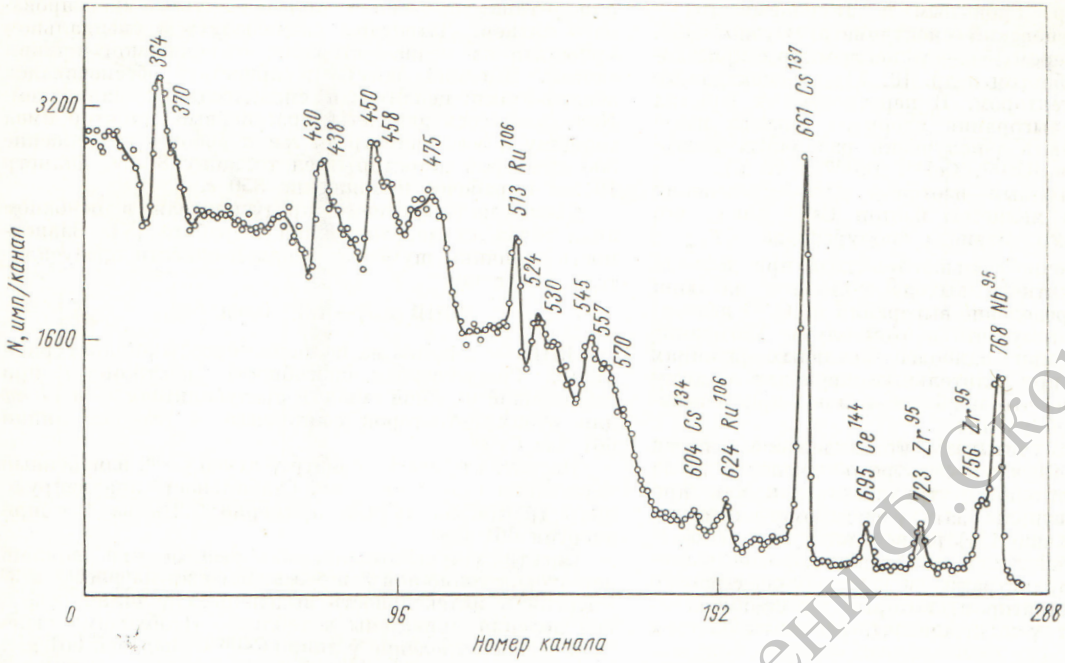
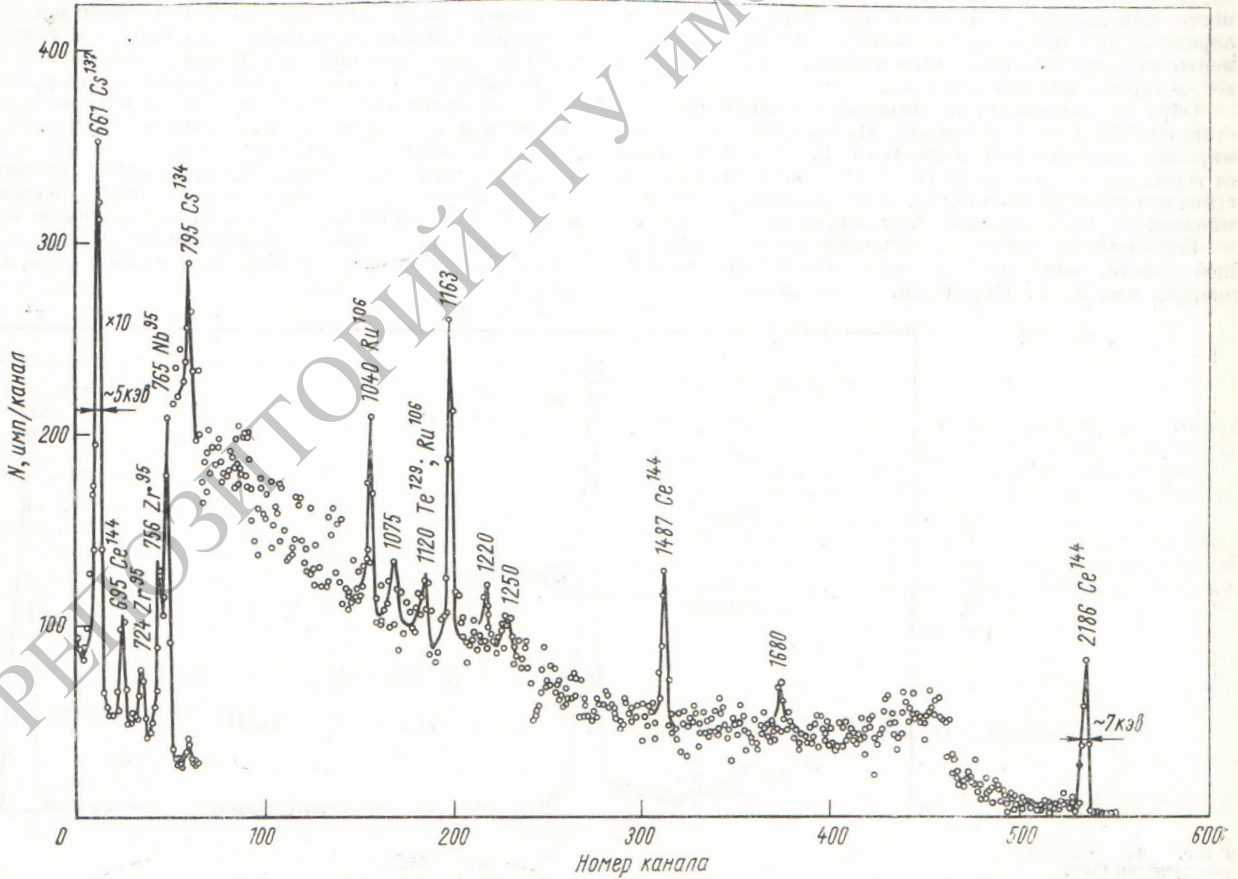


Рис. 2. Спектр  $\gamma$ -излучения твэла,  $E_{\gamma} = 0,3 \div 0,8$  Мэв.

Рис. 3. Спектр  $\gamma$ -излучения твэла,  $E_{\gamma} = 0,6 \div 2,2$  Мэв.



Значение энергии и интенсивности  $\gamma$ -линий, выделенных из спектра твэла

$E_\gamma$ , кэв	$I_\gamma$ , отн. ед.	Изотоп	$T_{1/2}$	$E_\gamma$ , кэв	$I_\gamma$ , отн. ед.	Изотоп	$T_{1/2}$
2186 *	100	Ce <sup>144</sup>	284 дня	795 (5)	40	Cs <sup>134</sup>	2,07 года
1680	12	(2186—511)	284 »	765 (4)	630	Nb <sup>95</sup>	35 дней
1487 *	43	Ce <sup>144</sup>	284 »	756 (4)	30	Zr <sup>95</sup>	65 »
1250 (5)	11	—	—	724 (4)	120	Zr <sup>95</sup>	65 »
1220 (5)	14	—	—	695 (4)	200	Ce <sup>144</sup>	284 дня
1163 (3)	74	2186—1022	284 дня	661,6 *	1050	Cs <sup>137</sup>	30 лет
1120 (5)	13	Ru <sup>106</sup>	366 дней,	624 (4)	110	Ru <sup>106</sup>	366 дней
		Te <sup>129</sup>	41 день	604 (4)	50	Cs <sup>134</sup>	2,07 года
1075 (5)	13	—	—	513 (4)	180	Ru <sup>106</sup>	366 дней
1040 (4)	40	Ru <sup>106</sup>	366 дней				

Примечание. Звездочкой отмечены  $\gamma$ -линии, используемые в качестве реперов. Энергия линии 1163 кэв определялась по Co<sup>60</sup>. В скобках дана ошибка.

Зная интенсивности этих линий, можно определить выходы соответствующих осколков деления, а также содержание некоторых примесей других элементов в твэле. Однако этот вопрос в настоящей работе не рассматривался.

В последнее время появились сведения [9] об искажении распределения содержания Cs<sup>137</sup> в твэлах из-за его миграции, что, видимо, ограничит использование этого изотопа для определения выгорания.

Поступило в Редакцию 13/VI 1966 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Рассмуссен и др. Доклад RNR/39 на симпозиуме МАГАТЭ (Вена, 1960).
2. J. Rochlin et al. Доклад № 416, представленный Швецией на Третью международную конферен-

- цию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
3. Л. В. Грошев, А. М. Демидов. «Атомная энергия», 13, 458 (1962).
4. T. Owen. Brit. J. Appl. Phys., 14, 456 (1963).
5. W. Diggie, W. Blackader. Nucleonics, 23, No. 3, 71 (1965).
6. M. Hignatsberger et al. Доклад № 399, представленный Австрией на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
7. M. Hignatsberger et al. Nucleonics, 23, No. 1, 32 (1965).
8. В. Г. Бровченко, Ю. Д. Молчанов. «Приборы и техника эксперимента», № 2, 5 (1964).
9. W. Mc. Younagle. Доклад SM-67/46 на Симпозиуме МАГАТЭ по административно-учетным проблемам ядерных материалов (1965). Вена, МАГАТЭ, 1965 г.

## Об активационном методе определения флюорита в пробах руд и продуктов обогащения

В. И. ПРОКОПЧИК, Т. И. СУББОТИНА

УДК 543.53:539.172.4

Содержание фтора в пробах флюоритовых руд и продуктов их обогащения можно определять активационным методом с использованием ядерной реакции  $F^{19}(n, \alpha)N^{16}$  [1]. Энергетический порог этой реакции 1,57 Мэв [2], эффективное сечение при энергии нейтронов 6 Мэв достигает 260 мбари [3].

Изотоп  $N^{16}$  ( $T_{1/2} = 7$  сек) при распаде испускает  $\gamma$ -кванты с энергиями 6,43 Мэв (55%) и 7,11 Мэв (21%). Влияние  $\gamma$ -излучения  $Al^{28}$  ( $E_\gamma = 1,79$  Мэв), образующегося по реакции  $Si^{28}(n, p)Al^{28}$ , устраняется введением дискриминации на уровне 2 Мэв. Реакцией на кислороде  $O^{18}(n, p)N^{16}$  при активации полониево-бериллиевым источником можно пренебречь, так как энергетический порог этой реакции равен 10,22 Мэв [2].

Таким образом, регистрация  $\gamma$ -излучения с энергией больше 2 Мэв позволяет получать показания, пропорциональные числу ядер  $F^{19}$  в активируемой пробе.

Лабораторная установка, изготовленная для активационного анализа на флюорит, дает возможность последовательно облучать пробы потоком быстрых нейтронов от полониево-бериллиевого источника, быстро перемещать пробы к детектору и регистрировать  $\gamma$ -излучение.

Измерительная аппаратура включает в себя сцинтиляционный счетчик [кристалл NaJ (Tl) размером  $40 \times 50$  мм и ФЭУ-13], интегральный амплитудный дискриминатор и пересчетный прибор. Мощность источника нейтронов (3—20)  $\cdot 10$  нейтр/сек.

Анализируемые пробы весом 200—500 г засыпаются в фигурные пластмассовые кюветы (рис. 1).

Цикл анализа состоит из активации (42 сек), перемещения пробы (3 сек) и измерения (30 сек). При этом измеряется  $\sim 70\%$  излучения, которое можно было бы измерить при активации до насыщения. Для повышения точности анализа выполняется пять циклов. Таким