

021  
Ф.  
Г. М. ФРАДКИН

# ИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ

СПРАВОЧНИК

ГОСАТОМИЗДАТ 1963

Г. М. ФРАДКИН

СЗ48  
сп- 82

60620

# ИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ

СПРАВОЧНИК



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ  
ПО АТОМНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

Москва 1963

## ВВЕДЕНИЕ

За последние десять—пятнадцать лет построены атомные реакторы с высокой плотностью нейтронных потоков. Это дало возможность получать искусственно-радиоактивные изотопы в количествах, достаточных для практического применения во многих областях народного хозяйства. Появление широкого набора  $\alpha$ - и  $\gamma$ -радиоактивных изотопов [1—4] создало благоприятные условия для создания малогабаритных изотопных источников нейтронов, которые могут быть использованы как в лабораторных, так и в полевых условиях.

На основе изотопных источников нейтронов разработаны такие методы, приборы и установки, которые заняли прочное место при разведке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, при поисках полезных ископаемых, в активационном анализе и при измерении влажности, а также в многочисленных научно-исследовательских работах. Быстрый рост масштабов использования нейтронных источников привлек к этим работам большое количество геологов, химиков, металлургов и металло-физиков, специалистов по добыче нефти, газа, угля и других полезных ископаемых, работников сельского хозяйства и промышленности строительных материалов, а также научных работников и преподавателей исследовательских и учебных институтов. Вместе с тем в отечественном издании отсутствует литература, в которой бы имелись в собранном виде основные данные по получению и применению изотопных источников нейтронов.

В настоящем справочнике делается первая попытка хотя бы в небольшой степени заполнить указанный пробел и помочь лицам, начинающим работать с нейтронными источниками, сориентироваться в новой для них области знаний. Автор пытался также ответить на многочисленные вопросы, с которыми обращались к нему в период организации производства изотопных источников нейтронов специалисты, использующие эти источники в своей повседневной практике.

Книга предназначена для широкого круга инженеров, научных работников, преподавателей высших учебных заведений и студентов старших курсов, сталкивающихся в своей

работе с вопросами получения и применения портативных источников нейтронов небольшой мощности. В помещенных в книге таблицах содержатся основные технические параметры нейтронных источников, выпускаемых отечественной промышленностью, физико-химические характеристики используемых в них радиоактивных изотопов и ядерные свойства материалов, преобразующих  $\alpha$ - или  $\gamma$ -излучение в поток быстрых нейтронов.

Автор благодарит В. М. Кодюкова, Г. А. Жегалкина и Ю. С. Шимилевича за ряд полезных замечаний, сделанных ими при обсуждении рукописи.

---

## ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА И ЕГО СВОЙСТВА

В начале XX в. (вплоть до 1930 г.) общепризнанным было положение, что все элементы представляют собой совокупность одинаковых атомов, ядра которых состоят из протонов и электронов, причем число протонов в ядре принималось равным атомному весу (массовому числу элемента  $A$ ), а число электронов — разности между атомным весом и порядковым номером ( $A-Z$ ). В течение 1919—1939 гг. Дж. Томсон, Ф. Астон, А. Демстер и др. подтвердили своими опытами предсказание известного русского ученого А. М. Бутлерова, а впоследствии П. Шютценберга и У. Крукса о том, что большинство элементов состоит из смеси нескольких разновидностей атомов (изотопов), а их атомный вес является средневзвешенным атомных весов изотопов.

Развитие науки о строении ядра и создание квантовой механики показали, что существование электрона внутри ядра невозможно. Родилась гипотеза о том, что ядро состоит из положительных частиц (протонов), число которых равно атомному номеру изотопа, и каких-то нейтральных частиц (нейтронов), компенсирующих кулоновское расталкивание протонов.

В 1920 г. Резерфорд высказал предположение о возможности существования ядра с массой, равной 1, и зарядом, равным 0, т. е. нейтрона. «Подобный атом, — писал Резерфорд о нейтроне, — обладал бы совершенно фантастическими свойствами. Его внешнее поле практически должно равняться нулю, за исключением областей, весьма близко прилежащих к ядру, вследствие этого он должен обладать способностью свободно проходить через материю».

Через десять лет, в 1930 г., Боте и Беккер обратили внимание на то, что при бомбардировке  $\alpha$ -частицами некоторых легких элементов бериллия, лития, бора и др. возникает излучение, способное проходить через толстый слой свинца (толщина свинцового экрана — слой половинного ослабления, уменьшающего интенсивность такого излучения вдвое, — равна 5 см).

В следующем 1931 г. Ирен и Фредерик Жоллио-Кюри [5] обнаружили, что если перед ионизационной камерой, измеряющей проникающее излучение «бериллия», поместить слой вещества, содержащего большое количество водорода, например пластинку парафина, то ток в камере резко возрастет. Опыт с камерой Вильсона ясно показал, что возрастание тока обусловлено возникновением ядер отдачи (ядра отдачи возникали также и в большинстве газов, вплоть до криптона).

Таким образом, оказалось, что проникающее излучение бериллия и других легких элементов обладает способностью сообщать большое количество движения тяжелым частицам. Указанное свойство излучения не могло быть объяснено, если предположить, что ядра отдачи в водороде возникают в результате соударения фотона с ядром водорода.

Этот кажущийся парадокс был разрешен в 1932 г. Джеймсом Чедвиком, который показал, что ядра отдачи, обнаруживаемые во всех газах, имеют скорость, которую они должны были бы получить в результате соударения не с фотонами, а с тяжелыми частицами с массой, приблизительно равной массе протона.

Если, кроме того, эти частицы лишены электрического заряда, то электрическое взаимодействие между ними и ядрами будет отсутствовать, и поэтому частицы должны свободно проникать даже через такие тяжелые вещества как свинец. Тем самым было подтверждено предсказанное Резерфордом существование частиц с массой, равной 1, и зарядом, равным 0.

Открытие нейтрона коренным образом изменило представление о строении ядра. В этом же 1932 г. советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг выдвинули гипотезу, что атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Согласно этой гипотезе, а в настоящее время она является общепризнанной, ядро с массовым числом  $A$  имеет в своем составе  $Z$  протонов и  $N=A-Z$  нейтронов. Нейтроны содержатся в ядрах всех атомов, за исключением атома обычного водорода. Поскольку нейтрон не имеет электрического заряда, он легко может проникать в ядра большинства атомов, так как его движению не препятствует сильный электрический заряд ядра. Когда свободный нейтрон поглощается атомным ядром, то этот атом превращается в атом другого элемента или изотопа, причем этот процесс сопровождается образованием  $\gamma$ -лучей, протонов и других частиц. Вновь образованный атом является обычно радиоактивным. Таким образом, в результате выдерживания различных элементов в сильном потоке нейтронов внутри ядерного реактора стало возможным производство различных радиоактивных изо-

топов в большом количестве, что раньше было весьма дорого или неосуществимо.

Масса нейтрона  $M_n$  равна  $1,68 \cdot 10^{-24}$  г, т. е. немного больше массы протона ( $M_p = 1,67 \cdot 10^{-24}$  г). Так как разность  $M_n - M_p$  положительна, то следует ожидать, что свободный нейтрон радиоактивен и должен спонтанно превращаться в протон. Этот распад действительно имеет место и сопровождается излучением  $\beta$ -частицы и нейтрино. Период полураспада нейтрона  $T_{1/2} \approx 12$  мин, в веществе нейтрон обычно взаимодействует с атомным ядром, прежде чем происходит его распад. У медленных нейтронов в парафине средний срок жизни до захвата приблизительно равен  $10^{-4}$  сек.

Следующими за массой важными свойствами нейтрона являются его механический (спин) и магнитный моменты. И. Тамм и С. Альшюлер впервые установили, что нейтрон, будучи частицей, лишенной заряда, должен все же обладать магнитным моментом. Они теоретически предсказали правильный знак этого момента и приблизительно оценили его величину. Экспериментально величина магнитного момента была определена с помощью метода, предложенного Альваресом—Блохом и основанного на поляризации пучка нейтронов при прохождении через намагниченное железо. Величина магнитного момента нейтрона  $M_n$  оказалась равной  $-1,9103 \pm \pm 0,0012$  ядерного магнетона, а величина спина равна  $1/2$ . Отрицательный знак указывает на то, что магнитный момент нейтрона антипараллелен его механическому моменту.

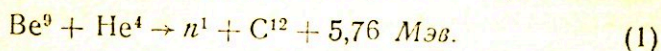
Обычный вид взаимодействия между свободным нейтроном и атомным ядром есть упругое соударение. В результате таких соударений скорость нейтрона уменьшается, причем тем сильнее, чем легче ядро. От соударений скорость нейтрона может уменьшаться до тех пор, пока его средняя кинетическая энергия не станет такой же, какой является энергия молекул среды. Эта энергия называется тепловой, а нейтроны, имеющие энергию в указанном интервале, называются тепловыми.

Единицей меры энергии нейтронов служит электронвольт. Электронвольт определяется как энергия, необходимая для перемещения электрона из одной точки в другую, разность потенциалов между которыми равна одному вольту ( $1 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-12}$  эрг). Кроме электронвольта обычно используются также единицы, как килоэлектронвольт ( $1 \text{ кэв}$ ) и мегаэлектронвольт ( $1 \text{ Мэв}$ ). Энергия теплового нейтрона при обычных температурах составляет около  $0,025$  эв, а его средняя скорость — около  $2,2 \cdot 10^5$  см/сек ( $2200$  м/сек). Нейтрон с энергией в  $1 \text{ Мэв}$  имеет скорость около  $1,4 \cdot 10^9$  см/сек.

## ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НЕЙТРОНОВ

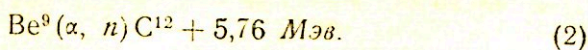
Не существует радиоизотопов, которые бы непосредственно излучали нейтроны, исключая некоторые изотопы тяжелых элементов при спонтанном делении и короткоживущие изотопы, испускающие запаздывающие нейтроны. Однако имеются ядерные процессы, в которых нейтроны получаются косвенно. Примером может служить реакция  $\alpha$ -частиц, испускаемых полонием, с бериллиевой мишенью, которая привела к открытию нейтрона. В качестве бомбардирующих частиц могут быть использованы  $\alpha$ -частицы от других радиоактивных изотопов или такие заряженные частицы, как протоны  $p$ , дейтроны  $d$ , ускоренные в соответствующей ускорительной трубке или на циклическом ускорителе типа циклотрона.  $\gamma$ -Фотон, обладающий энергией выше энергии связи нейтрона в ядре, может также вызывать реакции с образованием нейтронов. Для получения нейтронов в большом количестве, как известно, используются ядерные реакторы, в которых осуществляется управляемая цепная реакция деления ядер урана или плутония.

Наиболее распространенной реакцией, идущей с образованием нейтронов, является поглощение ядром ( $\text{Be}^9$ )  $\alpha$ -частицы с последующим излучением нейтрона и образованием  $\text{C}^{12}$ . Этот процесс можно описать следующим образом:

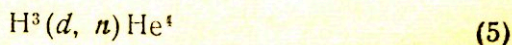
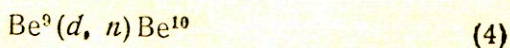
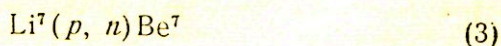


Энергия 5,76 Мэв есть энергия ядерной реакции и обычно обозначается символом  $Q$ . Небольшая часть энергии выделяется в форме энергии отдачи образовавшегося ядра. Вся остальная энергия (или ее часть) уносится излучаемым нейтроном. Энергия реакции может быть либо положительной, либо отрицательной, т. е. реакция протекает или с выделением (экзотермическая реакция), или с поглощением тепла (эндотермическая реакция).

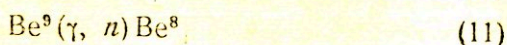
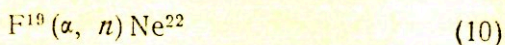
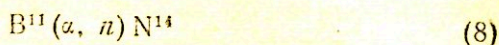
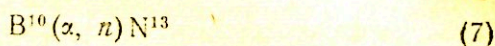
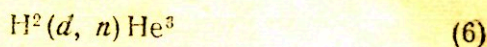
Ядерную реакцию (1) можно записать в более короткой форме:



В настоящее время для получения нейтронов широко применяются и такие хорошо известные реакции как:







Для осуществления реакций (3) — (6) требуются довольно громоздкие ускорительные установки и специальное высоковольтное электрическое питание, тогда как в процессах, описанных в реакциях (2) и (7) — (11), в качестве бомбардирующих частиц могут использоваться  $\alpha$ -частицы или жесткое  $\gamma$ -излучение радиоактивных изотопов. Поэтому реакции (2) и (7) — (11) приобретают особый интерес при изготовлении небольших портативных нейтронных источников.

### ИЗОТОПЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КАЧЕСТВЕ ПЕРВИЧНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКАХ

Рассматривая ядерные реакции, используемые при получении нейтронов, описанных в предыдущем разделе, можно видеть, что в качестве первичных излучателей в портативных нейтронных источниках могут использоваться  $\alpha$  и  $\gamma$ -радиоактивные изотопы. Наиболее широкое применение нашли изотопы  $\text{Po}^{210}$  и  $\text{Ra}^{226}$ , в последнее время применяются также  $\alpha$ -радиоактивные изотопы:  $\text{Ac}^{227}$ ,  $\text{Pu}^{238}$  и  $\text{Pu}^{239}$ , а также  $\gamma$ -радиоактивные изотопы:  $\text{Sb}^{124}$ ,  $\text{Na}^{24}$ ,  $\text{Y}^{88}$ ,  $\text{La}^{140}$  и некоторые другие.

### АЛЬФА-ИЗЛУЧАТЕЛИ

Многие основные понятия современной атомной и ядерной физики появились в процессе изучения явления  $\alpha$ -радиоактивности. Представление Резерфорда [6] об атомном ядре, как центре массы и положительного заряда атома, возникло из анализа данных о рассеянии  $\alpha$ -частиц на большие углы. Опыты по облучению легких элементов  $\alpha$ -частицами привели Резерфорда к открытию ядерных превращений [7], а Ирен и Фредерик Жолио-Кюри к открытию искусственной радиоактивности. Однако современные направления исследований радиоактивности начали развиваться только в послевоенные годы (1945—1946 гг.). К 1945 г. было известно менее

гиднати  $\alpha$ -излучателей, и почти все они относились к естественным радиоактивным рядам. Из энергетических соотношений следует, что ядро будет неустойчивым по отношению к испусканию  $\alpha$ -частиц, если сумма энергий отрыва двух нейтронов и двух протонов меньше, чем энергия связи  $\alpha$ -частицы (28,3 Мэв).

Известные в настоящее время данные о массах атомов позволяют определить (на основе закона эквивалентности энергии и массы  $E = mc^2$ ) энергию  $\alpha$ -распада как в той части таблицы ядер, где скорость распада слишком мала, чтобы распад можно было обнаружить, так и там, где он вообще энергетически невозможен. Затем такие области можно связать с областями, где возможны непосредственные точные измерения, и таким образом выявить ход энергии  $\alpha$ -распада по всей таблице ядер. На рис. 1 показана кривая энергии  $\alpha$ -распада как функция массового числа.

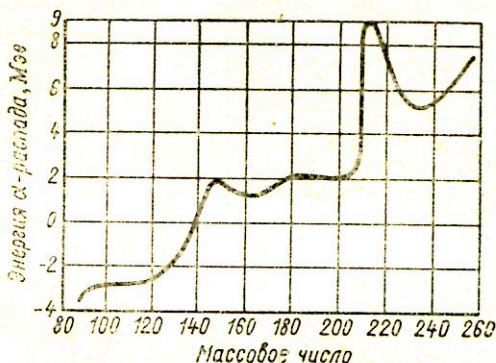


Рис. 1. Энергия  $\alpha$ -распада как функция массового числа.

При массовых числах до 140 (см. рис. 1) энергия  $\alpha$ -распада отрицательна, поэтому самопроизвольное испускание  $\alpha$ -частиц энергетически невозможно, при массовых числах от 140 до 210 спонтанный  $\alpha$ -распад маловероятен. Наибольшая вероятность испускания  $\alpha$ -частиц относится к ядрам с массовым числом выше 210, где энергия  $\alpha$ -распада резко растет, а значит растет и прозрачность потенциального барьера ядра для  $\alpha$ -частиц.

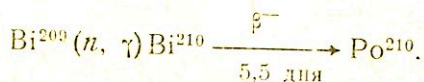
Таким образом изотопы —  $\alpha$ -излучатели следует искать в конце периодической системы элементов Д. И. Менделеева.

### Полоний-210

Полоний является 84-м элементом, расположен в первой подгруппе VI группы периодической системы и по своим химическим свойствам подобен теллуру. В соединениях

полоний преимущественно двух- и четырехвалентен, в природе он встречается в небольших количествах (0,1 мг на тонну) в урановых рудах. У полония имеется 23 радиоактивных изотопа, наибольший практический интерес представляет  $\text{Po}^{210}$ .

В настоящее время полоний получают (в граммовых количествах) облучением висмута в реакторе по реакции



Получение полония в граммовых количествах позволило более подробно изучить его химические и физические свойства. Полоний в элементарной форме представляет собой серебристо-белый блестящий металл, по своим физическим свойствам он в большей степени напоминает таллий, свинец и висмут, чем свой низший аналог—теллур. Полоний является весьма токсичным элементом с низкой температурой возгонки (температура плавления полония 246—254°C).

Изотоп полония  $\text{Po}^{210}$  является одним из наиболее чистых  $\alpha$ -излучателей (рис. 2), большинство испускаемых при его распаде  $\alpha$ -частиц имеют энергию 5,298 Мэв, только 10<sup>-3</sup>% распада дают  $\alpha$ -частицы с энергией 4,5 Мэв, которые сопровождаются испусканием  $\gamma$ -квантов с энергией 0,804 Мэв. Период полураспада полония равен 138,4 дня, что обеспечивает возможность получения препаратов и изделий с высокой удельной активностью. Вследствие высокой удельной активности (5000 кюри/г) металлический полоний в темноте испускает светло-голубое свечение.

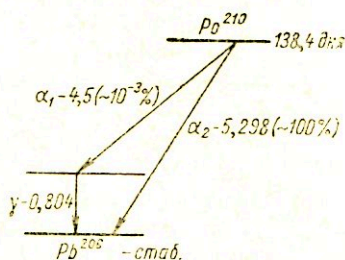


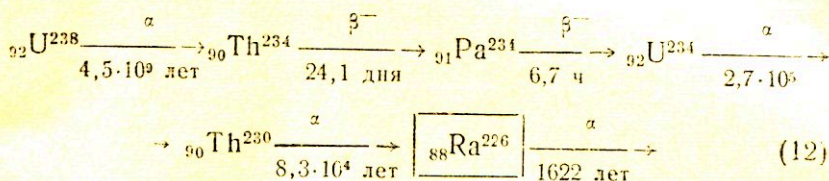
Рис. 2. Схема распада  $\text{Po}^{210}$ .

## Радий-226

В природе радий, так же как и полоний, встречается в урансодержащих минералах (до 400 мг на тонну), поэтому урановая руда одновременно является главным источником получения радия. По своим химическим свойствам радий является аналогом бария и относится к подгруппе щелочноземельных металлов II группы периодической системы элементов.

Радий имеет четырнадцать радиоактивных изотопов, однако большинство из них короткоживущие, наиболее долго-

живущий — естественно-радиоактивный изотоп радия  $Ra^{226}$ . Радий принадлежит к семейству урана и образуется при распаде изотопа  $U^{238}$ :



В одном грамме  $U^{238}$  содержится  $3,36 \cdot 10^{-7}$  г  $Ra^{226}$ .  $Ra^{226}$ , выделенный из продукта распада  $U^{238}$ , является материнским изотопом для целой цепочки  $\alpha$ - $\beta$ -превращений (рис. 3). В основной цепочке распада  $Ra^{226}$  имеется четыре  $\alpha$ - и четыре  $\beta$ -превращения, т. е. распад одного ядра  $Ra^{226}$  сопровождается испусканием четырех  $\alpha$ - и четырех  $\beta$ -частиц. Таким образом, если  $Ra^{226}$  поместить в герметично закрытый сосуд, то с течением времени в нем накапливаются все продукты распада, и спектр излучения будет складываться из излучения материнского и всех дочерних изотопов. Характеристика излучения каждого изотопа, входящего в семейство  $Ra^{226}$ , дана в табл. 1.

При необходимости равновесное содержание того или иного изотопа цепочки можно определить из соотношения:

$$N_n(t) = N_i \left( c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + c_n e^{-\lambda_n t} \right), \quad (13)$$

где  $N_i$  — число атомов родоначальника семейства в момент времени  $t$ , равный 0;

$$c_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)},$$

$$c_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)},$$

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  — постоянные распада соответствующих изотопов цепочки  $\lambda = \frac{0,698}{T_{1/2}}$ .

### Радий-D ( $Pb^{210}$ )

Среди продуктов распада радия имеется изотоп  $Pb^{210}$ , который накапливается со скоростью  $23 \text{ мкюри/год} \cdot 1 \text{ г Ra}$  и представляет самостоятельный интерес.  $Pb^{210}$  является

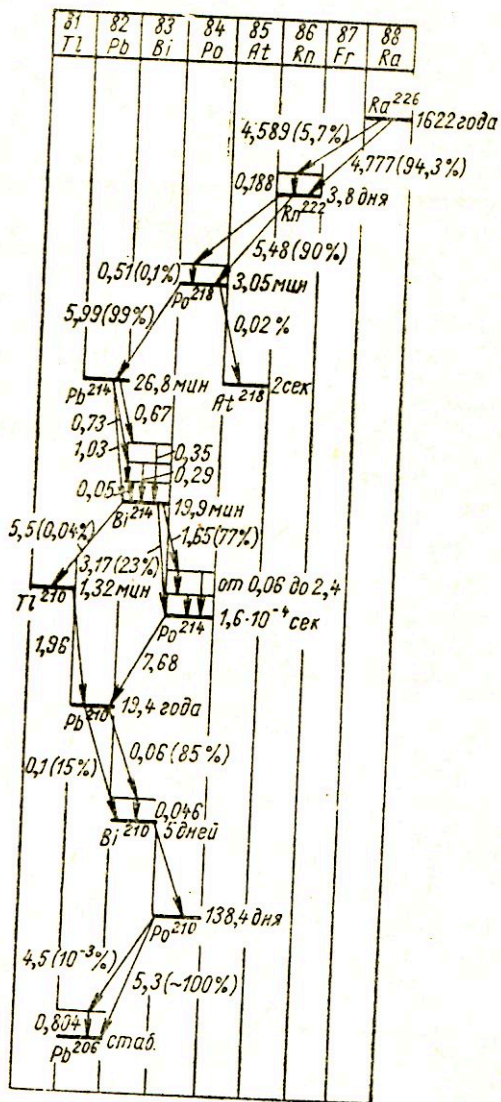


Рис. 3. Комплексная схема распада изотопов семейства  $Ra^{226}$ .

Таблица 1

Характеристика излучения  $Ra^{226}$  и продуктов его распада [8—10]

Изотоп	Тип распада	Период полураспада	Энергия излучения, Мэв	
			$\alpha$ - или $\beta$ -частиц	$\gamma$ -квантов
$Ra^{226}$	$\alpha$	1622 года	4,777 (94,3%)	0,188 (5,7%)
$Rn^{222}$	$\alpha$	3,825 дня	4,589 (5,7%)	
$Po^{218}$	$\alpha$ (>99%) $\beta^-$ (0,02%)	3,05 мин	5,486	
$Pb^{214}$	$\beta^-$	26,8 мин	0,67 0,73 1,03	0,05323 0,24192 (10,6%) 0,2578
$Bi^{214}$	$\beta^-$ (>99%)	19,9 мин	3,17 (~23%) 1,65 (~77%)	0,29522 (24%) 0,35199 (43,5%) 0,0625
$Po^{214}$	$\alpha$ (0,04%)		5,505 (45%) 5,444 (55%)	0,191 0,606 (35,9%) 0,766 (7,8%) 0,933 (3,8%)

1,120 (27,3%)  
 1,238 (9,9%)  
 1,379 (11,6%)  
 1,520 (3,9%)  
 1,761 (22%)  
 1,820 (2,3%)  
 2,200 (7%)  
 2,420 (2,5%)

$\text{Po}^{214}$  (RaC')

$1,6 \cdot 10^{-4}$  сек

7,68 (длиннопребывающие)

$\text{Pb}^{210}$  (RaC'')

1,32 мин

10,509 (0,002%)

$\text{Pb}^{210}$  (RaD)

19,4 года

1,9

$\text{Bi}^{210}$  (RaE)

5,0 дня

0,015

$\beta^-$  (>99%)

1,17

$\alpha$  (5·10<sup>-5</sup>%)

0,046

$\text{Po}^{210}$

138,4 дня

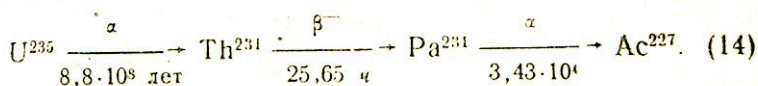
5,3 (~100%)

4,5 (10<sup>-3</sup>%)

$\beta$ -радиоактивным изотопом (см. рис. 3) с периодом полураспада 19,4 года, при получении нейтронных источников более важно то, что после двух  $\beta$ -переходов  $\text{Pb}^{210}$  превращается в  $\text{Po}^{210}$  — наиболее чистый  $\alpha$ -излучатель. Таким образом, выделив из продуктов распада радия  $\text{Pb}^{210}$ , мы можем получить препарат, дающий наряду с мягким  $\beta$ -излучением  $\alpha$ -излучение полония, но имеющий период полураспада 19,4 года. По своим химическим свойствам такой препарат будет повторять в основном свойства обычного свинца — элемента II группы периодической системы подгруппы германия. В большинстве своих соединений свинец двухвалентен и имеет достаточно выраженные металлические свойства.

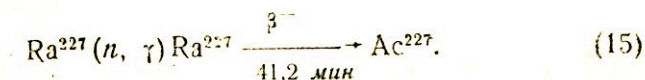
### Актиний-227

Актиний является 89-м элементом периодической системы элементов. По своим химическим свойствам он напоминает лантан и относится к первой подгруппе III группы таблицы Д. И. Менделеева. В природе актиний содержится в урановых рудах. В настоящее время известно десять изотопов актиния, все они радиоактивны, причем наиболее долгоживущим является  $\text{Ac}^{227}$  ( $T_{1/2} = 22$  года) — дочерний изотоп семейства  $\text{U}^{235}$ :



Соотношение между количеством урана и актиния в руде всегда остается постоянным, так, например, в одной тонне урановой смоляной руды содержится 0,15 мг актиния. Для получения актиния в более концентрированном виде применяются методы дробного осаждения или кристаллизации, однако это очень длительный и многостадийный процесс [11а].

В настоящее время благодаря появлению атомных реакторов с большой плотностью нейтронного потока весовые количества  $\text{Ac}^{227}$  стали получать облучением радия по реакции



В этом случае выделение актиния связано не с отделением от редких земель, а только с очисткой от радия и долгоживущих продуктов распада актиния (тория, полония, свинца и висмута), химически с ним несходных.



$\text{Ac}^{227}$ , выделенный из продуктов распада  $\text{U}^{235}$  или полученный облучением  $\text{Ra}^{226}$  в ядерном реакторе, сам является материнским изотопом для цепочки  $\alpha$ - и  $\beta$ -превращений (рис. 4). В основной цепочке распада  $\text{Ac}^{227}$  имеется пять  $\alpha$ - и три  $\beta$ -превращения, т. е. распад одного ядра актиния со-

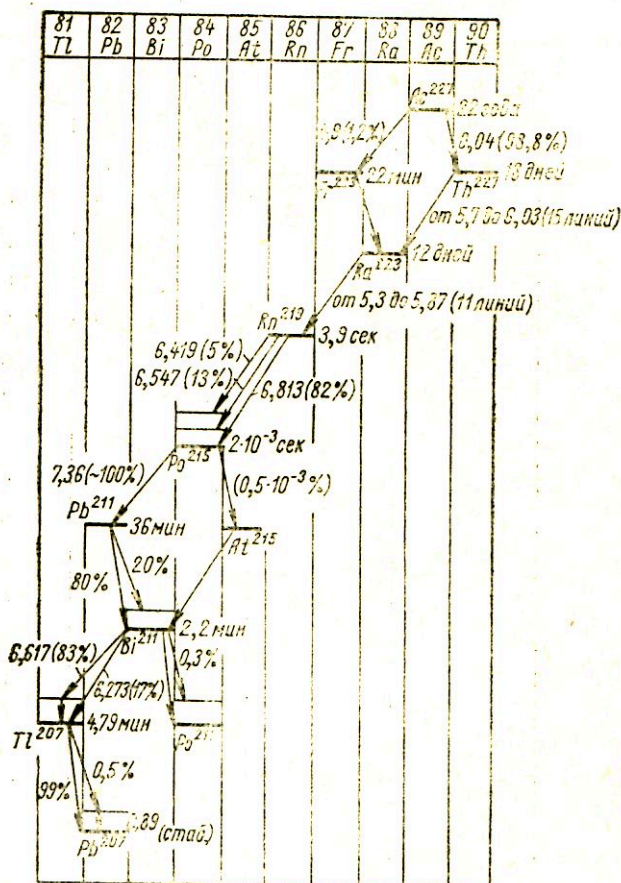


Рис. 4. Комплексная схема распада изотопов семейства  $\text{Ac}^{227}$ .

проводится испусканием пяти  $\alpha$ - и трех  $\beta$ -частиц. Характеристика излучения каждого изотопа, входящего в семейство  $\text{Ac}^{227}$ , дана в табл. 2. Равновесное содержание того или иного изотопа цепочки, как и в случае цепочки распада радия, может быть определено из соотношения (13) (см. табл. 11).

Характеристика излучения  $\text{Ac}^{227}$  и продуктов его распада [8, 9]

Изотоп	Тип распада	Период полураспада	Энергия излучения, Мэв				
			$\alpha$ - или $\beta$ -частиц	$\gamma$ -квантов			
$\text{Ac}^{227}$	$\beta$ (98,8%)	22 года	0,04				
	$\alpha$ (1,2%)		4,9				
$\text{Th}^{227}$ (RaAc)	$\alpha$	18 дней	6,036 (23%)				
			6,007 (2,8%)	0,03			
			5,976 (24%)	0,0316			
			5,958 (3,5%)	0,05			
			5,914 (0,9%)	0,062			
			5,865 (3,0%)	0,100			
			5,805 (1%)	0,113			
			5,793 (0,3%)	0,205			
			5,761 (0,3%)	0,235			
			5,755 (31%)	0,236			
			5,712 (5%)	0,256			
			5,708 (8,7%)	0,286			
			5,699 (4%)	0,304			
$\text{Fr}^{223}$ (AcK)	$\beta$	22 мин	5,692 (1,5%)	0,312			
			5,667 (1,9%)	0,335			
			1,15				
			$\text{Ra}^{223}$ (AcX)	$\alpha$	12 дней	5,867 (1%)	
						5,853 (0,3%)	
5,742 (10,5%)							
5,712 (50%)							
$\text{Ra}^{223}$ (AcX)	$\alpha$	12 дней	5,602 (24%)				
			5,534 (10,3%)				
			5,497 (0,9%)				
			5,429 (2,4%)				
			5,360 (0,2%)				
			5,334 (0,07%)				

Изотоп	Тип распада	Период полураспада	Энергия излучения, Мэв	
			$\alpha$ - или $\beta$ -частиц	$\gamma$ -квантов
Rn <sup>219</sup> (An)	$\alpha$	3,9 сек	6,813 (82%)	0,272
			6,517 (13%)	
			6,419 (5%)	
Po <sup>215</sup> (AcA)	$\alpha$	2·10 <sup>-3</sup> сек	7,36	0,401
Pb <sup>211</sup> (AcB)	$\beta^-$	36 мин	1,39 (80%)	0,065; 0,083
				0,404; 0,425
			~0,5 (20%)	0,487; 0,764
Bi <sup>211</sup> (AcC)	$\alpha$ (~100%)	2,16 мин	6,617 (83%)	0,829
Tl <sup>207</sup> (AcC')	$\beta^-$	4,79 мин	6,273 (17%)	0,351
			1,44	0,569
Pb <sup>207</sup> (AcD) (стабильный)		—	—	0,890
				1,064
				1,430
				1,771

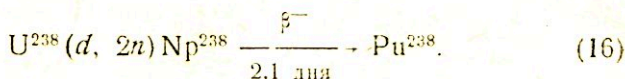
Получение актиния в весовых количествах создает возможность изготавливать  $\alpha$ - и нейтронные источники с более длительным периодом полураспада (в 50 раз), чем у Po<sup>210</sup>, и значительно более мягким и менее интенсивным  $\gamma$ -излучением, чем у Ra<sup>226</sup>.

### Плутоний

Порядковый номер плутония — 94, он принадлежит к актинидам и расположен в III группе периодической системы элементов. Если не считать следов плутония, образующихся при относительно редких ядерных превращениях в урановых рудах, то этот элемент в природе не встречается.

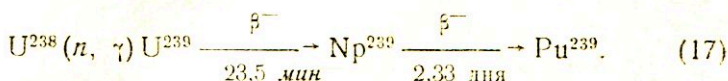
В настоящее время известно одиннадцать изотопов плутония, первый из них — Pu<sup>238</sup> был получен Г. Сиборгом, Е. Макмилланом, Дж. Кеннеди и А. Валье при облучении

урана дейтонами с энергией 14 Мэв на циклотроне Калифорнийского университета:



$\text{Pu}^{238}$  испускает четыре группы  $\alpha$ -частиц с энергией от 5,208 до 5,491 Мэв (рис. 5), три из них сопровождаются испусканием относительно мягких  $\gamma$ -квантов с энергией от 0,435 до 0,039 Мэв. Период полураспада  $\text{Pu}^{238}$  86 лет.

$\text{Pu}^{239}$  получается в большом количестве облучением  $\text{U}^{238}$  в ядерном реакторе [11 б]:



Впервые  $\text{Pu}^{239}$  был выделен как продукт распада  $\text{Np}^{239}$  в 1941 г., с тех пор его ядерные и химические свойства были систематически и многосторонне исследованы [11 б].

$\text{Pu}^{239}$  распадается с испусканием трех групп  $\alpha$ -частиц с энергией 5,238; 5,225; 5,187 Мэв, две из них сопровождаются испусканием мягких  $\gamma$ -квантов с энергией 0,039 и 0,014 Мэв. Схема распада

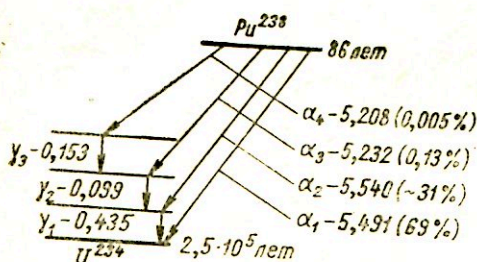


Рис. 5. Схема распада  $\text{Pu}^{238}$ .

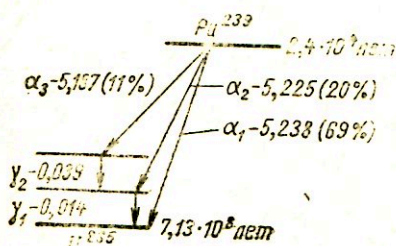


Рис. 6. Схема распада  $\text{Pu}^{239}$ .

$\text{Pu}^{239}$  показана на рис. 6. Период полураспада  $\text{Pu}^{239}$  24 360 лет.

По своим химическим свойствам плутоний является весьма интересным элементом [11 б]. Несмотря на то, что он расположен в III группе периодической системы элементов, плутоний проявляет пять степеней окисления: II, III, IV, V, VI, что указывает на сложность его химического поведения.

Связь в соединениях, где Pu (II) двухвалентен, носит в основном металлический характер, причем в водных растворах такие связи не существуют. Химические свойства Pu (III) весьма сходны со свойствами

редких земель в трехвалентном состоянии. Химия Pu (IV) сходна с химией Ce (IV) и U (IV), а Pu (V и VI) — с химией урана и нептуния соответствующей валентности.

### Торий-228

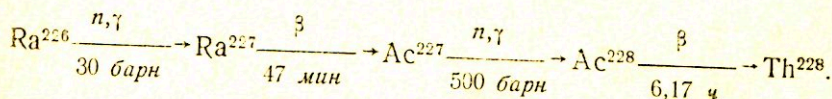
Девяностый элемент периодической системы Д. И. Менделеева был открыт в 1828 г. и получил название торий. Торий в небольшом количестве распространен по всей земной поверхности. Среднее содержание его в земной коре 0,001—0,002%. Силикатные минералы торит и оранжит содержат от 50 до 72% двуокиси тория. Главный промышленный источник тория — монацитовый песок, который представляет собой смесь фосфатов редких земель.

По своим химическим свойствам торий весьма сходен с цирконием (также расположенным в первой подгруппе IV группы периодической системы элементов) и с четырехвалентным церием, но он более электроположителен. Наиболее устойчивая валентность тория — четыре, известны также двух- и трехвалентные его соединения.

Торий имеет тринадцать радиоактивных изотопов от номера 223 до 235, в природе встречается наиболее долгоживущий из них ( $\text{Th}^{232}$ ) с периодом полураспада  $1,39 \cdot 10^{10}$  лет.

$\text{Th}^{232}$  является родоначальником целой цепочки радиоактивных превращений. Схема его распада показана на рис. 7. Для приготовления изотопных источников нейтронов значительной мощности  $\text{Th}^{232}$  оказывается непригодным, так как он имеет весьма низкую удельную активность. Среди продуктов распада  $\text{Th}^{232}$  имеется изотоп  $\text{Th}^{228}$  или так называемый радиоторий ( $T_{1/2} = 1,9$  года), который представляет наибольший интерес (из изотопов тория) для приготовления нейтронных источников.

В природном тории на 1 г  $\text{Th}^{232}$  приходится всего  $1,34 \cdot 10^{-10}$  г  $\text{Th}^{228}$ , поэтому выделение его из природного сырья в каких-нибудь значительных количествах нецелесообразно. В настоящее время  $\text{Th}^{228}$  получают облучением радия по реакции:



При облучении 1 г радия в потоке около  $2 \cdot 10^{13}$  нейтр/сек  $\cdot \text{см}^2$  в течение двух лет в нем образуется около 10 кюри  $\text{Th}^{228}$ .

Выделенный из облученного радия  $\text{Th}^{228}$  сам является родоначальником целой цепочки радиоактивных превращений: один его распад сопровождается пятью  $\alpha$ -, двумя  $\beta$ -пе-

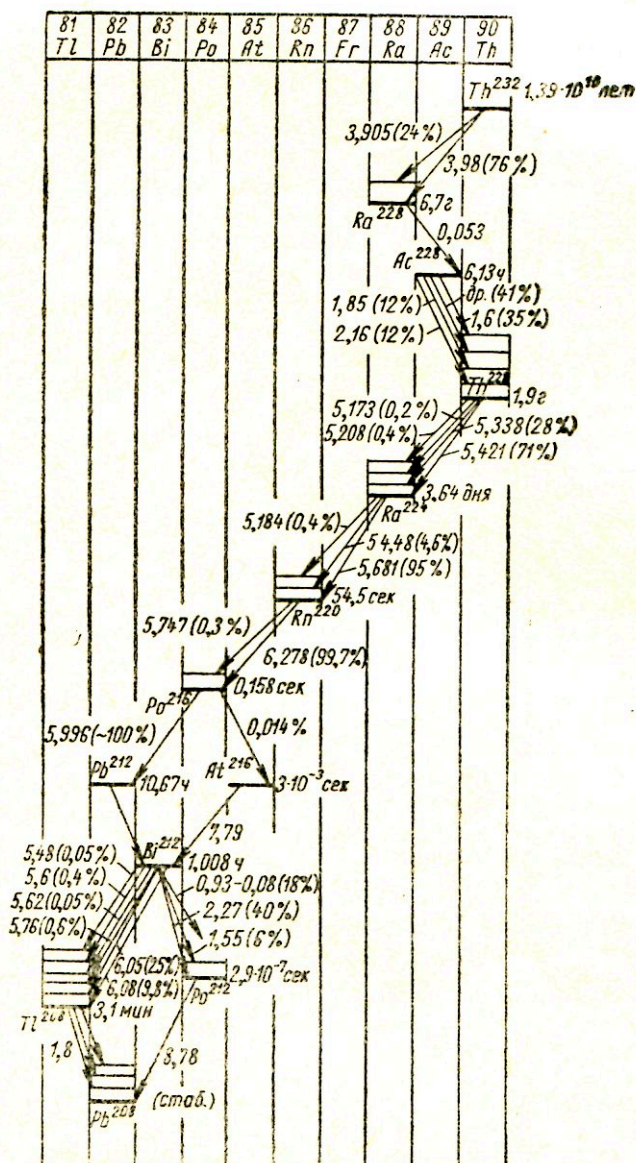


Рис. 7. Комплексная схема распада изотопов семейства Th.

## Семейство тория [8—10]

Изотоп	Период полураспада	Тип распада	Энергия излучения, Мэв	
			$\alpha$ - или $\beta$ -частиц	$\gamma$ -квантов
$\text{Th}^{232}$	$1,39 \cdot 10^{10}$ лет	$\alpha$	3,98 (76%)	
$\text{Ra}^{228}$ (MsTh I)	6,7 года	$\beta^-$	3,905 (24%)	0,075
$\text{Ac}^{228}$ (MsTh II)	6,13 ч	$\beta^-$	0,053	0,03
			2,16 (12%)	0,0568; 0,0781
			1,85 (2%)	0,0978; 0,113
			1,61 (35%)	0,1275; 0,179
			другие (41%)	0,184; 0,232
				0,336; 0,410
				0,458; 0,907
				0,965; 1,035
				1,095; 1,59
				1,64
$\text{Th}^{230}$ (Ra Th)	1,9 года	$\alpha$	5,421 (71%)	
			5,338 (28%)	
			5,208 (0,4%)	
			5,173 (0,2%)	
$\text{Ra}^{226}$ (ThX)	3,64 дня	$\alpha$	5,681 (95%)	0,241; 0,29
			5,448 (4,6%)	0,41; 0,65
			5,184 (0,4%)	
$\text{Rn}^{220}$	54,5 сек	$\alpha$	6,278 (99,7%)	0,542 (0,03%)
			5,747 (0,3%)	
$\text{Po}^{218}$ (ThA)	0,158 сек	$\alpha$	5,996 (~100%)	
		$\beta^-$ (0,014%)		
$\text{At}^{216}$	$3 \cdot 10^{-3}$ сек	$\alpha$	7,79	
$\text{Pb}^{212}$ (ThB)	10,67 ч	$\beta^-$	0,335 (78,9%)	0,115; 0,176
			0,589 (16,6%)	0,238 (33%);
				0,249
			0,166 (4,2%)	0,299 (34,4%)

Изотоп	Период полураспада	Тип распада	Энергия излучения, Мэв	
			$\alpha$ - или $\beta$ -частиц	$\gamma$ -квантов
Bi <sup>212</sup>	60,5 мин	$\alpha$ (36%)	6,08 (9,8%)	0,040; 0,144
			6,05 (25%)	0,164; 0,288
			5,76 (0,6%)	0,328; 0,432
			5,62 (0,05%)	0,452; 0,472
			5,6 (0,4%)	
			5,48 (0,05%)	
Bi <sup>212</sup>	60,5 мин	$\beta^-$ (64%)	2,27 (40%)	0,72 (19%); 0,83 (19%)
			1,55 (6%)	1,03 (6%); 1,34 (5%)
			0,93—0,08(18%)	1,61 (7%); 1,81 (7%)
Po <sup>212</sup> (ThC')	2,9·10 <sup>-7</sup> сек	$\alpha$	8,78	
Th <sup>228</sup> (ThC'')	3,1 мин	$\beta^-$	2,38 (~1,5%)	2,62 (100%); 0,859 (15%)
			1,8 (49,9%)	0,582 (80%); 0,610 (25%)
			1,52 (22,1%)	0,277 (10%)
			1,29 (23,5%)	
			1,04 (4,2%)	

реходами и испусканием нескольких  $\gamma$ -квантов. Характеристики излучений каждого изотопа, входящего в семейство тория, даны в табл. 3. Равновесное содержание того или иного изотопа цепочки, как и в предыдущих случаях, может быть определено из соотношения (13). Получение Th<sup>228</sup> в весовых количествах создает возможность изготавливать  $\alpha$ - и нейтронные источники достаточно высокой удельной активности с приемлемым периодом полураспада. Недостатком этих источников является наличие довольно интенсивного  $\gamma$ -фона.



## ГАММА-ИЗЛУЧАТЕЛИ

В ходе многочисленных ядерных превращений, в том числе и при распаде радиоактивных изотопов, как правило, продукты реакции образуются в возбужденном состоянии. Переход ядра из возбужденного состояния в основное в большинстве случаев осуществляется в результате испускания одного или нескольких  $\gamma$ -квантов.

В настоящее время известно большое число  $\gamma$ -излучающих изотопов, их можно разделить на две группы: чистые  $\gamma$ -излучатели, в которых  $\gamma$ -кванты образуются в результате перехода исходного изотопа из возбужденного (метастабильного) состояния в основное или за счет захвата ядром электрона одной из внутренних оболочек;  $\beta$ - $\gamma$  (реже  $\alpha$ - $\gamma$ )-излучатели, в которых  $\gamma$ -излучение сопровождает  $\beta$ -распад исходного изотопа, причем в последнем случае  $\gamma$ -кванты образуются в результате перехода из возбужденного состояния в основное не материнского, а дочернего изотопа (рис. 8, 9).

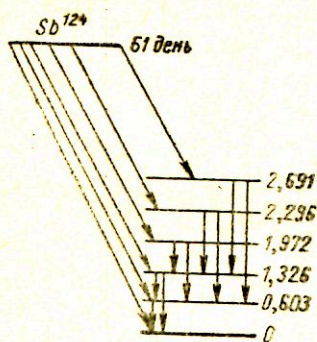


Рис. 8. Схема распада  $Sb^{124}$ .

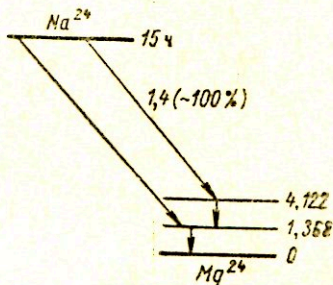


Рис. 9. Схема распада  $Na^{24}$ .

Несмотря на то что большинство изотопов, нашедших практическое применение, являются  $\beta$ - $\gamma$ -излучателями, имеется всего несколько радиоактивных изотопов, которые могут быть использованы для приготовления фотонейтронных источников. К таким изотопам относятся:  $Ra^{226}$ ,  $Sb^{124}$ ,  $Na^{24}$ ,  $La^{140}$ , а другие  $\gamma$ -излучающие изотопы имеют либо слишком короткий период полураспада, либо низкую (ниже порога фотоядерной реакции) энергию  $\gamma$ -квантов.

### Сурьма-124

Сурьма, порядковый номер — 51, является элементом V группы (подгруппа азота). Имея пять электронов в наружной оболочке атома, сурьма характеризуется как metallo-

ид, однако способность к присоединению электронов у нее выражена значительно слабее, чем у элементов VI и VII групп. Сурьма наряду с металлоидными обладает также и металлическими свойствами. Высшая положительная валентность — пять, отрицательная — три.

В природе обычно сурьма встречается в соединениях с серой в виде сурьмяного блеска  $Sb_2S_3$ . При прокаливании

Таблица 4

Характеристика изотопов сурьмы

Изотоп	Тип распада	Период полу-распада, день	Энергия излучения, Мэв		Реакция получения и сечение активации
			$\beta$	$\gamma$	
$Sb^{122}$	$\beta$ - Э. З. (3%)	2,7	0,73 (4%)	0,57 (66%)	$Sb^{121}$ ( $n, \gamma$ ) 6,8 барн
			1,42 (65%)	0,69 (3%)	
			1,99 (28%)	1,26 (1%)	
$Sb^{124}$	$\beta$ -	53,7	0,22 (11%)	0,61 (99%)	$Sb^{123}$ ( $n, \gamma$ ) 2,5 барн
			0,61 (51%)	0,65 (8%)	
			0,95 (6%)	0,72 (14%)	
			1,59 (~7%)	0,97 (3%)	
			1,66 (~2%)	1,05 (2%)	
			2,31 (23%)	1,33 (1%)	
				1,37 (5%)	
				1,45 (2%)	
	1,70 (50%)				
	2,09 (6%)				

(обжиге) на воздухе  $Sb_2S_3$  сурьма превращается в окисел сурьмы  $Sb_2O_4$ , из которого она получается восстановлением углем. В свободном состоянии это твердое серебристо-белое вещество с металлическим блеском, удельный вес — 6,6, температура плавления —  $630,5^\circ C$ , внешне похожа на металл, но обладает хрупкостью, значительно хуже проводит электрический ток и тепло. Сурьма имеет два стабильных ( $Sb^{121}$  и  $Sb^{123}$ ) и девятнадцать радиоактивных изотопов. Наиболее интересным из них с точки зрения получения нейтронных источников является изотоп  $Sb^{124}$ , который является

жестким  $\gamma$ -излучателем ( $E_{\gamma_{\max}} = 2,09 \text{ Мэв}$ ) и имеет период полураспада 60,9 дня (см. рис. 8). Получается  $\text{Sb}^{124}$  нейтронным облучением в реакторе элементарной сурьмы с природным изотопным составом ( $\text{Sb}^{121} - 57,25\%$ ,  $\text{Sb}^{123} - 42,75\%$ ) по реакции простого радиационного захвата  $\text{Sb}^{123}(n, \gamma)\text{Sb}^{124}$ , сечение этой реакции равно 2,5 *барн* ( $2,5 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ ). Наряду с  $\text{Sb}^{124}$  при облучении в реакторе образуется и другой изотоп  $\text{Sb}^{122}$  с периодом полураспада 2,7 дня. Характеристика изотопов сурьмы приведена в табл. 4.

### Натрий-24

Натрий (порядковый номер 11) относится к подгруппе щелочных металлов I группы периодической системы элементов. В природе он встречается исключительно в виде соединений, являясь составной частью многих весьма распространенных силикатов. Натрий относится к наиболее распространенным элементам (2% общего числа атомов земной коры). Важнейший его минерал — поваренная соль входит в состав морской воды и на отдельных участках земной поверхности образует под слоем наносных пород громадные залежи.

Натрий, как и другие щелочные металлы, характеризуется небольшим удельным весом (0,97), малой твердостью (0,4), низкой температурой плавления ( $98^\circ \text{C}$ ) и кипения ( $890^\circ \text{C}$ ), хорошей электропроводностью (21, а для ртути 1).

Натрий имеет один стабильный ( $\text{Na}^{23}$ ) и пять радиоактивных изотопов ( $\text{Na}^{20}$ ,  $\text{Na}^{21}$ ,  $\text{Na}^{22}$ ,  $\text{Na}^{24}$ ,  $\text{Na}^{25}$ ), из которых только распад  $\text{Na}^{24}$  сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов с энергией, достаточной для осуществления фотонейтронных реакций. Схема распада  $\text{Na}^{24}$  показана на рис. 9. Из приведенной схемы можно видеть, что каждый  $\beta$ -распад атомов  $\text{Na}^{24}$  сопровождается испусканием двух  $\gamma$ -квантов с энергией 1,37 и 2,76 *Мэв*. Период полураспада  $\text{Na}^{24}$  равен 15 ч, он получается облучением одной из солей натрия ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ) в ядерном реакторе по реакции простого радиационного захвата



### Лантан-140

Лантан принадлежит к первой подгруппе III группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева, по своим свойствам он относится к редкоземельным элементам. Как и другие редкоземельные металлы, лантан широко распространен в природе. Наиболее известные минералы, в которых встречаются редкие земли: гадолинит, ксенонит и монацит.

Лантан имеет два стабильных ( $\text{La}^{138}$  и  $\text{La}^{139}$ ) и двенадцать радиоактивных изотопов, наибольший интерес из них для получения фотонейтронных источников представляет изотоп  $\text{La}^{140}$  с периодом полураспада 40 ч и максималь-

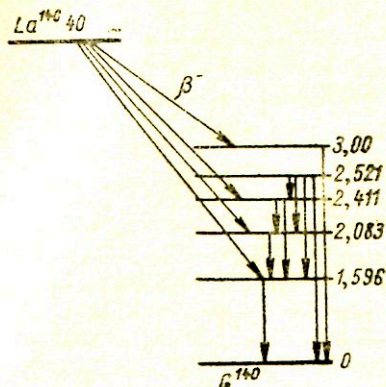
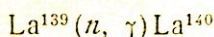


Рис. 10. Схема распада  $\text{La}^{140}$ .

ной энергией  $\gamma$ -квантов 2,5 и 3 Мэв (рис. 10).  $\text{La}^{140}$  получается по реакции простого радиационного захвата



облучением природного лантана в ядерном реакторе. Вследствие относительно небольшого периода полураспада  $\text{La}^{140}$ , большого сечения захвата у  $\text{La}^{139}$  ( $\sigma = 8,4$  барн) и почти 100%-ного (99,91%) его содержания в исходной смеси изотопов препараты лантана могут быть получены в весьма высокой удельной активности.

## МИШЕНИ В ИЗОТОПНЫХ ИСТОЧНИКАХ НЕЙТРОНОВ

При выборе элемента, который мог бы служить в качестве материала мишени в изотопном источнике нейтронов, исходят из следующего основного требования: энергия связи нейтрона в ядре должна быть меньше энергии  $\gamma$ -кванта при фотонейтронной реакции  $\chi$  меньше энергии возбуждения промежуточного ядра, которое образуется при захвате  $\alpha$ -частицы в случае  $\alpha$ -нейтронной реакции. Ниже приводится таблица энергии связи нейтронов в ядрах некоторых элементов (табл. 5).

Энергия связи  $E_n$  нейтронов в ядрах, Мэв

Элемент	Изотоп	$E_n$	Элемент	Изотоп	$E_n$	Элемент	Изотоп	$E_n$
H	2	2,226	Si	28	16,90	Cr	53	7,50
H	3	6,250	Si	29	8,45	Cr	54	13,4
He	3	3,719	Si	30	10,62	Mn	52	9,88
He	4	20,576	Si	31	6,58	Mn	55	10,15
He	5	0,845	P	30	11,24	Mn	56	7,25
He	6	2,11	P	31	12,10	Fe	54	13,8
Li	6	5,89	P	32	7,93	Fe	55	9,3
Li	7	7,25	P	33	10,14	Fe	56	11,07
Li	8	2,02	P	34	6,11	Fe	57	7,64
Be	8	18,90	S	32	14,51	Co	57	10,98
Be	9	1,666	S	33	8,7	Co	59	10,25
Be	10	6,813	S	34	10,87	Co	60	7,72
B	9	18,31	S	35	7,37	Ni	58	11,70
B	10	8,553	S	36	8,85	Ni	59	9,01
B	11	11,465	S	37	5,92	Ni	60	11,83
B	12	3,362	Cl	34	10,65	Ni	61	7,7
C	11	13,59	Cl	35	13,01	Ni	62	10,1
C	12	18,75	Cl	36	8,59	Ni	63	6,85
C	13	4,944	Cl	37	9,5	Ni	64	0,65
C	14	8,174	Cl	38	6,11	Ni	65	6,43
C	15	2,23	Ar	36	14,71	Cu	63	10,85
N	13	20,40	Ar	37	8,76	Cu	64	7,91
N	14	10,55	Ar	38	11,75	Cu	65	10,2
N	15	10,85	Ar	39	—	Zn	64	11,87
N	16	2,45	Ar	40	—	Zn	65	7,9
N	17	5,82	Ar	41	6,04	Zn	66	11,15
O	15	13,37	K	39	12,82	Zn	67	7,0
O	16	15,63	K	40	7,71	Zn	68	10,15

Элемент	Изотоп	$E_n$	Элемент	Изотоп	$E_n$	Элемент	Изотоп	$E_n$
O	17	4,14	K	41	10,27	Zn	70	9,2
O	18	8,00	K	42	7,34	Ga	69	10,1
O	19	4,21	K	43	10,28	Ga	71	9,05
F	18	9,10	Ca	40	14,32	As	75	10,1
F	19	10,41	Ca	41	8,40	Se	82	9,2
F	20	6,61	Ca	42	10,40	Br	79	10,6
Ne	20	16,88	Ca	43	7,99	Br	81	9,95
Ne	21	6,73	Ca	44	11,55	Rb	87	10,0
Ne	22	10,57	Ca	45	7,20	Sr	86	9,5
Ne	23	5,21	Sc	44	9,88	Sr	87	8,42
Na	21	18,40	Sc	45	11,28	Sr	88	9,80
Na	22	11,30	Sc	46	8,81	Sr	89	6,55
Na	23	12,05	Sc	47	9,73	Sr	90	8,18
Na	24	6,95	Sc	48	8,57	Sr	91	5,20
Na	25	9,44	Sc	49	9,30	Y	89	10,70
Mg	24	16,34	Ti	46	13,30	Y	90	7,22
Mg	25	7,33	Ti	47	8,72	Y	91	7,87
Mg	26	11,03	Ti	48	11,0	Zr	90	12,0
Mg	27	6,54	Ti	49	8,15	Zr	91	7,2
Al	26	11,11	V	48	9,73	Zr	92	8,73
Al	27	12,75	V	51	11,15	Nb	93	8,7
Al	28	7,72	V	52	7,30	Nb	94	7,26
Al	29	9,32	Cr	52	11,59	Mo	92	13,3
Mo	93	8,31	La	139	8,8	Fr	220	5,3
Mo	97	7,1	Ce	140	9,5	Fr	221	6,36
Mo	98	9,35	Ce	142	7,15	Ra	221	5,32
Rh	103	9,35	Pr	141	9,5	Ra	222	6,86
Rh	104	6,8	Nd	150	7,4	Ra	223	5,0
Rh	106	6,9	Ta	181	7,7	Ra	224	6,45
Pd	105	7,53	Ta	182	6,05	Ra	225	4,78

Элемент	Изотоп	$E_n$	Элемент	Изотоп	$E_n$	Элемент	Изотоп	$E_n$
Pd	106	9,8	Re	187	7,3	Ra	226	6,08
Ag	107	9,6	Ir	193	7,8	Ra	227	4,9
Ag	108	7,0	Pt	194	9,5	Ra	229	4,6
Ag	109	9,14	Pt	195	6,14	Ac	223	6,58
Ag	110	6,35	Pt	196	8,0	Ac	224	5,78
Ag	111	9,0	Au	197	8,0	Ac	225	6,73
Cd	107	7,94	Au	198	6,4	Ac	228	5,1
Cd	108	9,92	Hg	201	6,4	Th	225	5,96
Cd	111	7,25	Tl	203	8,8	Th	226	7,14
Cd	112	9,3	Tl	204	6,53	Th	227	5,26
Cd	113	6,7	Tl	205	7,5	Th	228	7,07
Cd	114	9,046	Tl	206	6,16	Th	229	5,2
Cd	115	6,25	Tl	207	6,78	Th	230	6,5
Cd	116	8,7	Tl	208	3,91	Th	231	5,25
In	113	9,6	Tl	209	4,95	Th	232	5,9
In	114	7,25	Tl	210	3,15	Th	233	4,9
In	115	9,05	Pb	206	8,1	Th	234	5,7
In	116	6,6	Pb	207	6,73	Th	235	4,7
In	117	8,3	Pb	208	7,38	Pa	227	6,9
Sn	115	7,7	Pb	209	3,87	Pa	228	6,16
Sn	116	9,1	Pb	210	5,35	Pa	229	7,15
Sn	117	7,24	Pb	211	3,56	Pa	231	6,9
Sn	118	9,0	Pb	212	5,26	Pa	232	5,4
Sn	119	6,5	Bi	209	7,44	Pa	233	6,7
Sn	121	6,2	Bi	210	4,72 (4,17)	Pa	234	5,1
Sn	124	8,5	Bi	211	4,9	U	229	6,26
Sb	121	9,2	Bi	212	4,4	U	230	7,72
Sb	122	7,0	Bi	213	5,18	U	233	5,9
Sb	123	9,3	Bi	214	3,11	U	234	6,7

Элемент	Изотоп	$E_n$	Элемент	Изотоп	$E_n$	Элемент	Изотоп	$E_n$
Sb	124	5,56	Po	211	4,37	U	235	5,83
Sb	125	8,9	Po	212	6,06	U	236	6,43
Te	123	6,7	Po	213	4,19	U	238	5,6
Te	124	9,2	Po	214	6,02	U	233	4,63
Te	125	6,7	Po	215	3,89	Np	235	7,1
Te	126	8,72	Po	216	5,82	Np	236	5,36
Te	127	6,7	At	215	6,7	Np	239	6,4
Te	128	7,95	At	216	4,67	Np	240	5,0
J	127	9,12	At	217	5,96	Pu	239	5,77
J	128	7,34	At	218	3,92	Pu	240	6,43
J	131	8,73	Rn	217	4,52	Pu	242	6,27
Xe	129	7,0	Rn	218	6,66	Am	239	4,53
Xe	130	9,32	Rn	219	4,18	Am	242	5,57
Xe	131	6,8	Rn	220	6,42	Am	243	6,58
Xe	132	8,82	Fr	219	6,25	Cm	243	5,93
Cs	133	9,05						

Из таблицы видно, что для легких элементов энергия связи нейтрона в ядре колеблется от 1,666 Мэв в ядре  $\text{Be}^9$  до 19 Мэв в ядре  $\text{C}^{12}$ . С увеличением массы ядра эти колебания быстро падают; в среднем можно считать, что для ядер с  $30 < A < 150$  энергия связи нейтронов равна приблизительно 8 Мэв, а для  $A > 210$  — приблизительно 6 Мэв. Ядра, содержащие четное число нейтронов, обладают большей стабильностью, чем ядра с нечетным числом нейтронов. Особой стабильностью обладают ядра, число нейтронов у которых равно 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 (так называемому магическому числу). Наиболее стабильными ядрами являются ядра с двойным магическим числом, т. е. магическим как для нейтронов, так и для протонов (гелий, кислород, кальций, свинец и др.).



Таким образом, в качестве мишеней для создания изотопных источников нейтронов наиболее подходящими являются элементы начала периодической системы. Вследствие того что энергия  $\gamma$ -квантов, испускаемых радиоактивными изотопами, не превышает 3 Мэв, для создания фотонейтронных источников могут быть использованы мишени, изготовленные только из дейтерия или бериллия.

При создании нейтронных источников на основе  $\alpha$ -радиоактивных изотопов имеются более широкие возможности для выбора материала мишени. Основным фактором, который определяет выбор того или иного материала, является выход нейтронов, т. е. отношение числа испускаемых мишенью нейтронов к числу падающих на нее  $\alpha$ -частиц. Выход нейтронов зависит как от материала мишени, так и от энергии  $\alpha$ -частиц. На рис. 11, 12 показаны выход нейтронов для различных материалов мишени, бомбардируемых  $\alpha$ -частицами  $\text{Po}^{210}$  [12] ( $E_\alpha = 5,3$  Мэв), и зависимость выхода нейтронов от энергии  $\alpha$ -частиц при бомбардировке мишеней из бериллия, бора и фтора.

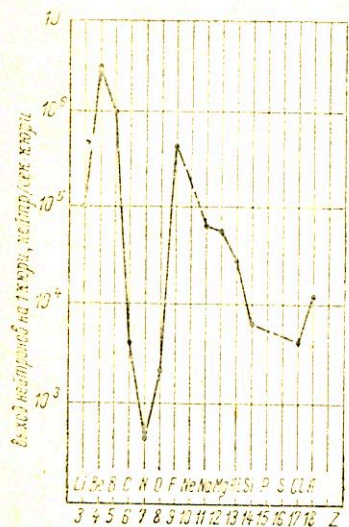


Рис. 11. Выход нейтронов у различных материалов, бомбардируемых  $\alpha$ -частицами  $\text{Po}^{210}$  ( $E_\alpha = 5,3$  Мэв), для различных мишеней от  $z=3$  до  $z=18$ .

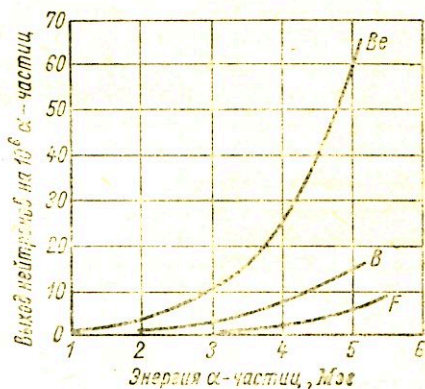
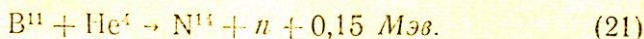
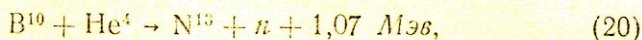
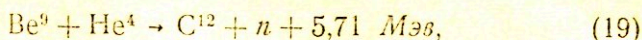


Рис. 12. Зависимость выхода нейтронов от энергии  $\alpha$ -частиц при бомбардировке мишеней из бериллия, бора и фтора.

Из этих рисунков видно, что максимальный выход нейтронов во всем диапазоне энергий  $\alpha$ -частиц имеет место при бомбардировке  $\alpha$ -частицами бериллиевой и борной мишеней, причем при росте энергии  $\alpha$ -частиц выход нейтронов существенно увеличивается. Реакции между бериллием или бо-

ром и  $\alpha$ -частицами идут с выделением энергии (экзотермические):



С помощью этих реакций можно изготавливать нейтронные источники с большим выходом простым смешиванием радиоактивных изотопов ( $\alpha$ -излучателей) с порошком бора или бериллия. Причем, от выбора мишени зависит энергетический выход ядерной реакции, а значит энергетический спектр получаемых нейтронов (подробнее этот вопрос будет рассмотрен в следующем разделе).

### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ $\alpha$ -НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Если в  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -источниках используется первичное излучение, т. е. непосредственное излучение радиоактивного изотопа, то в нейтронных источниках — вторичное излучение, возникающее в самом источнике в результате той или иной ядерной реакции. Как правило, нейтронный источник состоит из радиоактивного вещества, вещества мишени и оболочки. По характеру излучения, используемого для получения нейтронов, источники можно подразделить на две группы:  $\alpha$ -нейтронные и  $\gamma$ , или фотонейтронные.

Основными характеристиками, определяющими достоинства или недостатки любого изотопного источника нейтронов, являются: выход нейтронов на юри радиоактивного препарата и на единицу объема источника, энергетический спектр нейтронов, сопровождающий  $\gamma$ -спектр, период распада исходного изотопа ( $\alpha$ - или  $\gamma$ -излучателя).

*Выход нейтронов.* Для получения максимального выхода нейтронов при изготовлении  $\alpha$ -нейтронных источников необходимо решить две задачи: выбрать оптимальное соотношение между количеством атомов радиоактивного вещества и элемента мишени и осуществить наилучший контакт между ними (последнее обстоятельство связано с весьма малым пробегом  $\alpha$ -частиц). Приведенный на рис. 12 нейтронный выход при бомбардировке  $\alpha$ -частицами мишеней из бериллия, бора и фтора является «идеальным», т. е. предполагает оптимальное перемешивание  $\alpha$ -радиоактивного препарата с материалом мишени и отсутствие поглощения  $\alpha$ -частиц или образующихся нейтронов. Практически такие идеальные условия создать нельзя. Обычно используют менее опти-

мальную смесь, исходя из необходимых размеров источника, особенно это имеет место при создании малогабаритных источников высокой активности. Для увеличения удельного выхода нейтронов с единицы объема источника смесь радиоактивного препарата и материала мишени спрессовывают, сплавляют, а в некоторых случаях из указанных композиций приготавливают соответствующее интерметаллическое соединение.

*Энергия нейтронов.* Главными факторами, определяющими энергию нейтронов, образующихся в изотопном нейтронном источнике в результате  $(\alpha, n)$ -реакции, являются следующие.

1. Энергия  $\alpha$ -частиц  $E_\alpha$ , определяемая схемой распада исходных радиоактивных ядер.

2. Энергия кулоновского отталкивания  $C$ , или электростатический барьер. В связи с тем, что  $\alpha$ -частица и ядро мишени имеют положительные заряды, часть кинетической энергии  $\alpha$ -частицы идет на преодоление электростатического отталкивания.

3. Энергия ядерной реакции  $Q$ . Внутренняя энергия ядра при поглощении  $\alpha$ -частицы и испускании нейтрона изменяется: причем энергия реакции может быть либо положительной (экзотермической), либо отрицательной (эндотермической). При экзотермической реакции большая часть избыточной энергии уносится испускаемым нейтроном. Если реакция эндотермическая, то она идет за счет исходной энергии  $\alpha$ -частицы.

4. Затрата энергии на испускание сопровождающих  $\gamma$ -квантов. Образовавшееся после испускания нейтрона ядро в некоторых случаях находится в возбужденном состоянии, затем распадается с испусканием одного или нескольких  $\gamma$ -квантов.

5. Потеря энергии  $\alpha$ -частицей при соударениях в смеси до реакции с ядром мишени.

6. Потеря энергии нейтроном при соударении в смеси или в стенках капсул перед выходом из источника.

7. Распределение кинетической энергии между  $\alpha$ -частицей и ядром — продуктом реакции. Если нейтрон вылетает в направлении, отличающемся от направления движения  $\alpha$ -частиц, то его энергия меньше максимальной.

Таким образом,  $\alpha$ -нейтронный источник испускает нейтроны с широким энергетическим спектром, причем максимальная энергия нейтронов примерно равна  $E_\alpha + Q - C$ .

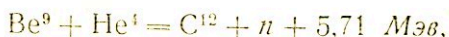
*Сопровождающий  $\gamma$ -фон и период полураспада исходного изотопа.* При изготовлении  $\alpha$ -нейтронных источников наличие сопровождающего  $\gamma$ -фона нежелательно, ибо он существенно осложняет вопросы защиты от излучения, а в некото-

рых случаях приводит к полной невозможности использования нейтронного источника (например, в случае  $n$ -,  $\gamma$ -каротаж). До последнего времени единственным доступным  $\alpha$ -радиоактивным изотопом с низким  $\gamma$ -фоном и достаточно высокой удельной активностью является  $\text{Po}^{210}$ , поэтому  $\text{Po}$ - $\alpha$ - $\text{Be}$ -источники (несмотря на малый период полураспада,  $T_{1/2} = 138$  дней) наиболее широко применяются. Более подробные данные о величине сопровождающего  $\gamma$ -фона будут даны при описании отдельных типов нейтронных источников. Полученные в настоящее время такие  $\alpha$ -радиоактивные изотопы, как  $\text{Pu}^{238}$  ( $T_{1/2} = 86$  лет) и  $\text{Ac}^{227}$  ( $T_{1/2} = 22$  года), значительно расширяют возможность изготовления нейтронных источников с относительно небольшим в случае  $\text{Pu}^{238}$  и достаточно мягким в случае  $\text{Ac}^{227}$   $\gamma$ -фоном и удобным для практического применения периодом полураспада (см. прил. 1 и 2).

### ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ $\text{Po}^{210}$

Короткий период полураспада  $\text{Po}^{210}$  ( $T_{1/2} = 138,4$  дня, высокая энергия  $\alpha$ -частиц ( $E_\alpha = 5,3$  Мэв) и наличие разработанной технологии выделения его в чистом виде обеспечивают возможность изготовления интенсивных нейтронных источников. Низкая температура возгонки полония позволяет осуществить достаточно хорошее перемешивание его атомов с материалом мишени. Возможность получения очень высокой удельной активности препарата  $\text{Po}^{210}$  ( $\sim 10\,000$  кюри/г) дополняется еще одним положительным его свойством — весьма низким уровнем сопровождающего  $\gamma$ -фона ( $0,004$  мр/ч · мкюри). Число сопровождающих  $\gamma$ -квантов равно  $10^{-3}\%$  от числа испускаемых  $\alpha$ -частиц. На основе  $\text{Po}^{210}$  выпускается три типа нейтронных источников:  $\text{Po}$ - $\alpha$ - $\text{Be}$ ,  $\text{Po}$ - $\alpha$ - $\text{V}$  и  $\text{Po}$ - $\alpha$ - $\text{Li}$ . Для их приготовления берется препарат, излучение которого (с учетом излучения примесей) не должно превышать двухкратную интенсивность собственного  $\gamma$ -излучения  $\text{Po}^{210}$ .

**$\text{Po}$ - $\alpha$ - $\text{Be}$ -нейтронные источники.** Нейтроны в  $\text{Po}$ - $\alpha$ - $\text{Be}$ -источниках получаются в результате осуществления экзотермической ( $\alpha, n$ ) реакции:



Выход этой реакции в реальных условиях приготовления стандартных нейтронных источников составляет  $1,7$ — $2,2 \cdot 10^6$  нейтр/сек на одно кюри  $\text{Po}^{210}$ , что довольно близко к теоретическому.

Выпускаемые промышленностью источники имеют непрерывный спектр энергии нейтронов от нуля и до  $11$  Мэв. Расчет спектра практически невозможен, а экспериментальные

данные зависят от флуктуаций технологического процесса (зачастую трудно учитываемых) и конструктивных особенностей источника. Типичный вид спектра Po-Be нейтронных источников показан на рис. 13.

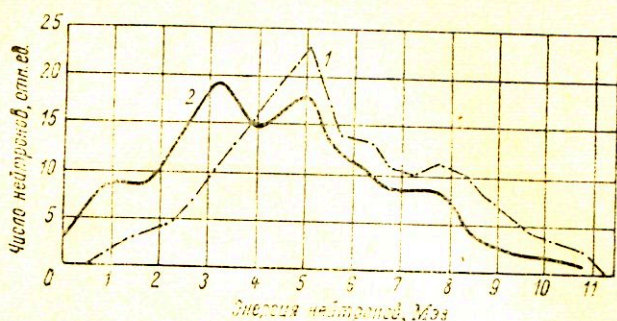


Рис. 13. Спектр нейтронов Po-Be-источника (масштаб произвольный) [13, 14]:  
1 — по данным работы [15]; 2 — по данным работы [16].

Источники обычно приготавливаются конденсацией полония на мелком бериллиевом порошке, на пористой металлокерамике из бериллия или на конденсированном (на внутренней поверхности ампулы) слое бериллия.

Размеры и конструкция Po- $\alpha$ -Be нейтронных источников, выпускаемых отечественной промышленностью, показаны на рис. 14. Из рисунка можно видеть, что активная смесь помещается в герметическую стеклянную ампулу, которая в свою очередь заключается в двойную запаиваемую или заваренную оболочку (внутренняя оболочка обычно изготавливается из латуни, а наружная — из никеля или нержавеющей стали). Размеры ампул, выход нейтронов из источника, а также основные характеристики нейтронного и  $\gamma$ -излучения приведены в табл. 6.

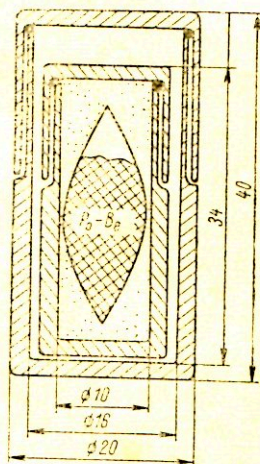


Рис. 14. Продольные сечения Po-Be-источника.

Наряду с приведенными выше положительными свойствами Po-Be-источников они имеют и некоторые недостатки: короткий период полураспада, наличие быстрых нейтронов с энергией выше порога конкурирующих реакций, например ( $n, p$ ); ( $n, pr$ ); ( $n, 2n$ ); ( $n, \alpha$ ), и наличие, хотя и малоинтенсивного, жесткого  $\gamma$ -излучения.

Основные характеристики Po-Be нейтронных источников

Выход нейтронов, <i>нейтр/сек</i>	Размер источника, мм				Спектральный характер
	внутренняя ампула		наружная ампула		
	диаметр	высота	диаметр	высота	
До $10^6$	15	34	20	40	Максимальная энергия нейтронов $E_{\text{макс}} = 11 \text{ Мэв}$ Энергия наиболее интенсивной линии спектра нейтронов $E_{\text{полт}} = 3 \text{ и } 5 \text{ Мэв}$ Выход $\gamma$ -квантов $0,04 \text{ мр/ч} \cdot \text{м}$ на $10^6 \text{ нейтр/сек}$
$1 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^7$	15	34	20	40	
$5 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7$	15	34	20	40	
$2 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^7$	15	34	20	40	

Po-Be-источники с выходом нейтронов до  $10^6 \text{ нейтр/сек}$  в ампуле стандартных размеров можно получить прямым облучением Bi-Be смеси в реакторе (без выделения полония). При облучении смеси в реакторе в результате реакции  $\text{Bi}^{209} (n, \gamma) \text{Bi}^{210} \xrightarrow[5,5 \text{ дня}]{\beta^-} \text{Po}^{210}$  в ней накапливаются ядра полония,  $\alpha$ -частицы которого вступают в реакцию с ядрами бериллия, образуя нейтроны.

Преимущество такой технологии очевидно, так как она полностью исключает химическое выделение полония — крайне опасный и вредный процесс. Однако нейтронные источники с выходом  $10^6 \text{ нейтр/сек}$ , полученные прямым облучением Bi-Be смеси в реакторе, имеют дополнительный  $\gamma$ -фон около  $25 \text{ мг} \cdot \text{экв Ra}$ . Возникновение дополнительного  $\gamma$ -фона связано с активацией оболочки источника и небольшого количества химических примесей в элементах смеси. Тщательная очистка от указанных примесей может обеспечить изготовление нейтронных источников с  $\gamma$ -фоном, близким к собственному фону  $\text{Po}^{210}$ .

Ограничение мощностей нейтронных источников, получаемых прямым нейтронным облучением (до  $10^6 \text{ нейтр/сек}$ ), связано с тем, что в настоящее время для производства изотопов используются реакторы с плотностью нейтронных потоков порядка нескольких единиц на  $10^{13} \text{ нейтр/сек} \cdot \text{см}^2$  [17]. Строительство реакторов с большей плотностью нейтронов позволит в дальнейшем изготавливать нейтронные источники значительно большей мощности.

Ро- $\alpha$ -В нейтронные источники. В Ро-В-источниках нейтроны получаются в результате ядерных реакций (20) и (21).

Более низкий энергетический выход реакции на борной мишени (1,07 и 0,15 Мэв вместо 5,71 Мэв на бериллиевой) является основной причиной относительно мягкого спектра нейтронов у Ро-В-источников. Энергетический спектр нейтронов Ро- $\alpha$ -В-источника приведен на рис. 15 [15], из которого видно, что верхняя граница спектра лежит около 4 Мэв, тогда как у Ро- $\alpha$ -Ве-источников она доходит до 11 Мэв.

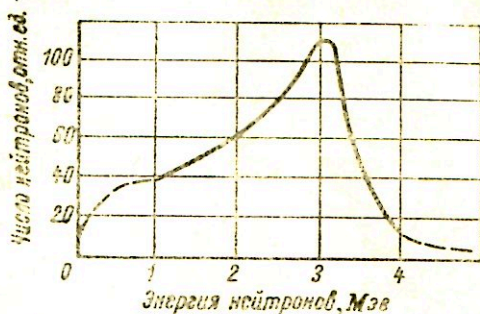


Рис. 15. Спектр нейтронов Ро-В-источника [15].

Ро-В-источники, приготовленные с бором природного изотопного состава, дают выход нейтронов около  $2-4 \cdot 10^5$  нейтр/сек на одно кюри полония.

#### ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ Ra<sup>226</sup>

$\alpha$ -Нейтронные источники на основе Ra<sup>226</sup> представляют собой смесь бромида радия с порошкообразным бериллием, помещенную в двойную латунную (или никелевую) оболочку цилиндрической формы. Толщина стенок внутренней оболочки  $0,5 \pm 0,01$  мм, внешней —  $2 \pm \pm 0,2$  мм. Устройство источника показано на рис. 16, а его размеры и основные характеристики приведены в табл. 7.

Нейтроны в Ra- $\alpha$ -Ве-источниках получают главным образом, как и в случае Ро-Ве-источников, в результате взаимодействия  $\alpha$ -частиц с ядрами бериллия. Однако если в Ро-Ве-источнике имеется только один тип радиоактивных ядер Ро<sup>210</sup>, то в Ra-Ве нейтронном источнике с течением времени накапливаются все продукты распада радия (табл. 8), и спектр его излучения определяется излучением всех изотопов семейства радия.

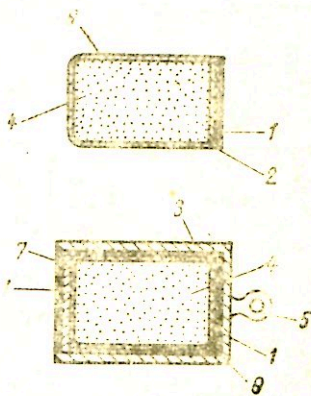


Рис. 16. Продольный разрез Ra- $\alpha$ -Ве-источника:

- 1 — оловянная пайка; 2 — крышка оболочки; 3 — футляр; 4 — активная смесь; 5 — ушко; 6 — внутренняя оболочка; 7 — крышка футляра.

Характеристика Ra-Be нейтронных источников

Выход нейтронов, <i>нейтр/сек</i>	Размер источника, мм				Спектральная характеристика
	внутренняя ампула		наружная ампула		
	диаметр	высота	диаметр	высота	
$1 \cdot 10^4$	4	13	8	17	Максимальная энергия нейтронов $E_{\text{макс}} = 8-9 \text{ Мэв}$ Энергия наиболее интенсивных линий спектра нейтронов $E_{\text{опт}} = 3,5; 5,6; 7,5$ Выход квантов $60 \text{ мр/г} \cdot \text{м на } 10^6 \text{ нейтр/сек}$
$2 \cdot 10^4$	4	13	8	17	
$5 \cdot 10^4$	4	13	8	17	
$1 \cdot 10^5$	4	13	8	17	
$2,5 \cdot 10^5$	11	20	15	24	
$5 \cdot 10^5$	11	20	15	24	
$1 \cdot 10^6$	11	20	15	24	
$2,5 \cdot 10^6$	18	32	22	36	
$5 \cdot 10^6$	18	32	22	36	
$1 \cdot 10^7$	22	33	26	37	

Таблица 8

Равновесное содержание дочерних изотопов семейства радия

Наименование изотопа	Содержание изотопа*	Тип излучения	Средняя энергия на один распад $E_{\alpha} + E_{\beta} + E_{\gamma}$ , кэв
Ra <sup>226</sup>	1	$\alpha, \gamma$	4853
Rn <sup>222</sup>	$0,64 \cdot 10^{-5}$	$\alpha$	5583
Po <sup>218</sup>	$0,35 \cdot 10^{-6}$	$\alpha, \beta$	6108
Pb <sup>214</sup>	$0,3 \cdot 10^{-7}$	$\beta, \gamma$	487
Bi <sup>214</sup>	$0,25 \cdot 10^{-7}$	$\beta, \alpha, \gamma$	2236
Po <sup>214</sup> —Tl <sup>210</sup>	$0,31 \cdot 10^{-11}$	$\alpha, \beta$	7829
			$\Sigma E_i = 27136$

\* Количество Ra<sup>226</sup> принято за единицу, равновесные количества дочерних изотопов указаны по отношению к Ra<sup>226</sup>.



Из данной таблицы и схемы распада семейства радия (см. рис. 3) видно, что в основной цепочке распада  $Ra^{226}$  имеются пять  $\alpha$ - и четыре  $\beta$ -превращения, которые сопровождаются  $\gamma$ -переходами, т. е. распад одного ядра  $Ra^{226}$  сопровождается испусканием пяти  $\alpha$ - и четырех  $\beta$ -частиц и серией  $\gamma$ -квантов. Общая энергия распада  $E_{Ra}$  равна сумме энергий  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -превращений цепочки радия:  $E_{Ra} = E_{\alpha} + E_{\beta} + E_{\gamma} = 27\,136$  кэв.

Выпускаемые промышленностью источники имеют непрерывный спектр энергий нейтронов от нуля до 8—9 Мэв, (рис. 17), выход нейтронов у  $Ra$ - $\alpha$ -Be-источников составляет  $1-1,5 \cdot 10^7$  нейтр/сек на одно кюри  $Ra^{226}$ .

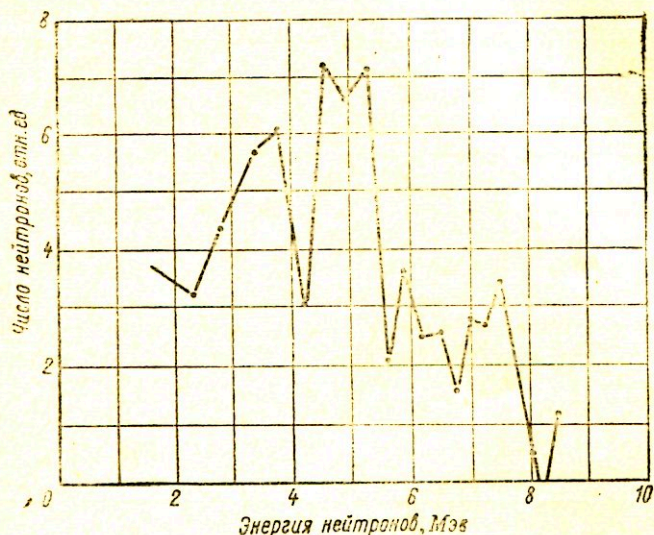


Рис. 17. Спектр нейтронов  $Ra$ - $\alpha$ -Be-нейтронного источника [18] (шкала произвольная).

Таким образом,  $Ra$ - $\alpha$ -Be нейтронные источники имеют гораздо больший период полураспада ( $T_{1/2} = 1622$  года) и больший выход нейтронов на одно кюри радиоактивного препарата по сравнению с  $Po$ -Be-источниками. Однако испускание нейтронов в  $Ra$ - $\alpha$ -Be-источниках сопровождается интенсивным  $\gamma$ -фоном достаточно высокой жесткости (см. табл. 1). Последнее обстоятельство осложняет устройство защиты и в значительной мере ограничивает возможности широкого применения нейтронных источников на основе радия.

## ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ ПЛУТОНИЯ

В последние годы для получения нейтронных источников с большим периодом полураспада наряду с  $Ra^{226}$  применяется  $Pu^{239}$ .  $Pu^{239}$  распадается с испусканием трех групп  $\alpha$ -частиц ( $E_{\alpha_1} = 5,238 \text{ Мэв}$ ,  $E_{\alpha_2} = 5,225 \text{ Мэв}$ ,  $E_{\alpha_3} = 5,187 \text{ Мэв}$ ), две из которых сопровождаются испусканием мягких  $\gamma$ -квантов ( $E_{\gamma_1} = 0,039 \text{ Мэв}$ ,  $E_{\gamma_2} = 0,014 \text{ Мэв}$ ), период его полураспада равен  $2,4 \cdot 10^4$  лет.

Нейтроны в источнике на основе плутония получаются в результате взаимодействия  $\alpha$ -частиц с атомами бериллиевой мишени. Наилучший контакт атомов плутония и бериллия, а также максимальная плотность смеси достигаются приготовлением интерметаллического соединения типа PuBe. Основными преимуществами Pu-Be нейтронных источников являются небольшой уровень и низкая энергия квантов сопровождающего  $\gamma$ -излучения.

Выпускаемые отечественной промышленностью источники представляют собой двойную герметичную цилиндрическую ампулу (внутренняя ампула из латуни герметизирована специальным припоем, наружная ампула из нержавеющей стали заварена с помощью электронной сварки), заполненную порошком или сплавом интерметаллического соединения  $Pu^{239}$  с бериллием. Геометрические размеры ампул и интенсивность потока нейтронов в угле  $4\pi$  приведены в табл. 9. Типичный вид спектра Pu-Be нейтронного источника показан на рис. 18.

Таблица 9

Характеристика  $Pu^{239}$ -Be нейтронных источников

Выход нейтронов, нейтр/сек	Размер источника, мм				Спектральная характеристика
	внутренняя ампула		наружная ампула		
	диаметр	высота	диаметр	высота	
$10^3$	16	22	20	30	Максимальная энергия нейтронов $E_{\text{макс}} = 10-11 \text{ Мэв}$ Энергия наиболее интенсивных линий $E_{\text{опт}} = 3 \text{ и } 4,5 \text{ Мэв}$ Выход $\gamma$ -квантов $1,7 \text{ мр/ч} \cdot \text{м}$ на $10^5 \text{ нейтр/сек}$
$10^4$	16	22	20	30	
$10^5$	16	22	20	30	
$10^6$	16	22	20	30	

Pu-Be нейтронные источники можно эксплуатировать в любой среде, которая не действует агрессивно на нержавеющую сталь марки 1X18H9T при температуре от  $-50^{\circ}$  до  $+100^{\circ}$ С и вибрации в диапазоне частот 5—35 гц при ускорении 1,5 g. Допускаемая загрязненность наружной поверхности источника, снимаемая мазком, не превышает  $1 \cdot 10^{-3}$  мккюри [20].

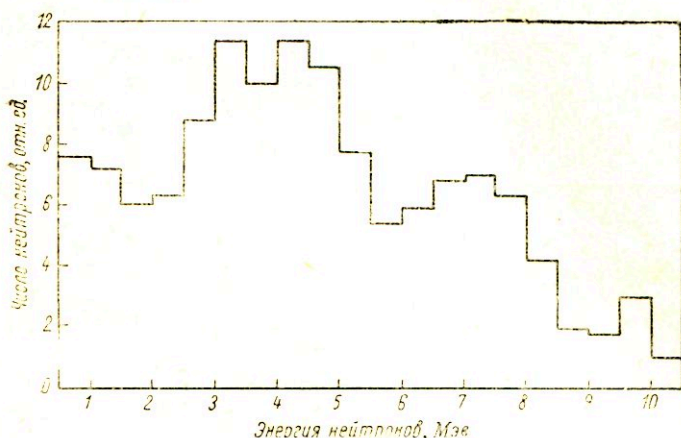


Рис. 18. Спектр нейтронов Pu-Be-источника (шкала произвольная) [19].

Для изготовления нейтронного источника с более высоким удельным выходом вместо Pu<sup>239</sup> можно использовать более короткоживущий изотоп Pu<sup>238</sup> ( $T_{1/2} = 86$  лет). В этом случае сохраняются все положительные свойства Pu<sup>239</sup>-Be нейтронного источника, а удельный выход нейтронов на 1 г плутония повышается на два порядка. Ввиду ограниченной доступности Pu<sup>238</sup> такие источники в настоящее время серийно не выпускаются.

#### ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ Ac<sup>227</sup>

Получение в последние годы весомых количеств Ac<sup>227</sup> дало возможность изготавливать  $\alpha$ - и нейтронные источники с более длительным периодом полураспада (в 50 раз), чем у Po<sup>210</sup>, и значительно более мягким и менее интенсивным  $\gamma$ -излучением, чем у Ra<sup>226</sup>.

Наличие в цепочке распада Ac<sup>227</sup> пяти  $\alpha$ -переходов (см. рис. 4), сопровождающихся испусканием  $\alpha$ -частиц высокой энергии ( $E_{\alpha}$  от 7,36 до 5,334 Мэв), обеспечивает высокий выход нейтронов при изготовлении нейтронных источников на основе Ac<sup>227</sup>. По данным канадской компании «Атомик энерд-

жи оф Канада.» [21], выход нейтронов с коммерческого нейтронного источника на основе смеси  $\text{Ac}^{227}\text{-Be}$  составляет  $1,7\text{--}2 \cdot 10^7$  нейтр/сек·кюри; по данным, полученным в лаборатории Д. М. Зива [12], указанный выход лежит в пределах  $2\text{--}2,3 \cdot 10^7$  нейтр/сек·кюри (табл. 10).

Таблица 10

Характеристика  $\text{Ac-Be}$ -источников

Содержание актиния, мкюри	Выход нейтронов, нейтр/сек	Сопровождающее $\gamma$ -излучение, р/ч·м	Выход ( $\alpha$ , $n$ )-реакции, нейтр/сек·кюри
1	$(1,6 \pm 0,1) 10^4$	0,0002	$2,3 \cdot 10^7$
5	$(9,6 \pm 0,5) 10^4$	0,091	$2,3 \cdot 10^7$
$50 \pm 5$	$(1 \pm 0,05) 10^6$	0,01	$2,0 \cdot 10^7$
$315 \pm 5$	$(6 \pm 0,3) 10^6$	0,07	$2,0 \cdot 10^7$

Приведенные в табл. 10 данные получены с  $\text{Ac-Be}$  нейтронными источниками, приготовленными пропиткой мелкозернистого бериллиевого порошка с зерном не более 5 мк раствором бромида актиния в метиловом спирте. Полученный выход в десять раз превышает выход нейтронов в  $\text{Po-Be}$ -источнике. В  $\text{Ac-Be}$ -источнике, так же как и в  $\text{Ra-}\alpha\text{-Be}$  нейтронном источнике, со временем накапливаются все продукты распада актиния, и спектр его излучения определяется излучением всех изотопов семейства актиния (табл. 11).

Из табл. 11 и схемы распада семейства актиния (см. рис. 4) видно, что в основной цепочке распада актиния имеется пять  $\alpha$ - и три  $\beta$ -превращения, которые сопровождаются  $\gamma$ -переходами, т. е. распад одного ядра  $\text{Ac}^{227}$  сопровождается испусканием пяти  $\alpha$ - и трех  $\beta$ -частиц и серией  $\gamma$ -квантов. Общая энергия распада  $E_{\text{Ac}}$  равна сумме энергий  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -превращений цепочки актиния:  $E_{\text{Ac}} = E_{\alpha} + E_{\beta} + E_{\gamma} = 34205,5$  кэв.  $\text{Ac-Be}$  источники имеют непрерывный спектр энергии нейтронов от нуля до 12 Мэв примерно [21] (рис. 19).

Таким образом,  $\text{Ac-}\alpha\text{-Be}$  нейтронные источники имеют гораздо больший срок службы ( $T_{1/2} = 22$  года), и больший выход нейтронов (в десять раз) на одно кюри радиоактивного препарата по сравнению с  $\text{Po-Be}$ -источниками, и значительно более мягкое и менее интенсивное  $\gamma$ -излучение по сравнению с  $\text{Ra-}\alpha\text{-Be}$ -источниками. Указанные положительные свойства  $\text{Ac-Be}$  нейтронных источников дают основания

Равновесное содержание дочерних изотопов семейства актиния [9]

Наименование изотопа	Содержание изотопа	Тип излу- чения	Средняя энергия на один распад $E_{\alpha} + E_{\beta} + E_{\gamma}$ , кэв
Ac <sup>227</sup>	1	$\beta, \alpha$	65,5
Th <sup>227</sup> -Fr <sup>223</sup>	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$\alpha, \beta, \gamma$	6070
Ra <sup>223</sup>	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$\alpha, \gamma$	5834
An <sup>219</sup>	$0,55 \cdot 10^{-8}$	$\alpha, \gamma$	6951
Po <sup>215</sup>	$2,5 \cdot 10^{-12}$	$\alpha$	7508
Pb <sup>211</sup>	$2,95 \cdot 10^{-6}$	$\beta, \gamma$	541
Bi <sup>211</sup>	$1,75 \cdot 10^{-7}$	$\alpha, \gamma$	6728
Tl <sup>207</sup> -Pb <sup>211</sup>	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$\beta, \alpha, \gamma$	508
			$\Sigma E_i = 34205,5$

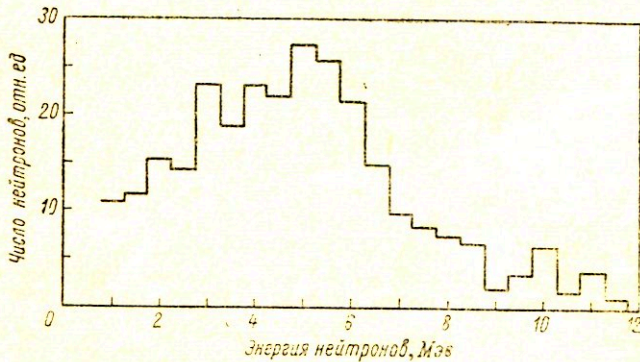


Рис. 19. Спектр нейтронов Ac-Be-источника (шкала произвольная) [22].

полагать, что такие источники найдут весьма широкое применение в массовом производстве.

### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОНЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Как уже было сказано, реакция, ведущая к образованию нейтрона, может быть осуществлена в некоторых ядрах с помощью  $\gamma$ -лучей достаточно высокой энергии. Эти фото-

нейтронные процессы всегда имеют отрицательную энергию реакции, а кулоновского барьера для них не существует.

Энергия излучаемого нейтрона  $E_n$  для такого рода реакций равна (примерно)

$$E_n = E_\gamma - Q, \quad (22)$$

где  $Q$  — минимальная энергия  $\gamma$ -квантов, необходимая для осуществления реакции (пороговая энергия реакции). Пороговая энергия для бериллия, используемого в качестве мишени, составляет 1,67 Мэв, для тяжелого водорода — 2,23 Мэв, а для всех остальных возможных материалов мишеней пороговая энергия достигает 6 Мэв и более. Энергия  $\gamma$ -квантов, испускаемых известными в настоящее время радиоактивными изотопами, не превышает 3—4 Мэв. Поэтому при использовании радиоизотопа в качестве  $\gamma$ -источника мишенью должен служить либо бериллий, либо дейтерий. Бериллий обычно используется в элементарном виде, дейтерий — в виде окиси ( $D_2O$ ).

Из уравнения (22) следует, что нейтроны от фотонейтронного источника являются моноэнергетическими. Наблюдаемый на практике небольшой разброс энергии происходит по следующим причинам: замедление нейтронов при соударениях, комптоновское рассеяние  $\gamma$ -квантов до осуществления реакции и разница в направлении движения  $\gamma$ -кванта и порожденного им нейтрона. Для большинства практических целей, однако, нейтроны от фотонейтронного источника можно рассматривать как моноэнергетические.

Фотонейтронные источники имеют значительно более низкий выход нейтронов на одно кюри, чем  $\alpha$ -нейтронные. Вследствие излучения фотонейтронными источниками квантов высокой интенсивности и энергии они также менее удобны в обращении по сравнению с другими нейтронными источниками, обычно используемыми на практике. Тем не менее в работах, в которых требуется моноэнергетический спектр нейтронов, применение фотонейтронных источников оказывается оправданным.

Ниже приводятся основные характеристики наиболее часто употребляемых фотонейтронных источников (табл. 12).

Из приведенной таблицы можно видеть, что Sb-Be-источник имеет относительно большой период полураспада и достаточно высокий выход нейтронов на кюри радиоактивного препарата. Кроме того, само получение  $Sb^{124}$  по реакции простого радиационного захвата  $Sb^{123} (n, \gamma) Sb^{124}$  идет с большой вероятностью ( $\sigma = 2,5$  барн), поэтому из всех фотонейтронных источников наиболее часто используются именно Sb-Be.

Основная характеристика фотонейтронных источников

Тип источника	Период полураспада	Энергия $\gamma$ -квантов, Мэв	Энергия нейтронов, Мэв	Выход нейтронов, <i>нейтр/сек</i> $\times$ <i>кюри</i>	Выход $\gamma$ -квантов, <i>мр/ч·м</i> (на 1 <i>кюри</i> )
Na <sup>24</sup> -Be	14,8 ч	2,76	0,83	$1,3 \cdot 10^5$	1920
Na <sup>24</sup> -D <sub>2</sub> O	14,8 ч	1,37	0,22	$2,7 \cdot 10^5$	1920
Y <sup>88</sup> -Be	87 дней	2,8 (1%) 1,85 (99%) 0,95 (99%)	0,158	$1 \cdot 10^5$	—
Y <sup>88</sup> -D <sub>2</sub> O	87 дней	0,95 (99%)	0,31	$0,3 \cdot 10^4$	—
Sb <sup>124</sup> -Be	60 дней	1,7	0,024	$1,9 \cdot 10^5$	1200
La <sup>140</sup> -Be	40 ч	2,5	0,62	$0,3 \cdot 10^4$	—
La <sup>140</sup> -D <sub>2</sub> O	40 ч	2,5	0,151	$0,8 \cdot 10^4$	—

В тех случаях, когда необходимы источники нейтронов более высокой энергии, в качестве  $\gamma$ -излучателя используется La<sup>140</sup>, на основе которого могут быть изготовлены источники с энергией нейтронов 0,62 Мэв (La<sup>140</sup>-Be) и 0,151 Мэв (La<sup>140</sup>-D<sub>2</sub>O), или Y<sup>88</sup>, дающий возможность получать нейтроны с энергией 0,31 Мэв (Y<sup>88</sup>-D<sub>2</sub>O) и 0,158 Мэв (Y<sup>88</sup>-Be).

Для получения нейтронных источников с большим выходом, но с более коротким периодом полураспада в качестве  $\gamma$ -излучателя используется Na<sup>24</sup>, обеспечивающий достаточно высокий выход как на бериллиевой ( $1,3 \cdot 10^5$  *нейтр/сек* на 1 *кюри*), так и на дейтериевой ( $2,7 \cdot 10^5$  *нейтр/сек* на 1 *кюри*) мишенях. Энергия нейтронов в таких источниках равна 0,83 Мэв для Na<sup>24</sup>-Be-источника и 0,22 Мэв для Na<sup>24</sup>-D<sub>2</sub>O-источника.

### ОБРАЗЦОВЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Для обеспечения единства измерений плотности нейтронного потока обычно используются так называемые образцовые нейтронные излучатели [23], которые подразделяются на первый и второй разряды. Причем излучатели первого разряда служат для передачи единицы плотности нейтронного потока от государственного эталона к образцовым излучателям второго разряда, которые передают ее к рабо-

чим излучателям\* и к рабочим измерительным приборам, применяемым во всех поверочных лабораториях.

В качестве образцовых нейтронных излучателей применяются: Ra- $\alpha$ -Be; Ra- $\gamma$ -Be; Pu-Be; Ac-Be.

Номиналы нейтронного потока изготавливаемых в СССР образцовых излучателей приведены в табл. 13.

Таблица 13

Номиналы нейтронного потока образцовых излучателей [23]

Наименование излучателя	Внешнее излучение в угле $4\pi^*$ , нейтр/сек				
Ra <sup>226</sup> - $\alpha$ -Be	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	
Ra <sup>226</sup> - $\gamma$ -Be	200 мг Ra ( $3 \cdot 10^7$ нейтр/сек)				
Pu <sup>239</sup> - $\alpha$ -Be	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	
Ac <sup>227</sup> - $\alpha$ -Be	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$

\* Отклонение от номинала у Ra- $\alpha$ -Be, Ra- $\gamma$ -Be и Ac- $\alpha$ -Be-излучателей  $\pm 15\%$ , у Pu- $\alpha$ -Be —  $\pm 20\%$ .

Образцовые нейтронные излучатели изготавливаются в виде сферы (или цилиндра с диаметром, равным высоте) минимально возможных размеров, причем активная смесь (или  $\gamma$ -источник в фотонейтронном излучателе) располагается в центре сферы. Анизотропия нейтронного излучения таких излучателей лежит в пределах  $\pm 2\%$ .

Ra- $\alpha$ -Be-излучатели изготавливаются из смеси Ra<sup>226</sup> с порошком бериллия. Содержание мезотория в препарате  $\leq 1\%$ , бария  $\leq 5\%$ .

Ra- $\gamma$ -Be-излучатели изготавливаются из 200 мг Ra<sup>226</sup>, которые заключаются в герметичную оболочку диаметром 7 мм, расположенную внутри бериллиевой сферы с наружным диаметром 40 мм. Содержание бария и мезотория такое же, как и в случае Ra- $\alpha$ -Be-излучателей, количество нейтронов, испускаемых внутренней ампулой с радием (в отсутствие бериллия), не превышает  $2 \cdot 10^2$  нейтр/сек.

Pu-Be-излучатели изготавливаются в виде интерметаллического соединения Pu<sup>239</sup>Be<sup>13</sup> с примесью Pu<sup>241</sup>  $\leq 0,1\%$ .

Ac-Be-излучатели изготавливаются из смеси бромида актиния с порошком бериллия, причем содержание радия и мезотория в соли актиния не превышает 1%, а бария — 5%.

Сроки поверки образцовых нейтронных излучателей, в течение которых сохраняются их основные характеристики,



установлены следующие: Ra- $\alpha$ -Be и Pu-Be — один раз в три года, Ra- $\gamma$ -Be — один раз в пять лет, Ac-Be — один раз в год.

Образцовые нейтронные излучатели могут эксплуатироваться в условиях относительной влажности до 98% (при 20°C) или под водой (в течение 20—30 мин) в диапазоне температур +250°—70°C в условиях вибрации с ускорением 3g (при частоте от 30 до 60 гц). Герметичность образцовых излучателей не нарушается также при падении их с высоты 1,5—2 м.

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

За последние годы широкое применение для разведки и эксплуатации нефтяных месторождений для определения влажности, активационного анализа и различных исследовательских работ находят портативные нейтронные источники, изготовленные на основе радиоактивных изотопов. В основе использования таких источников лежат два основных процесса взаимодействия нейтронов с веществом: замедление нейтронов в результате их упругого столкновения с атомами среды и поглощение нейтронов с образованием наведенной активности или захватного  $\gamma$ -излучения.

Столкновение быстрых нейтронов, испускаемых источником, с атомными ядрами среды сопровождается изменением направления движения нейтрона и передачей атомным ядрам части кинетической энергии нейтронов. Из законов сохранения энергии и импульса следует, что величина энергии нейтрона  $E_{яд}$ , переданная ядру отдачи, пропорциональна энергии нейтрона  $E_0$  и зависит от отношения масс ядра и нейтрона  $M_{яд}/M_n$ :

$$E_{яд} = \frac{2M_{яд}M_n}{(M_{яд} + M_n)^2} E_0. \quad (23)$$

(В данном случае мы не учитываем неупругих столкновений быстрых и резонансных нейтронов.)

Таким образом, рассеяние нейтронов сопровождается их замедлением до установления теплового равновесия с атомами среды. В табл. 14 указано среднее число упругих столкновений, необходимых для уменьшения энергии нейтронов от 1 Мэв до 0,025 эв — тепловой энергии, соответствующей комнатной температуре.

Из сказанного следует, что водородсодержащие слои являются наиболее эффективными замедлителями; это обстоятельство положено в основу методов поиска нефтеносных слоев и определения влажности различных материалов.

Среднее число упругих столкновений, необходимых для уменьшения энергии нейтронов от 1 Мэв до 0,025 эв

Изотоп	H <sup>1</sup>	H <sup>2</sup>	He <sup>4</sup>	Be <sup>9</sup>	Si <sup>28</sup>	O <sup>16</sup>	U <sup>238</sup>
Число столкновений	18	25	43	80	114	150	2170

По мере замедления нейтронов наряду с упругим рассеянием увеличивается сечение захвата нейтронов, причем сечения захвата для различных изотопов весьма сильно отличаются друг от друга, а сам захват обычно сопровождается созданием нового радиоактивного изотопа или захватного  $\gamma$ -излучения.

Рассмотренные процессы используются при разведке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, при поисках полезных ископаемых, для осуществления активационного анализа, измерения влажности и нейтронной радиографии, а также для различных исследовательских работ, основанных на измерении наведенной активности.

#### РАЗВЕДКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Методы, основанные на применении радиоактивных изотопов и ядерных излучений, в том числе на применении изотопных источников нейтронов, нашли особо широкое применение при поисках и разработке нефтяных и газовых месторождений [24—29]. В настоящее время такие методы являются основными при разведке месторождений, изучении геологических разрезов, а также одними из главных средств контроля за техническим состоянием и качеством капитального ремонта скважин, за проведением работ по законтурному и внутриконтурному заводнению и правильностью разработки месторождений.

При разведке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений применяются главным образом следующие три радиометрических метода, основанные на использовании изотопных источников нейтронов: 1) нейтронный гамма-каротаж (НГК), 2) нейтрон-нейтронный каротаж (ННК) и 3) метод наведенной активности (НА).

#### Метод нейтронного гамма-каротажа

В разведке нефтяных и газовых месторождений главное значение имеет радиоактивный каротаж скважин (РК), основанный на измерении интенсивности ядерных излучений

из пород, вскрываемых скважиной [27—29]. В настоящее время наиболее широко применяются в промышленности методы РК в двух модификациях: метод гамма-каротажа (ГК), который заключается в измерении естественного  $\gamma$ -излучения в скважине, и метод нейтронного гамма-каротажа (НГК), основанный на измерении вторичного  $\gamma$ -излучения, возникающего в горных породах при поглощении нейтронов, источник которых опускается в скважину вместе с измерительным прибором. Полученные методами ГК и НГК данные взаимно дополняют друг друга, поэтому исследование скважин повсеместно проводится обоими методами.

Для радиоактивного каротажа в настоящее время используется двойной прибор, одновременно производящий гамма- и нейтронный гамма-каротаж. В качестве индикаторов для регистрации  $\gamma$ -излучения применяются газоразрядные и сцинтилляционные счетчики. Выпускаемая серийная аппаратура, основанная на использовании разрядных счетчиков, имеет довольно простую конструкцию и высокую термостойкость. Эта аппаратура стабильна в работе, обеспечивает достаточно большую амплитуду импульсов, кроме того, она обладает низкой чувствительностью к регистрации  $\gamma$ -квантов при большом собственном фоне счетчика.

В настоящее время все более широкое распространение получает аппаратура, основанная на использовании в качестве индикаторов излучения сцинтилляционных счетчиков, представляющих собой комбинацию люминесцирующего вещества (люминофора), оптически соединенного с фотоэлектронным умножителем. Сцинтилляции люминофора, вызываемые  $\gamma$ -квантами, преобразуются фотоэлектронным умножителем в импульсы напряжения, которые регистрируются с помощью соответствующей радиосхемы.

Применение сцинтилляционного счетчика в скважинной аппаратуре, где ранее применялись обычные разрядные счетчики, позволяет в несколько раз повысить чувствительность аппаратуры, так как эффективность сцинтилляционного счетчика к  $\gamma$ -излучению достигает нескольких десятков процентов вместо 1—1,5% у разрядного счетчика. Сцинтилляционные счетчики дают возможность анализировать энергетический спектр излучения, что неосуществимо с помощью разрядных счетчиков. К достоинствам сцинтилляционного счетчика можно также отнести сравнительно малый собственный фон и небольшие геометрические размеры сцинтиллятора.

Метод нейтронного гамма-каротажа применяется широко также при разработке нефтяных месторождений для определения положения водонефтяного контакта и контроля за скоростью и направлением движения воды, закачиваемой в пласт для поддержания пластовых давлений.

В процессе разработки нефтяных месторождений важно своевременно выявлять характер продвижения законтурных и подошвенных вод в нефтяную часть залежи, предупреждать разрывы нефтяной залежи на отдельные участки, обеспечивая наибольшее извлечение нефти из пласта. Решение этой задачи методами радиометрии возможно в двух направлениях: одно использует различие в содержании хлора в водоносном и нефтеносном пластах (методы нейтронного гаммакаротажа и нейтронного каротажа), а другое — различие в содержании натрия (метод наведенной активности).

Использование рассматриваемого в настоящем разделе метода НГК при регистрации вторичного  $\gamma$ -излучения, возникающего в результате реакции  $Cl^{37}(n, \gamma)Cl^{38}$ , ограничено месторождениями с высокой минерализацией пластовых вод и однородным литологическим составом пластов. Даже в этом случае значения НГК различных пластов отличаются друг от друга всего на 10—20%<sup>1</sup>.

### Метод нейтрон-нейтронного каротажа

Этот метод основан на том, что нефтеносные и водоносные пласты имеют повышенное содержание водорода и поэтому хорошо замедляют нейтроны (см. табл. 14). В классическом виде этот метод выполняется следующим образом: в опускаемый в скважинную зонд помещается источник быстрых нейтронов (в большинстве случаев Po- $\alpha$ -Be-источник мощностью  $10^6$ — $10^7$  нейтр/сек) и детектор тепловых нейтронов на основе газоразрядного или

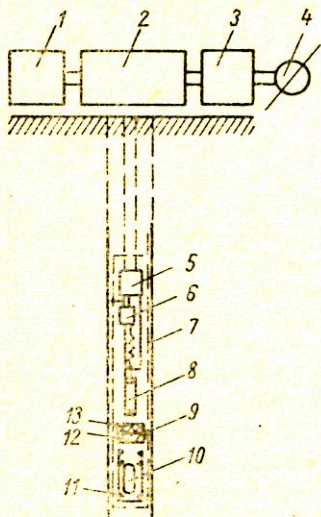


Рис. 20. Блок-схема установки для радиометрических измерений:

1 — источник питания; 2 — пульт управления; 3 — пересчетная схема; 4 — регистрирующий прибор; 5 — первый каскад усиления; 6 — генератор высокого напряжения; 7 — скважинный прибор; 8 — детектор излучения; 9 — экран; 10 — нейтронный источник; 11 — дистанционное управление; 12 — свинец; 13 — парафин.

сцинтилляционного счетчика (рис. 20). Между счетчиком и детектором помещается экран, защищающий детектор от прямого попадания нейтронов. Высокая эффективность замедле-

<sup>1</sup> При использовании спектрометрических методов это различие может быть существенно увеличено.

ния нейтронов в водородсодержащих пластах приводит к тому, что в этом районе фиксируется аномальная плотность тепловых нейтронов.

Наиболее широко метод нейтрон-нейтронного каротажа применяется при определении пористости геологических пластов, а также для установления положения водонефтяного контакта и дистанционного регулирования правильности эксплуатации нефтяных месторождений с помощью законтурного или внутриконтурного заводнения. В последнем случае используется свойство хлора эффективно захватывать тепловые нейтроны ( $\sigma = 30$  барн), что приводит к понижению плотности тепловых нейтронов в водоносном пласте в два-три раза по сравнению с нефтеносным. Однако при измерениях в обсаженной скважине эти различия снижаются по той причине, что быстрые нейтроны, замедляясь в цементе кольца и растворе, заполняющем скважину, создают около регистрирующего прибора интенсивное поле тепловых нейтронов, слабо зависящее от свойств пласта. Наиболее надежное решение вопроса разделения нефтеносных и водоносных пластов дает метод наведенной активности.

### Метод наведенной активности

В основе метода наведенной активности лежат принципы активационного анализа, широко применяемого в технике [25]. Обычно при облучении среды со сложным химическим составом активируется одновременно несколько стабильных элементов, и прибор регистрирует суммарное радиоактивное излучение. Это существенно затрудняет выявление в изучаемой среде интересующего нас элемента. Для облегчения интерпретации результатов используется различное время облучения и селективная регистрация  $\gamma$ -лучей различной энергии. Для этого используются приборы со сцинтилляционными счетчиками, регистрирующими преимущественно  $\gamma$ -кванты интересующей нас энергии. И, наконец, подбирается интервал времени между окончанием облучения и временем измерения наведенной активности.

Для успешного применения метода наведенной активности при разделении нефтеносных и водоносных пластов необходимо, чтобы они достаточно резко отличались друг от друга содержанием элемента, по которому намечено вести анализ (индикаторный элемент), и чтобы содержание элемента в стволе скважины, колонне и цементе не было сравнимым с содержанием в пластах. Индикаторный элемент должен иметь достаточно большое сечение активации нейтронами, а изотоп, получающийся в результате активации, должен быть  $\gamma$ -излучателем с периодом полураспада  $T_{1/2}$ , достаточно резко отличающимся от  $T_{1/2}$  других активированных при облу-

чении элементов, излучение от которых (фон) затрудняет интерпретацию полученных результатов.

Основные элементы, входящие в состав нефти и воды (углерод, водород и кислород), не могут быть использованы для разделения нефтеносных и водоносных пластов методом наведенной активности, так как изотопы, получающиеся в результате облучения углерода и водорода, не являются  $\gamma$ -излучателями, а сечение активации изотопа кислорода чрезвычайно мало. Поэтому обычно пользуются часто наблюдаемой большой разницей в содержании в пластах сопутствующих химических элементов. Наиболее удобны среди них (по периоду полураспада,  $\gamma$ -излучению и сечению активации) натрий и хлор, обычно содержащиеся в значительных концентрациях в пластовых водах и в малых концентрациях — в нефтеносных пластах. Вследствие того что излучение хлора маскируется наведенной активностью изотопов марганца и кальция  $Mn^{55}$  ( $n, \gamma$ )  $Mn^{56}$ ,  $Ca^{48}$  ( $n, \gamma$ )  $Ca^{49}$ , в качестве индикаторного элемента выбирается радиоактивный натрий  $Na^{23}$  ( $n, \gamma$ )  $Na^{24}$ , период полураспада которого и энергия  $\gamma$ -квантов существенно отличаются от сопутствующего излучения  $Mn^{56}$  и  $Ca^{49}$ .

Применение метода НА на одном из отечественных месторождений [26] показало, что наведенная активность в области водоносной части пласта была примерно в шесть раз выше, чем в области нефтеносной. Полученные результаты показывают, что метод может успешно использоваться для определения в разрезе нефтеносных или водоносных пластов и положения водонефтяного контакта. Таким образом, этот метод будет важным средством контроля при определении правильности разработки нефтяных пластов. Метод наведенной активности с успехом используется также и при определении скорости перемещения пластовых вод.

### ПОИСКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В настоящее время различные виды нейтронного каротажа с использованием изотопных источников нейтронов все более широко применяются при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. Увеличивается как число полезных ископаемых, на месторождениях которых ставится нейтронный каротаж, так и количество получаемой при этом информации.

Применение методов, основанных на использовании портативных источников нейтронов, для разведки рудных и нерудных полезных ископаемых имеет следующие общие предпосылки [24].

1. Дифференциация полезного ископаемого и вмещающих пород по водородсодержанию (уголь, бокситы, водоносные пласты).

2. Аномально большие сечения захвата медленных и тепловых нейтронов элементами, входящими в состав полезного ископаемого, и различие в спектрах радиационного захвата, т. е. в энергии и числе квантов, приходящихся на поглощенный нейтрон (бор, марганец и др.).

3. Наличие аномально больших сечений активации ( $\sigma_a$ ) элементов полезного ископаемого при подходящих периодах полураспада возникающего радиоактивного изотопа (меди, алюминия, кремния, кобальта и др.).

Остановимся на нескольких примерах.

*Угольные месторождения.* На угольных месторождениях радиометрические методы (в том числе и НГК) применяются главным образом для выявления угольных пластов, а также для литологического расчленения разреза. Эти методы оказались особенно эффективными в тех районах, где по тем или иным причинам не удастся выделить угольные пласты традиционными методами электрического каротажа.

*Рудные месторождения.* Элементы с высоким значением сечения захвата. Аномально высокая способность бора захватывать тепловые нейтроны по реакции  $B^{10}(n, \alpha) Li^7$  с успехом используется для выделения борсодержащих пород в разрезе скважины и определения ориентировочного содержания бора. В этом случае используются методы ННК и НГК, что существенно сокращает время опробования керна и дает значительный экономический эффект.

Наряду с работами на скважине, применение портативной установки типа «Нейтрон» [28] с нейтронным источником малой интенсивности позволяет в полевых условиях производить анализ химического состава минерального сырья по ослаблению потока медленных нейтронов, проходящих через пробу. Этот метод был применен для экспресс-анализа проб, содержащих бор и литий  $Li^6(n, \alpha) H^3$ , в обоих случаях получены положительные результаты, точность анализа лежит в пределах 10—15%.

Описанные выше методы используются также для анализа других элементов, обладающих большими сечениями поглощения медленных нейтронов (кадмий, гадолиний, самарий). При этом следует иметь в виду, что проведение анализа на искомый элемент возможно при отсутствии других элементов, обладающих высокими поглощающими свойствами, или при учете их влияния другими методами.

Элементы с высоким значением сечения активации. За последние годы для обнаружения и оценки количественного содержания в породах таких элементов, как медь, кобальт, марганец и некоторых других, применяется метод наведенной активности. Причем анализ состава в этом случае производится измерением периода полураспада изо-

топов, образовавшихся в результате взаимодействия с нейтронами ядер элементов, составляющих горную породу. Этот метод в СССР был опробован в скважинных условиях в 1958—1959 гг. для обнаружения и оценки количественного содержания перечисленных выше элементов. Сравнение полученных результатов с другими известными методами показывает, что количественную оценку возможно получить только по методу наведенной активности, а обнаружение меди, кобальта, марганца этим методом следует проводить в тех случаях, когда традиционные методы не дают однозначных результатов.

Метод НА в настоящее время применяется для анализа образцов горных пород (кернах). Применение его в этом случае имеет следующее основное преимущество: за короткий срок без химической обработки пробы можно определить содержание в ней нескольких элементов (например, индия, марганца, алюминия, ванадия, кремния). При наличии достаточно интенсивного нейтронного источника можно определять весьма малые количества элементов с большим  $\sigma_a$ , которые нельзя обнаружить никакими другими методами, что используется главным образом для определения возраста пород.

### Нейтронные источники, используемые при поисках полезных ископаемых

В Советском Союзе в разведочной геофизике, как правило, используются Po-Be нейтронные источники с выходом нейтронов  $10^6$ — $10^7$  нейтр/сек. Эти источники имеют широкий энергетический спектр нейтронов (см. рис. 13), простирающийся до 11 Мэв, и исключительно низкий уровень сопутствующего  $\gamma$ -излучения (см. табл. 6). Перечисленные положительные свойства Po-Be-источников обеспечили им весьма широкое применение при поисках полезных ископаемых, однако в некоторых случаях Po-Be-источники не могут удовлетворить желательным требованиям.

Сравнительно малый срок службы нейтронных источников, приготовленных на основе полония ( $T_{1/2} = 138$  дней), вызывает необходимость периодической их замены и транспортировки к месту использования, что особенно неудобно для отдаленных месторождений и районов крайнего севера.

Наличие в спектре Po-Be-источников нейтронов с высокой энергией приводит к тому, что наряду с активацией под действием тепловых нейтронов за счет  $(n, \gamma)$ -реакции в породах, содержащих легкие элементы (алюминий, кремний, магний, железо и др.), происходит активация в результате пороговых реакций на быстрых нейтронах. Это обстоятельство серьезно



затрудняет активационный каротаж алюминия в присутствии кремния, когда наряду с реакцией  $Al^{27}(n, \gamma)Al^{26}$  идет реакция на быстрых нейтронах  $Si^{28}(n, p)Al^{28}$ . Каротаж марганца затрудняется также в присутствии железа, когда марганец образуется как в результате  $(n, \gamma)$ -реакции на  $Mn^{55} \rightarrow Mn^{55}(n, \gamma)Mn^{56}$ , так и в результате  $(n, \alpha)$ -реакции на  $Fe^{56} \rightarrow Fe^{56}(n, \alpha)Mn^{56}$ .

Наличие у Po-Be-источников жесткого  $\gamma$ -излучения с энергией 4,5 Мэв (хотя и с низким выходом) в некоторых случаях мешает проведению нейтронного гамма-каротажа, в особенности при измерениях на малых зондах.

Какие же нейтронные источники применяются в перечисленных выше случаях?

Из рис. 13, 15, 17—19, на которых приведены спектры различных типов нейтронных источников, можно видеть, что по характеру спектра наиболее близко к Po-Be нейтронному источнику лежит Ac-Be-источник. В связи с этим в последние годы, в тех случаях когда требуются источники с более длительным периодом полураспада, применяются Ac-Be-источники [21] с периодом полураспада  $T_{1/2} = 22$  года. Повышенный  $\gamma$ -фон, сопровождающий распад изотопов семейства актиния, может быть легко ослаблен применением соответствующих свинцовых фильтров [30].

Так, например, свинцовый фильтр толщиной 1 см уменьшает дозу  $\gamma$ -излучения на расстоянии 0,5 м от источника до величины, примерно равной дозе, создаваемой быстрыми нейтронами того же источника. Более того, подбор соответствующих свинцовых фильтров обеспечивает применение Ac-Be нейтронных источников не только с точки зрения техники безопасности, но и с точки зрения более низкого, чем у Po-Be-источника, фона жесткого  $\gamma$ -излучения. Низкий уровень сопровождающего  $\gamma$ -излучения высокой энергии позволяет применять эти источники даже для нейтронного гамма-каротажа, когда фиксируется жесткое  $\gamma$ -излучение нейтронного захвата.

Отличительной особенностью Po-B нейтронных источников является их относительно «мягкий» энергетический спектр (см. рис. 15) нейтронов, простирающихся примерно до 4 Мэв. Поэтому источники такого типа могут быть использованы в активационном каротаже, в тех случаях, когда необходимо избавиться от мешающего влияния активации быстрыми нейтронами. Так, при активации алюмосиликатных пород лишь 0,02% спектра нейтронов лежит выше порога реакции  $Si^{28}(n, p)Al^{28}$ , в то время как у Po-Be-источника таких нейтронов около 50%.  $\gamma$ -фон Po-B-источника также лежит в более мягкой области и связан главным образом с  $\gamma$ -излучением самого  $Po^{210}$  ( $E_{\gamma} \approx 0,8$  Мэв), при больших энергиях интенсивность  $\gamma$ -излучения Po-B-источника значительно меньше, чем у Po-Be.

Положительным свойством Po-B-источников являются также значительно более низкие потери нейтронов в железе обсадной колонны, так как из-за малой энергии нейтронов они практически не претерпевают неупругого рассеяния в железе.

Работы, проведенные с Po-B нейтронными источниками, показали [30], что их можно использовать для активационного каротажа алюмосиликатных пород и определять содержание алюминия независимо от присутствия кремния. При последовательном облучении двумя источниками — Po-Be и Po-B — может быть проведена отбивка кварцевых жил в породе, содержащей значительное количество  $Al_2O_3$ .

Указанные выше различия в спектрах нейтронов, испускаемых Po-B- и Po-Be-источниками, могут быть также использованы для обнаружения марганца в присутствии больших количеств железа, меди в присутствии больших количеств кварца и т. д.

Малый собственный фон  $\gamma$ -излучения Po-B-источника, в особенности в области энергий больше 2 Мэв, позволяет использовать их для нейтронного гамма-каротажа.

### ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

Как только стали доступными источники быстрых нейтронов, пригодные для работы в полевых условиях, нейтронный метод измерения влажности почв, грунтов, различных строительных материалов и конструкций привлек внимание многих научных работников и инженеров-практиков. Этот метод обеспечивает возможность абсолютного измерения, так как в указанных средах основным замедлителем быстрых нейтронов является водород, а почти все количество его приходится на влагу.

Для детектирования медленных нейтронов применяются главным образом пропорциональные борные или сцинтилляционные счетчики (в более ранних работах использовался метод активации фольг — серебряной, родиевой, индиевой — с измерением наведенной активности счетчиком Гейгера—Мюллера), которые обладают достаточной для этих целей эффективностью и оперативностью измерений. Тем не менее громоздкость радиометров с такими счетчиками (вследствие необходимости иметь усилитель с коэффициентом усиления порядка 10 000, дискриминатор и напряжение питания счетчика около 1500 в) затрудняет применение их в полевых условиях.

В последнее время при измерении влажности применяется способ детектирования медленных нейтронов по  $\gamma$ -излучению, образуемому в результате захвата нейтронов в кадмиевом экране [28, 31]  $Cd^{114}(n, \gamma)Cd^{115}$ .

Построенный на этом принципе влагомер представляет собой источник быстрых нейтронов (обычно Po-Be-источники с выходом нейтронов около  $10^6$  нейтр/сек) и галогенный счетчик (СТС-1 или СТС-5) со съёмным экраном из листового кадмия толщиной 0,5 мм; они размещаются в цилиндрической свинцовой защите (рис. 21), предохраняющей счетчик от попадания  $\gamma$ -квантов Po-Be-источника. Измеряя интенсивность  $\gamma$ -излучения с кадмиевым экраном и без него, можно выделить долю захватного излучения в кадмии («кадмиевую разность»). Величина кадмиевой разности пропорциональна плотности медленных нейтронов в месте измерения, а следовательно, пропорциональна и влажности среды. Регистрацию импульсов от счетчика можно проводить с помощью обычных малогабаритных батарейных радиометров, что очень удобно при работе в полевых условиях.

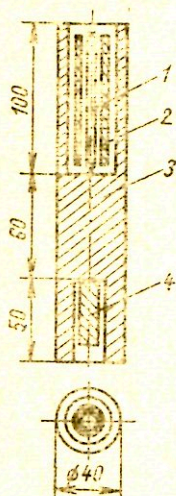


Рис. 21. Схема датчика влагомера:

1 — детектор; 2 — кадмиевый экран; 3 — свинец; 4 — источник.

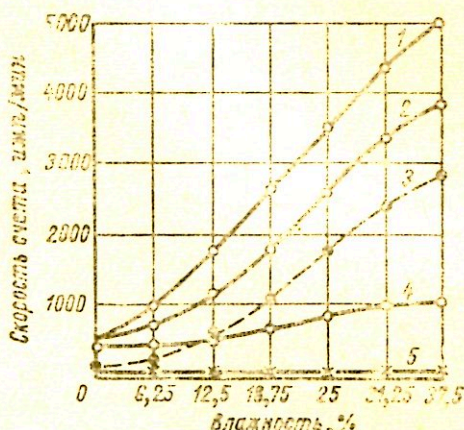


Рис. 22. Измерение влажности по плотности нейтронов и методом кадмиевой разности:

1 — борный счетчик СПМ-5; 2 — СТС-5 с кадмиевым экраном; 3 — кадмиевая разность; 4 — СТС-5 без экрана; 5 — фон.

На рис. 22 приведены результаты, полученные при измерении влажности по плотности нейтронов с помощью борного счетчика СПМ-5 и по методу кадмиевой разности с помощью  $\gamma$ -счетчика СТС-5. Из приведенных на рисунке кривых можно видеть, что кривые, соответствующие кадмиевой разности и скорости счета на борном счетчике, достаточно хорошо сов-

падают, а уровень  $\gamma$ -фона достаточно низок и не зависит от влажности.

При влажности измеряемой среды выше 5—7% основной вклад в регистрируемое излучение вносит захватное  $\gamma$ -излучение от кадмиевых экранов. При использовании зондов с двойным кадмиевым экраном значительная доля излучения, пропорциональная плотности надтепловых нейтронов, приходится на внутренние кадмиевые экраны. Это позволяет, как показали испытания, пренебрегать вариациями химического состава грунтов (хлор, бор, марганец, кобальт и др.) и пользоваться одной калибровочной кривой для почв с различным химическим составом.

### АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

В настоящее время в лабораторной и промышленной практике наиболее широко используется активационный анализ под действием нейтронов [30]. Нейтронный активационный анализ применяется для того, чтобы:

- 1) повысить чувствительность аналитических методов при определении микроконцентраций элементов (менее 0,001%);
- 2) сократить время и упростить существующие методы анализа;
- 3) заменить обычные химические анализы на чисто аппаратный (физический) анализ с непрерывной или периодической выдачей информации.

Остановимся вкратце на указанных областях применения активационного анализа.

1. Создание особо чистых материалов для новых областей современной техники, изучение роли микроэлементов в жизнедеятельности растительных и животных организмов, изучение вопросов гео- и космохимии, а также развитие других научных направлений требует постоянного повышения чувствительности существующих аналитических методов.

Значительные различия в сечениях активации, периодах их полураспада [32] и спектрах излучения различных изотопов, а также современное развитие радиохимии и ядерной спектроскопии позволяют определять ультрамалые содержания примесей до  $10^{-8}\%$  (табл. 15). Однако для проведения такого рода работ обычно требуются высокие плотности нейтронов, которые могут быть получены только на атомных реакторах или на достаточно мощных ускорителях. В настоящее время при некоторых атомных реакторах организованы специальные лаборатории активационного анализа, выполняющие заказы многочисленных лабораторий и промышленных предприятий [17, 33].

2. При массовых анализах многокомпонентных смесей или сложных органических соединений очень важным является

## Минимальное содержание некоторых элементов, обнаруживаемых с помощью активационного анализа [33]

Анализируемый элемент	Тип пробы	Метод анализа	Радиоактивный изотоп, период полураспада	Наблюдаемая концентрация частей на миллион*	Чувствительность частей на миллион**
Al	Магний	Без разрушения образца	Al <sup>28</sup> —2,3 мин или Na <sup>27</sup> —15 ч	160	0,1
	Кремний	То же	То же	1	—
Ar	Газы	"	Ar <sup>41</sup> —109 мин	0,1—100	0,1
As	Животная ткань	Радиохимическое (р/х) разделение	As <sup>76</sup> —26,8 ч	0,005—1,0	0,001
	Иодид лития	То же	То же	0,001	—
Ba	Иодид лития	"	Ba <sup>139</sup> —85 мин	7,0—10,0	0,01
	Вода	"	То же	0,01—1,0	—
Br	Животная ткань	"	Br <sup>82</sup> —35,87 ч	1,0—10,0	0,001
Ca	Ниобий	"	Ca <sup>45</sup> —152 дня	10—50	4,0
Cd	Цирконий	"	Cd <sup>115</sup> —53 ч или Cd—43 дня	1000—10000	0,01
	Животная ткань	"	То же	1,0—5,0	—
Cs	Натрий	"	Cs <sup>134</sup> —2,3 года или Cs <sup>134m</sup> —3,2 ч	15—1000	0,05
	Животная ткань	"	То же	1,0—10	—
Cl	Органические вещества	"	Cl <sup>38</sup> —37,5 мин	5,0—200	0,05
Cr	Ванадий	"	Cr <sup>51</sup> —27,8 дня	3,0—10	0,1
Co	Животная ткань	"	Co <sup>60</sup> —5,3 года	0,1—1,0	0,05
Cu	Металлы	"	Cu <sup>64</sup> —12,8 ч	0,1—300	0,01
Ga	Алюминий	Р/х анализ	Ga <sup>72</sup> —14,2 ч	1,0—5,0	0,01

Анализируемый элемент	Тип пробы	Метод анализа	Радиоактивный изотоп, период полураспада	Наблюдаемая концентрация частей на миллион*	Чувствительность частей на миллион**
Au	Кремний	Без разрушения образца	Au <sup>198</sup> —2,69 дня	0,001—0,03	0,001
Ni	Никелевые сплавы	P/x анализ	Ni <sup>181</sup> —46 дней	8,0—220	0,05
In	Циркониевые сплавы	То же	In <sup>116m</sup> —54 мин	100—1000	0,0001
J	Протеин крови	"	J <sup>128</sup> —25 мин	1,0—10	0,05
Ir	Хлорид радия	"	Ir <sup>194</sup> —19 ч	100—1000	0,0001
Fe	Металлы и сплавы	"	Fe <sup>59</sup> —45,1 дня	0,8—200	0,2
La	Металлы	"	La <sup>140</sup> —40 ч	0,8—10,0	0,001
Mn	Гидроокис лития	"	Mn <sup>56</sup> —2,6 ч	0,5—1,5	0,0001
Hg	Иодид лития	"	Hg <sup>197m</sup> —24 ч	0,5—1,0	0,01
Mo	Цирконий	"	Mo <sup>99</sup> —67 лет	0,6—30	0,2
Ni	Металлы	"	Ni <sup>65</sup> —2,56 года	0,4—20	0,4
O	Металлы	Без разрушения образца	F <sup>18</sup> —112 мин	20—10000	20,0
Pd	Никель	P/x анализ	Pd <sup>100</sup> —13,6 ч	0,2—1,0	0,005
P	Металлы	То же	P <sup>32</sup> —14,3 дня	0,08—25	0,04
K	Животная ткань	"	K <sup>42</sup> —12,4 дня	100—1000	0,02
Sm	Церий	"	Sm <sup>153</sup> —47 лет	0,1—2,0	0,0005
Sc	Бериллий	"	Sc <sup>46</sup> —85 дней	1,0—10,0	0,005
Se	Животная ткань	"	Se <sup>75</sup> —127 дней	0,001—10	0,001
Si	Металлы и сплавы	"	Si <sup>31</sup> —2,6 ч	4,0—100	1,0
Ag	Палладий	"	Ag <sup>100</sup> —270 дней	0,1—1,0	0,1
Na	Алюминий	"	Na <sup>24</sup> —15 ч	1,0—10,0	0,007

Анализируемый элемент	Тип пробы	Метод анализа	Радиоактивный изотоп, период полураспада	Наблюдаемая концентрация частей на миллион*	Чувствительность на частей на миллион**
Sr	Животная ткань	P/x анализ	Sr <sup>87m</sup> —2,8 ч	6,5—30	0,5
S	Металлы	То же	S <sup>35</sup> —87,1 дня	1,0—100	1,0
Ta	Металлы и сплавы	Без разрушения образца	Ta <sup>182</sup> —112 дней	0,1—10000	0,002
Tl	Литий	P/x анализ	Tl <sup>204</sup> —3,5 мин	1,0—5,0	0,2
Sn	Металлы	То же	Sn <sup>135</sup> —9,4 дня	1,0—5,0	0,5
W	Руды	"	W <sup>187</sup> —24 ч	1,0—200	0,001
U	Металлы	"	Np <sup>239</sup> —2,33 дня или Ba <sup>140</sup> — 12,8 дня	1,0—200	0,0001
	Вода	"	То же	0,0001—15	—
V	Нефть	Без разрушения образца	V <sup>52</sup> —3,74 мин	0,1—10	0,0005
Zn	Животная ткань	P/x анализ	Zn <sup>60m</sup> —13,8 года или Zn <sup>65</sup> — 245 дней	1,0—1000	0,02
Zr	Металлы и сплавы	То же	Zr <sup>97</sup> —17 ч	10—10000	0,2
	Животная ткань	"	То же	1,0—1,0	0,2

\* Получена экспериментально.

\*\* Теоретически возможная.

упрощение метода и сокращение времени проведения анализа. Для этой цели в некоторых случаях, когда достаточно велико сечение активации анализируемого элемента, могут быть использованы изотопные источники нейтронов.

При проведении такого рода работ обычно используют комбинацию радиометрических методов определения интенсивности линий интересующего нас изотопа с ускоренными методами микрохимии для предварительного выделения или концентрирования индикаторного элемента. Выбор оптимального сочетания этих методов позволяет существенно сокращать время анализа и затраты на все возрастающие объемы аналитических работ.

3. Бурное развитие химической промышленности и разработка технологии новых материалов в большинстве случаев требуют непрерывного контроля хода технологического процесса. В этом отношении применение активационного анализа является весьма перспективным, ибо позволяет результат анализа в виде сигнала соответствующего радиометрического прибора передавать непосредственно на исполнительное устройство, управляющее той или иной технологической операцией.

При правильном выборе индикаторных элементов, активация которых может производиться с помощью изотопных источников нейтронов (см. табл. 15), радиометрических устройств, способных легко различать излучение этих элементов, и соответствующей системы регулирования, можно осуществлять комплексную автоматизацию, выбор оптимальных режимов ведения процесса, а в некоторых случаях существенно повышать качество продукции.

Мы коротко рассмотрели только основные направления применения активационного анализа, ибо (ввиду ограниченного объема книги) не имеем возможности останавливаться на каждом из многочисленных примеров его использования, которые как в методическом, так и в аппаратурном отношении весьма сильно отличаются друг от друга.

### НЕЙТРОННАЯ РАДИОГРАФИЯ

Для радиографического исследования слитков, различного рода изделий и сборок обычно применяются рентгеновские или  $\gamma$ -лучи. Однако в некоторых случаях, когда, например, необходимо исследовать наличие включений с плотностью, близкой к плотности основного материала, использование нейтронной радиографии является более эффективным. В этих случаях относительно большая эффективность нейтронных методов объясняется тем обстоятельством, что поглощение нейтронов даже близкими по плотности материалами весьма различно, тогда как поглощение рентгеновских и  $\gamma$ -лучей приблизительно пропорционально плотности вещества.

Вследствие того что нейтроны не оказывают заметного влияния на фотопластинку, для их фиксирования используются косвенные методы. Применение тонких слоев бора или лития дает возможность «превращать» поток нейтронов в  $\alpha$ -частицы, фиксируемые фотопленкой (или непосредственно или через возбуждение флуоресценции соответствующего экрана). По другому методу можно использовать кадмиевую фольгу, в которой под действием нейтронов возникает захватное  $\gamma$ -излучение, фиксируемое фотопленкой. Можно так-



же использовать фольгу из индия, серебра или золота. Такая фольга становится радиоактивной при облучении нейтронами, образуящееся же радиоактивное «изображение» можно перевести на фотографическую пленку. Последний метод имеет то преимущество, что исключает мешающий  $\gamma$ -фон самого нейтронного источника.

Особый интерес представляет применение нейтронных методов для осуществления автордиографии образцов, в составе которых имеются элементы, преобразующие нейтроны в тот или иной вид ионизирующего излучения. В этом случае облучение нейтронами специально приготовленного среза (шлифа) дает возможность непосредственно зафиксировать картину распределения указанных элементов в исследуемом образце.

### ПУСК РЕАКТОРА

Основным условием работы атомного реактора, как известно, является создание такого режима, когда общее число рождающихся в нем нейтронов равно количеству поглощенных и ушедших за пределы реактора, т. е. коэффициент размножения  $K=1$  (условие критичности). Согласно этому условию все реакторы можно подразделить на две группы: под- и надкритичные.

В случае подкритичных реакторов для поддержания в них цепной ядерной реакции внутрь реактора вводится нейтронный источник, который восполняет недостаток нейтронов, приближая систему к условию критичности. Таким образом, для работы подкритичного реактора необходим посторонний источник нейтронов, для чего обычно используются изотопные нейтронные источники.

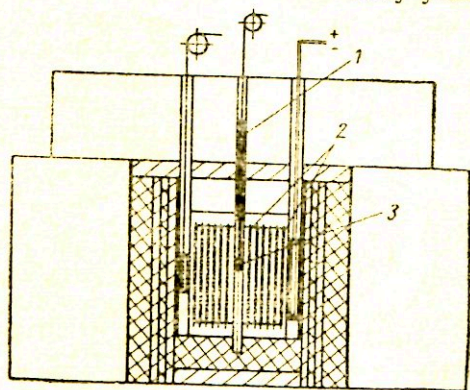


Рис. 23. Продольный разрез нейтронного реактора-размножителя

1 — регулирующий стержень; 2 — урановый стержень; 3 — нейтронный источник.

Характерным примером такого применения нейтронного источника является использование его при работе нейтронного реактора-размножителя (рис. 23) [34]. Указанный нейтронный реактор-размножитель представляет собой транспортабельную урановодную гетерогенную подкритичную сборку мощностью

0,5 Вт с Po-Be нейтронным источником интенсивностью  $5 \cdot 10^7$  нейтр/сек (в качестве индуцирующего начального потока). Коэффициент размножения такой установки  $K=0,997$ . Применение нейтронных источников в сочетании с подкритичной урановой сборкой, показанной на рис. 23, позволяет на два порядка увеличить поток тепловых нейтронов в каналах для облучения исследуемых образцов.

В случае надкритических реакторов изотопные источники нейтронов необходимы только на период пуска реактора для создания некоторой начальной плотности нейтронов [21], необходимой для осуществления управляемого процесса деления. Для этих целей пригоден любой тип рассмотренных выше нейтронных источников, однако наиболее выгодным является сурьмяно-бериллиевый фотонейтронный источник. Такой источник, не активированный однажды в стороннем реакторе, будет постоянно облучаться нейтронами внутри реактора, для запуска которого он предназначен. Таким образом, уменьшение его нейтронного выхода вследствие распада атомов  $Sb^{124}$  будет восстанавливаться за счет активации атомов  $Sb^{123}$ .

Когда для запуска реактора требуются нейтронные источники с высоким нейтронным выходом, могут использоваться либо Po-Be-, либо Ra-Be-источники. В последнем случае обычный Ra-Be нейтронный источник, описанный в разделе «Нейтронная радиография», подвергается предварительному облучению в реакторе, что существенно (на порядок величины) повышает его нейтронный выход за счет образования  $Ac^{227}[Ra^{226} (n, \gamma) Ra^{227} \xrightarrow[41,2 \text{ мин}]{\beta^-} Ac^{227}]$  и  $RaTh^{228} [Ac^{227} (n, \gamma) Ac^{226} \xrightarrow[6,17 \text{ ч}]{\beta^-} Th^{228}]$  с продуктами их распада. Такой источник дает очень высокий выход нейтронов (до  $10^8$  нейтр/сек на кюри исходного радия) при относительно низкой стоимости.

Поскольку периоды полураспада  $Ac^{227}$  и  $Th^{228}$  достаточно велики ( $T_{Ac^{227}} = 22$  года и  $T_{Th^{228}} = 1,9$  года), облученные Ra-Be-источники нет необходимости постоянно держать в реакторе, тем более что это приводит к выгоранию исходных ядер  $Ra^{226}$ .

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ, ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ

Наряду с применением нейтронных источников в промышленности и сельском хозяйстве немаловажное значение они имеют и при проведении всевозможных исследовательских работ, а также при организации обучения специалистов в различных учебных и научно-исследовательских институтах.

Так как в большинстве случаев главный интерес представляют тепловые нейтроны, то изотопные источники нейтронов обычно окружаются хорошим замедлителем, таким, как парафин или вода. Образец или мишень затем вводят в парафин или воду на соответствующем расстоянии, где поток тепловых или быстрых нейтронов соответствует решаемой задаче. Наибольший поток тепловых нейтронов — вблизи источника (в этом случае тепловые нейтроны отражаются обычно из замедлителя), однако количество быстрых нейтронов в этом месте также очень велико. Для получения почти оптимального отношения тепловых нейтронов к быстрым мишень необходимо помещать в парафин или воду на расстоянии около 10 см от источника. Чтобы получить наибольший поток тепловых нейтронов в этом месте, замедлитель необходимо отдалить еще на 20 см от источника, что увеличит отражение тепловых нейтронов.

При таком устройстве отношение потока быстрых нейтронов к тепловым при нахождении мишени на расстоянии 10 см от источника составляет 1:6. Для  $\alpha$ -нейтронного источника с выходом  $10^6$  нейтр/сек потоки тепловых нейтронов в воде на различных расстояниях от источника приводятся в табл. 16. На рис. 24 дано примерное распределение нейтронов в воде от Ra-Be-источника.

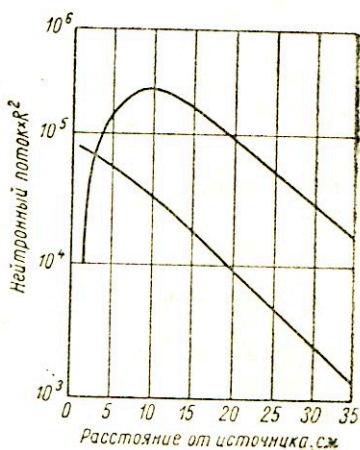


Рис. 24. Распределение нейтронов в воде, окружающей Ra-Be-источник (верхняя кривая для тепловых, а нижняя — для быстрых нейтронов).

Таблица 16

Распределение тепловых нейтронов в воде

Расстояние от источника, см	4	10	20	50
Поток тепловых нейтронов (нейтр/см <sup>2</sup> · сек) от источника с выходом нейтронов $10^6$ нейтр/сек	6400	2200	230	2

Применение портативных нейтронных источников для учебных и научно-исследовательских целей в последние годы непрерывно расширяется.

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ИСТОЧНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЙ

Основные вопросы техники безопасности при работе с радиоактивными веществами и источниками проникающих излучений изложены в «Санитарных правилах работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений», утвержденных Главным государственным санитарным инспектором СССР и председателем Государственного комитета Совета Министров СССР по использованию атомной энергии [4]. В настоящем разделе мы приводим минимальные сведения, необходимые для лиц, начинающих работать с закрытыми источниками излучений в различных отраслях народного хозяйства.

1. Устройство, в которое помещен источник излучения, должно быть устойчиво к механическим, температурным и другим воздействиям в соответствии с условиями его использования.

2. Все закрытые источники в нерабочем положении должны находиться в защитных устройствах.

3. При работе с закрытыми источниками не предъявляются какие-либо специальные требования к отделке помещений и оборудованию, так как при их эксплуатации в нормальных условиях не происходит загрязнения внешней среды радиоактивными газами и аэрозолями. В данном случае предъявляются требования только к обеспечению защиты от излучений (табл. 17), а при использовании источников с радиационным выходом более  $10 \text{ г} \cdot \text{экв Ra}$  — к принудительной вентиляции.

4. Перезарядка приборов и аппаратов источниками излучений должна производиться организациями, имеющими специальные приспособления для этих целей и соответствующее разрешение органов санитарного надзора.

5. Источники с эманлирующими веществами (радий, мезоторий и др.), а также находившиеся в условиях, не предусмотренных в правилах их эксплуатации (превышение допустимой температуры, давления, ударной нагрузки и т. д.), необходимо проверять на герметичность с целью определения возможной утечки радиоактивного вещества. Предельно допустимые концентрации радиоактивных веществ в воде и воздухе приведены в табл. 18.

6. Во всех учреждениях, где проводятся работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, должен осуществляться дозиметрический и радиометрический контроль, который позволяет своевременно выявить и устранить источники опасных уровней излучений и загрязнений воздуха, оборудования и помещения радиоактивными веществами. В табл. 19 приводится перечень аппаратуры,

Предельно допустимые уровни (ПДУ) низирующей радиации, соответствующие дозе 100 мбэр/неделя (или 5 бэр/год) для лиц, работающих с источниками низирующих излучений \*

Вид излучения	Энергия излучения	Доза или количество излучения за одну неделю	Предельно допустимая мощность дозы или интенсивность излучения		
			единица измерения	при работе $t=36$ ч в неделю	при работе $t$ ч в неделю
Г- и рентгеновские лучи	До 3 Мэв	100 мр	мр/ч	2,8	100/т
$\beta$ -Частицы	До 10 Мэв	$2,5 \cdot 10^6$ $\beta$ -частиц/см <sup>2</sup>	$\beta$ -частиц/см <sup>2</sup> ·сек	20	700/т
Тепловые нейтроны	0,025 эв	$100 \cdot 10^6$ нейтр/см <sup>2</sup>	нейтр/см <sup>2</sup> ·сек	750	2700/т
Медленные нейтроны	0,1 эв	$72 \cdot 10^6$ нейтр/см <sup>2</sup>	То же	550	20000/т
Промежуточные нейтроны	0,1 Мэв	$11 \cdot 10^6$ нейтр/см <sup>2</sup>	-	90	3200/т
Быстрые нейтроны	10 Мэв	$2,6 \cdot 10^6$ нейтр/см <sup>2</sup>	-	20	720/т

\* Для кистей рук ПДУ устанавливаются в десять раз большими для  $\beta$ -частиц и в пять раз большими для всех других видов низирующих излучений по сравнению с приведенными в таблице.

Предельно допустимые концентрации изотопов, используемых для получения нейтронных источников в воде открытых водоемов и источников водоснабжения, а также в воздухе рабочих помещений, санитарно-защитных зон и населенных пунктов

Изотопы	ПДК, кюри/л			
	в воде открытых водоемов и источников водоснабжения	в воздухе		
		рабочих помещений	санитарно-защитных зон	населенных пунктов
Na <sup>24</sup>	8·10 <sup>-9</sup>	1·10 <sup>-10</sup>	1·10 <sup>-11</sup>	1·10 <sup>-12</sup>
Sb <sup>124</sup>	7·10 <sup>-9</sup>	2·10 <sup>-11</sup>	2·10 <sup>-12</sup>	2·10 <sup>-13</sup>
La <sup>140</sup>	7·10 <sup>-9</sup>	1·10 <sup>-10</sup>	1·10 <sup>-11</sup>	1·10 <sup>-12</sup>
Pb <sup>210</sup>	1·10 <sup>-11</sup>	3·10 <sup>-14</sup>	3·10 <sup>-15</sup>	3·10 <sup>-16</sup>
Po <sup>210</sup>	2·10 <sup>-11</sup>	1·10 <sup>-10</sup>	1·10 <sup>-15</sup>	1·10 <sup>-16</sup>
Ra <sup>226</sup>	5·10 <sup>-11</sup>	3·10 <sup>-14</sup>	3·10 <sup>-15</sup>	3·10 <sup>-16</sup>
Ac <sup>227</sup>	6·10 <sup>-10</sup>	2·10 <sup>-15</sup>	2·10 <sup>-16</sup>	2·10 <sup>-17</sup>
Th <sup>238</sup>	2·10 <sup>-9</sup>	6·10 <sup>-15</sup>	6·10 <sup>-16</sup>	6·10 <sup>-17</sup>
Pu <sup>239</sup>	5·10 <sup>-11</sup>	2·10 <sup>-15</sup>	2·10 <sup>-16</sup>	2·10 <sup>-17</sup>

используемой для осуществления дозиметрического контроля с указанием диапазона измерений и типа излучателя, рекомендуемого для поверки того или иного прибора. В табл. 20, 21 дана характеристика указанных рабочих (контрольных) излучателей.

### КОНТЕЙНЕРЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Все применяемые в настоящее время контейнеры для перевозки нейтронных источников можно подразделить на два типа: контейнеры для нейтронных источников с малым и большим  $\gamma$ -фоном.

1. Типичным представителем контейнеров для транспортировки нейтронных источников с малым  $\gamma$ -фоном являются контейнеры для перевозки Po-Be-источников. Общий вид такого контейнера показан на рис. 25. Из приведенного рисунка можно видеть, что стандартные контейнеры представляют собой стальной каркас, заполненный парафином — поглотителем и поглотителем нейтронов, в центре которого поме-

Перечень и основные характеристики дозиметрических приборов и рекомендуемых излучателей для их поверки и настройки

Область применения прибора	Название прибора	Измеряемый энергетический интервал	Тип детектора	Диапазон измерений	Рекомендуемый излучатель
Измерение суммарной дозы $\gamma$ -излучения	Дозиметр ДК-02	0,2—2 Мэв	Ионизационная камера То же »	До 0,2 р	Co <sup>60</sup> (2×2 мм)
	ДК-50 КИ-1	0,2—2 Мэв 0,2—2 Мэв	»	До 50 р 0,02—2 р	Co <sup>60</sup> (5×5 мм) Co <sup>60</sup> (2×2 мм)
Измерение мощности дозы $\gamma$ -излучения	Переносный микрорентгенометр ПМР-1М	0,2—3 Мэв	»	1—10 000 мр/ч	Co <sup>60</sup> (2×2 мм)
	Рентгенометр «Карагач»	0,2—3 Мэв	»	10—100 000 мкр/сек	Co <sup>60</sup> (5×5 ; 2×2 мм)
	Микрорентгенометр «Кактус»	0,2—3 Мэв 0,2—3 Мэв	ДНГ-5 ДНГ-1	0,2—20 000 мкр/сек 1—100 000 мкр/сек	Co <sup>60</sup> (2×2 мм) Co <sup>60</sup> (5×5 ; 2×2 мм)
	Микрорентгенометр мелинцевый МРМ-1	0,1—1,2 Мэв	Ионизационная камера	0,1—1000 мкр/сек	Co <sup>60</sup> (2×2 мм)
Сигнализатор превышения уровня $\gamma$ -излучения	Сигнализатор для дозиметрических СД-1М	Co <sup>60</sup>	Счетчик СТС-1	2—10 мкр/сек (диапазон регулировки)	Co <sup>60</sup> (2×2 мм)
Измерение потока $\alpha$ -частиц	Радиометр универсальный переносной РУП-1	> 1 Мэв	100 см <sup>2</sup>	1—20 000 $\alpha$ -частиц/см <sup>2</sup> ·мин	Pd <sup>210</sup> (100 см)
	Универсальный радиометр ТИСС	> 2 Мэв	100 см <sup>2</sup>	0,1—4000 $\alpha$ -частиц/см <sup>2</sup> ·мин	Pd <sup>210</sup> (23 н 7 см <sup>2</sup> )

Измерение потока β-частиц	РУП-1	> 50 кэв	Счетчик СБТ-10	10—50 000 β-частиц/см <sup>2</sup> · мин	Si <sup>90</sup> (100 см <sup>2</sup> )
	ТИСС	> 100 кэв	Счетчик СТС-6	3—100 000 β-частиц/см <sup>2</sup> · мин	Si <sup>90</sup> (150 см <sup>2</sup> )
Измерение потока нейтронов	РУП-1	Тепловые нейтроны	ZnS (Ag) + В	20—10 <sup>5</sup> тепловые нейтроны/см <sup>2</sup> · мин	Pu-Be (2 · 10 <sup>2</sup> — 10 <sup>5</sup> нейтр/сек)
	РУП-1	0,5—14 Мэв	ZnS (Ag) + + пленкиглас	20—10 <sup>5</sup> быстрые нейтроны/см <sup>2</sup> · мин	Pu-Be (2 · 10 <sup>2</sup> — 10 <sup>5</sup> нейтр/сек)
	Радиометр РН-3 (эфир-1)	Тепловые нейтроны 0,5—14 Мэв	ZnS (Ag) + В	150—50 000 тепловые нейтроны/см <sup>2</sup> · мин	Pu-Be (10 <sup>5</sup> нейтр/сек)
	РУП-1 (эфир-2)	Тепловые нейтроны 0,5—14 Мэв	ZnS (Ag) + + пленкиглас ZnS (Ag) + В	10—3500 быстрые нейтроны/см <sup>2</sup> · мин 150—50 000 тепловые нейтроны/см <sup>2</sup> · мин	Pu-Be (10 <sup>5</sup> нейтр/сек)
Измерение потока γ-квантов	РУП-1	Со <sup>60</sup>	ZnS (Ag) + + пленкиглас	10—3500 быстрые нейтроны/см <sup>2</sup> · мин	Pu-Be (10 <sup>5</sup> нейтр/сек)
	Радиометр карманный	Со <sup>60</sup>	Счетчики СИ-3БГ СТС-5	2—10 000 мкр/сек	Со <sup>60</sup> (2 × 2 мм)
			СИ-1БГ СИ-2БГ	0,2—1000 мкр/сек 0,1—1000 мкр/сек	Со <sup>60</sup> (2 × 2 мм)
Измерение загрязненности радиоактивными аэрозолями	Установка для осаждения аэрозолей на фильтрах РВ-3	---	Фильтр типа ФПП	---	Наборы α- и β-излучателей



Основные характеристики рабочих  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучателей

Таблица 20

Тип излучения	Изотоп	Единица измерения радиационного выхода	Размер подложки, мм		Номиналы радиационного выхода, частиц/мин·см <sup>2</sup>	Отклонение от номинала, %	Неравномерность нанесения, %	Точность измерения, %
			активной части	всей подложки				
$\alpha$	Pu <sup>239</sup> U <sup>233</sup> U <sup>235</sup> U <sup>238</sup>	$\alpha$ -частиц/мин со всей активной поверхности излучателя в угле 2 л	$\varnothing = 12$	$\varnothing = 36$	12—3,5·10 <sup>7</sup> 12—8·10 <sup>6</sup> 12—2·10 <sup>3</sup> 12—315	10	10	7
			$\varnothing = 36$	$\varnothing = 66$				
			$\varnothing = 71$	$\varnothing = 101$				
			$\varnothing = 113$ $\varnothing = 143$ $\varnothing = 173$ 105×155	$\varnothing = 143$ $\varnothing = 173$ $\varnothing = 173$ 135×185				
$\beta$	Sr <sup>90</sup> +Y <sup>90</sup> Tl <sup>204</sup> Co <sup>60</sup> C <sup>14</sup> Pm <sup>147</sup>	$\beta$ -частиц/мин со всей активной поверхности излучателя в угле 2 л	$\varnothing = 12$	$\varnothing = 35$	31—1,25·10 <sup>9</sup>	10	10	7
			$\varnothing = 36$	$\varnothing = 66$				
			$\varnothing = 71$	$\varnothing = 101$				
			$\varnothing = 113$ $\varnothing = 143$ $\varnothing = 173$ 105×155	$\varnothing = 143$ $\varnothing = 173$ $\varnothing = 173$ 135×185				

Примечание. Измерение радиационного выхода излучателей производится относительным методом — сравнением измеряемого излучателя с образцовым на установке Б со сцинтиляционной приставкой. Радиационный выход определяется по формуле

$$A_{изл} = A_{обр} \frac{M_{изл} K_1 - N_{\Phi}}{N_{обр} K_2 - N_{\Phi}}$$

(24), где  $K_1$ ,  $K_2$  — поправки на разрешающее время счетчика;  $A_{изл}$  — радиационный выход измеряемого излучателя, частиц/мин;  $A_{обр}$  — радиационный выход образцового излучателя, частиц/мин;  $N_{изл}$  — число импульсов в 1 мин от измеряемого излучателя;  $N_{обр}$  — число импульсов в 1 мин от образцового излучателя.

1. Излучатели из Sr<sup>90</sup>+Y<sup>90</sup>, Tl<sup>204</sup>, Co<sup>60</sup> с активной поверхностью до 10 см<sup>2</sup> измеряются относительным методом путем сравнения с образцовым излучателем на установке Б со счетчиком типа Т-25 БФЛ на расстоянии от поверхности излучателя до торца счетчика: 15 мм для Sr<sup>90</sup> до 105 частиц/мин, 50 мм выше 105 частиц/мин, 12 мм для Tl<sup>204</sup> до 500 000 частиц/мин, 50 мм выше 5·10<sup>5</sup> частиц/мин, 15 мм для Co<sup>60</sup> до 10<sup>6</sup> частиц/мин, 50 мм выше 10<sup>6</sup> частиц/мин.

2. Излучатели из Sr<sup>90</sup>, Tl<sup>204</sup>, Co<sup>60</sup> с активной поверхностью выше 10 см<sup>2</sup> измеряются тем же методом, но с применением соответствующих экранов, прямоугольные излучатели измеряются тем же методом на установке Б со счетчиками СТС-6 (3 штуки).

3. Излучатели из C<sup>14</sup> и Pm<sup>147</sup> измеряются тем же методом и при тех же условиях, что и излучатели из Co<sup>60</sup>, но с применением в установке Б счетчиков Т-25 БФЛ с толстой слюды до 1,2 мг/см<sup>2</sup>.

4. Радиационный выход рассчитывается по формуле (24). Отклонения от номинала и неравномерность нанесения рабочих излучателей составляют 10%, а точность измерения — 7%.

Основные характеристики рабочих  $\gamma$ -излучателей  
(отклонение от номинала 20%, точность измерения 2—5%)

Изотоп	Форма излучателя	Размеры излу- чателя, мм	Радиационный выход*, г.э.кв Ра
Ra	Стеклянная ампула в футляре из латуни	5×40	0,2
		5×40	0,1
		5×20	0,05
		5×20	0,3
		5×20	0,02
		5×20	0,01
		5×15	0,005
		5×15	0,003
		5×15	0,002
		5×15	0,001
		5×15	$1 \cdot 10^{-4}$
		5×15	$2 \cdot 10^{-4}$
		5×15	$1 \cdot 10^{-5}$
		5×15	$1 \cdot 10^{-6}$
Co <sup>60</sup>	Проволока, помещенная в футляр	0,7×5	$5 \cdot 10^{-4}$
		0,7×10	$1 \cdot 10^{-3}$
		0,7×20	$2 \cdot 10^{-3}$
		0,7×30	$3 \cdot 10^{-3}$
		0,7×50	$5 \cdot 10^{-3}$
		0,9×10	$2 \cdot 10^{-3}$
		0,9×10	$5 \cdot 10^{-3}$
		0,9×10	$1 \cdot 10^{-2}$
		0,9×20	$1 \cdot 10^{-2}$
		0,9×10	$5 \cdot 10^{-2}$
		0,9×60	$3 \cdot 10^{-2}$

Изотоп	Форма излучателя	Размеры излучателя, мм	Радиационный выход*, г-экв Ra
	Цилиндр, помещенный в алюминиевую ампулу	2×2	10 <sup>-1</sup>
		2×2	2,5·10 <sup>-1</sup>
		2×2	5·10 <sup>-1</sup>
		2×2	1
		5×5	2,5
		5×5	10
		2×2	10 <sup>-2</sup>
		2×2	2,5·10 <sup>-2</sup>
		2×2	5·10 <sup>-2</sup>

\* Измерение проводится относительным методом — сравнением с образцовыми излучателями. Сравнение проводится на приборе типа «Кактус» с набором ионизационных камер типа ДИГ в одних и тех же геометрических условиях на определенном расстоянии. Измерение излучателей с высоким радиационным выходом проводится на той же установке, только под водой.

Таблица 22  
Вес и габариты контейнеров для перевозки Po-Be-источников

Тип контейнера	Габариты контейнера, мм		Вес контейнера, кг	Мощность источника, на которую рассчитан контейнер, нейтр/сек
	диаметр	высота		
КН-2	1000	964	700	От 1·10 <sup>3</sup> до 2·10 <sup>3</sup>
КН-3	900	924	600	До 10 <sup>3</sup>
КН-4	630	624	200	До 1,2·10 <sup>2</sup>

Таблица 23  
Допустимые мощности нейтронного излучения для различных транспортных категорий

Транспортная категория	Поток нейтронов, нейтр/сек	
	на поверхности контейнера	на расстоянии 1 м от контейнера
1	2	—
2	400	2
3	800	40

## Вес и габариты контейнеров для перевозки Ra-Be нейтронных источников

Тип контейнера	Габариты контейнера, мм		Вес контейнера, кг	Мощность источника, на которую рассчитан контейнер, нейтр/сек
	диаметр	высота		
КН-5	—	—	240	$10^6$
КН-6	1140	866	693	$10^7$
КН-7	1010	720	306	$3 \cdot 10^6$
КН-8	305	220	99	$10^5$

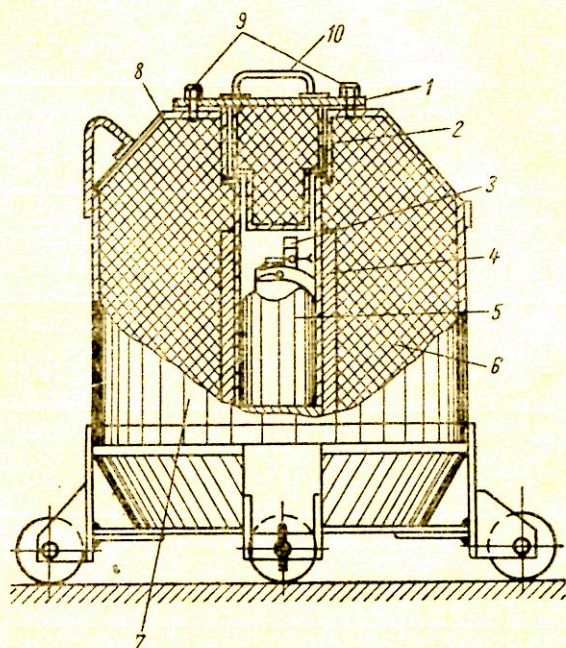


Рис. 26. Транспортный контейнер для перевозки Ra-Be нейтронных источников.

1 — прокладка; 2 — пробка; 3 — ручка переносного герметического контейнера; 4 — стакан; 5 — переносной герметический контейнер; 6 — наполнитель-парафин; 7 — герметичный транспортировочный контейнер; 8 — парафин; 9 — зажимные болты; 10 — ручка пробки.

Вес и габариты выпускаемых в СССР контейнеров приведены в табл. 24.

Изменение активности источника радиоактивного излучения со временем  $\left(\frac{A}{A_0}\right) = f\left(\frac{t}{T_{1/2}}\right)$

Время, единицы $t/T_{1/2}$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	1	0,993	0,986	0,979	0,973	0,966	0,959	0,953	0,946	0,940
0,1	0,993	0,927	0,920	0,914	0,908	0,901	0,895	0,889	0,883	0,876
0,2	0,871	0,865	0,859	0,853	0,847	0,841	0,835	0,829	0,824	0,818
0,3	0,812	0,807	0,801	0,796	0,790	0,785	0,779	0,774	0,768	0,763
0,4	0,758	0,753	0,747	0,742	0,737	0,732	0,727	0,722	0,717	0,712
0,5	0,707	0,702	0,697	0,693	0,688	0,683	0,678	0,674	0,669	0,664
0,6	0,660	0,655	0,651	0,646	0,642	0,637	0,633	0,629	0,624	0,620
0,7	0,616	0,611	0,607	0,603	0,599	0,595	0,591	0,586	0,582	0,578
0,8	0,574	0,570	0,567	0,563	0,559	0,555	0,551	0,547	0,543	0,540
0,9	0,536	0,532	0,529	0,525	0,521	0,518	0,514	0,511	0,507	0,504
1,0	0,500	0,497	0,493	0,490	0,486	0,483	0,480	0,476	0,473	0,470
1,1	0,467	0,463	0,460	0,457	0,454	0,451	0,448	0,444	0,441	0,438
1,2	0,435	0,432	0,429	0,426	0,423	0,421	0,418	0,415	0,412	0,409
1,3	0,406	0,403	0,401	0,398	0,395	0,392	0,390	0,387	0,384	0,382
1,4	0,379	0,376	0,374	0,371	0,369	0,366	0,364	0,361	0,359	0,356
1,5	0,354	0,351	0,349	0,346	0,344	0,342	0,339	0,337	0,335	0,332
1,6	0,330	0,328	0,325	0,323	0,321	0,319	0,316	0,314	0,312	0,310
1,7	0,308	0,306	0,304	0,301	0,299	0,297	0,295	0,293	0,291	0,289
1,8	0,287	0,285	0,283	0,281	0,279	0,277	0,276	0,274	0,272	0,270
1,9	0,268	0,266	0,264	0,263	0,261	0,259	0,257	0,255	0,254	0,252

2,0	0,250	0,248	0,247	0,245	0,243	0,241	0,240	0,238	0,237	0,235
2,1	0,233	0,232	0,230	0,229	0,227	0,225	0,224	0,222	0,221	0,219
2,2	0,217	0,216	0,215	0,213	0,210	0,210	0,209	0,207	0,206	0,205
2,3	0,203	0,202	0,200	0,199	0,198	0,196	0,195	0,193	0,192	0,191
2,4	0,190	0,188	0,187	0,186	0,184	0,183	0,182	0,181	0,179	0,178
2,5	0,177	0,176	0,174	0,173	0,172	0,171	0,170	0,168	0,167	0,166
2,6	0,165	0,164	0,163	0,162	0,160	0,159	0,158	0,157	0,156	0,155
2,7	0,154	0,153	0,152	0,151	0,150	0,149	0,148	0,147	0,146	0,145
2,8	0,144	0,143	0,142	0,141	0,140	0,139	0,138	0,137	0,136	0,135
2,9	0,134	0,133	0,132	0,131	0,130	0,129	0,129	0,128	0,127	0,126
3,0	0,125	0,124	0,123	0,122	0,122	0,121	0,120	0,119	0,118	0,117
3,1	0,117	0,116	0,115	0,114	0,113	0,113	0,112	0,111	0,110	0,110
3,2	0,109	0,108	0,107	0,107	0,106	0,105	0,104	0,104	0,103	0,102
3,3	0,102	0,101	0,100	0,999	0,999	0,998	0,997	0,997	0,996	0,995
3,4	0,095	0,094	0,093	0,092	0,092	0,091	0,091	0,090	0,090	0,089
3,5	0,088	0,088	0,087	0,087	0,086	0,085	0,085	0,084	0,084	0,083
3,6	0,083	0,082	0,081	0,081	0,080	0,080	0,079	0,079	0,078	0,078
3,7	0,077	0,076	0,076	0,075	0,075	0,074	0,074	0,073	0,073	0,072
3,8	0,072	0,071	0,071	0,070	0,070	0,069	0,069	0,068	0,068	0,068
3,9	0,067	0,067	0,066	0,066	0,065	0,065	0,064	0,064	0,063	0,063
4,0	0,063	0,062	0,062	0,061	0,061	0,060	0,060	0,060	0,059	0,059
4,1	0,058	0,058	0,058	0,057	0,057	0,056	0,056	0,056	0,055	0,055
4,2	0,054	0,054	0,054	0,053	0,053	0,053	0,052	0,052	0,052	0,051
4,3	0,051	0,050	0,050	0,050	0,049	0,049	0,049	0,048	0,048	0,048
4,4	0,047	0,047	0,047	0,046	0,046	0,046	0,045	0,045	0,045	0,045
4,5	0,044	0,044	0,044	0,043	0,043	0,043	0,042	0,042	0,042	0,042
4,6	0,041	0,041	0,041	0,040	0,040	0,040	0,040	0,039	0,039	0,039



ИЗМЕНЕНИЕ АКТИВНОСТИ НЕКОТОРЫХ  
РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ СО ВРЕМЕНЕМ

## Активный-227

Время, годы	Месяцы					
	0	2	4	6	8	10
0	1	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97
1	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94
2	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91
3	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88
4	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85
5	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83
6	0,83	0,82	0,82	0,81	0,81	0,80
7	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78
8	0,78	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76
9	0,75	0,75	0,74	0,74	0,74	0,73
10	0,73	0,72	0,72	0,72	0,71	0,71
11	0,71	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69
12	0,68	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67
13	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,65
14	0,64	0,64	0,64	0,63	0,63	0,63
15	0,62	0,62	0,62	0,61	0,61	0,61
16	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,59
17	0,59	0,58	0,58	0,58	0,57	0,57
18	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55
19	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54	0,54
20	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52
21	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,50
22	0,50	0,50	0,50	0,49	0,49	0,49



## Торий-228

Время, годы	Месяцы					
	0	2	4	6	8	10
0	1	0,94	0,89	0,83	0,78	0,74
1	0,69	0,65	0,62	0,58	0,54	0,51
2	0,48	0,45	0,43	0,40	0,38	0,36
3	0,33	0,31	0,30	0,28	0,26	0,25
4	0,23	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17
5	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12
6	0,11	0,11	0,10			

## Натрий-24

Время, ч	0	1	2	3	4	5
0	1	0,96	0,91	0,87	0,83	0,79
6	0,76	0,72	0,69	0,66	0,63	0,60
12	0,58	0,55	0,53	0,50	0,48	0,46
18	0,44	0,42	0,40	0,38	0,36	0,35
24	0,33	0,32	0,30	0,29	0,28	0,26
30	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20
36	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15
42	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12
48	0,11	0,10	0,10	0,096	0,091	0,087
54	0,083	0,080	0,076	0,073	0,069	0,066
60	0,063	0,060	0,058	0,055	0,053	0,050
66	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,048
72	0,036	0,035	0,033	0,032	0,030	0,029
78	0,028	0,026	0,025	0,024	0,023	0,022
84	0,021	0,020	0,019	0,018	0,017	0,016
90	0,015	0,015	0,014	0,014	0,013	0,013
96	0,012	0,012	0,011	0,010		

Полоний-210

Время, дни	0	10	20	30	40
0	1	0,95	0,90	0,86	0,82
50	0,78	0,74	0,70	0,67	0,64
100	0,61	0,58	0,55	0,52	0,50
150	0,47	0,45	0,43	0,40	0,39
200	0,36	0,35	0,33	0,31	0,30
250	0,28	0,27	0,26	0,25	0,23
300	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18
350	0,17	0,16	0,16	0,15	0,14
400	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
450	0,10	0,099	0,094	0,089	0,084
500	0,081	0,077	0,073	0,069	0,066
550	0,063	0,060	0,057	0,054	0,052
600	0,049	0,046	0,044	0,042	0,040
650	0,038	0,036	0,034	0,033	0,031
700	0,030	0,028	0,027	0,026	0,024
750	0,023	0,022	0,021	0,020	0,019
800	0,018	0,017	0,016	0,015	0,015
850	0,014	0,013	0,013	0,012	0,011
900	0,011	0,010	0,010	0,009	0,009

Свинец-210

Время, годы	Месяцы					
	0	2	4	6	8	10
0	1	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97
1	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94
2	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91
3	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88
4	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85
5	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83

Время, годы	Месяцы					
	0	2	4	6	8	10
	0,83	0,82	0,82	0,81	0,81	0,80
7	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78
8	0,78	0,77	0,77	0,77	0,76	0,75
9	0,75	0,75	0,74	0,74	0,74	0,73
10	0,73	0,72	0,72	0,72	0,71	0,71
11	0,71	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69
12	0,68	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67
13	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,65
14	0,64	0,64	0,64	0,63	0,63	0,63
15	0,62	0,62	0,62	0,61	0,61	0,61
16	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,59
17	0,59	0,58	0,58	0,58	0,57	0,57
18	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55
19	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54	0,54
20	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52
21	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,50
22	0,50	0,50	0,50	0,49	0,49	0,49

## Сурьма-124

Время, дни	0	6	12	18	24
0	1	0,93	0,87	0,81	0,76
30	0,71	0,66	0,62	0,57	0,54
60	0,50	0,47	0,44	0,41	0,38
90	0,35	0,33	0,31	0,29	0,27
120	0,25	0,23	0,22	0,20	0,19
150	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13
180	0,13	0,12	0,11	0,10	0,095

Продолжение

Время, дни	0	6	12	18	24
210	0,089	0,083	0,077	0,072	0,067
240	0,062	0,058	0,054	0,051	0,047
270	0,044	0,041	0,039	0,036	0,033
300	0,031	0,029	0,027	0,025	0,024
330	0,022	0,020	0,019	0,018	0,017
360	0,016	0,015	0,014	0,013	0,012
390	0,011	0,010	0,010		

## ЛИТЕРАТУРА

1. Изотопы, источники излучения и радиоактивные материалы. Каталог под ред. П. С. Савицкого, Е. Е. Кулиша, Г. М. Фрадкина. М., Госатомиздат, 1962.
2. Фрадкин Г. М., Кулиш Е. Е. Источники  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$  и нейтронных излучений. М., Госатомиздат, 1961.
3. Кулиш Е. Е., Фрадкин Г. М. Производство изотопов в СССР. Тр. Всесоюзной конференции по использованию атомной энергии, г. Ташкент. Ташкент, Изд-во АН Узбекской ССР, 1960.
4. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений. М., Госатомиздат, 1963.
5. Curie G., Goliot F. *Compt. rend.*, **198**, No. 254, 259 (1934).
6. Rutherford E. *Radioactive substances and their radiations*. London, 1913.
7. Rutherford E. *Phil. Mag.*, **37**, 581 (1919).
8. Strominger D., Hollander J., Seaborg G. *Table of isotopes. Reviews of Modern Physics*, **30**, 2, April (1958).
9. Баранов В. И. и др. Справочник по радиометрии для геофизиков и геологов. М., Госгеолтехиздат, 1957.
10. Гусев Н. Г., Машкович В. П., Обвинцев Г. В. Гамма-излучение радиоактивных изотопов и продуктов деления. М., Физматгиз, 1958.
11. а) Гагеман Ф. Химия актиния (гл. I). В кн.: «Актиниды». Под ред. Г. Сиборга и Дж. Каца. М., Изд-во иностр. лит., 1955, б) Сиборг Г. Ядерные свойства изотопов плутония (гл. VII). Там же.
12. Волков Е. А., Зив Д. М. «Радиохимия», III, вып. 1, 75 (1961).
13. Anderson. Neutrons from Alpha Emitters, Report NP-851, Dec. 1948.
14. Shepherd A., West R. G. *Scient. Instrum.*, **30**, 291 (1953).
15. Perlman, Richards and Speck. *The Neutron Spectra of Po: Be and Po: B — LADC-25* (1946).
16. Прайс Б., Хортон К., Спинни К. Защита от ядерных излучений. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
17. Брохович Б. В. и др. Разборка опытного уран-графитового реактора для получения изотопов после его четырехлетней эксплуатации. В кн.: «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958 г». Доклады советских ученых. Т. 2 — Ядерные реакторы и ядерная энергетика. М., Атомиздат, 1959.
18. Demers *Energy Distribution of Neutrons from Ra: Be Mixed Source*. NRC, 1597, 1945.
19. Stewart. *Phys. Rev.*, **98**, 740 (1955).
20. Технические условия (МРТУ—55—43—60) на Pu-Be-источника.
21. Technical Bulletin NS-1. «Atomic Energy of Canada Limited».
22. Neutron Spectrum of Ac: Be unpublished data, NRC (Canada), 1956.
23. Технические условия (МРТУ—10—1—14—62) на образцовые излучатели нейтронов.

24. Дахнов В. Н. Применение радиоактивных методов при разведке полезных ископаемых. Сессия АН СССР по использованию атомной энергии, 1—5 июля 1955 г. М., Изд-во АН СССР, 1956.
  25. Флеров Г. Н., Алексеев Ф. А. Перспективы использования радиоактивных излучений в разведке и разработке нефтяных месторождений. Там же.
  26. Кукаренко Н. Н., Одинокоев В. П., Шимилевич Ю. С. Возможности использования метода активации натрия для выявления нефтеносных и водоносных пластов и определения водонефтяного контакта в условиях обсаженной колонной скважины. Там же.
  27. Алексеев Ф. А. Состояние и перспективы применения методов ядерной геофизики при поисках, разведке и разработке полезных ископаемых. Радиоактивные изотопы и ядерные излучения в народном хозяйстве СССР. Труды Всесоюзного совещания 12—16 апреля 1960 г., г. Рига. М., Гостоптехиздат, 1961.
  28. Якубович А. Л., Зайцев Е. И. Установка типа «нейтрон» и некоторые возможности ее применения для анализа вещественного состава минерального сырья. Там же.
  29. Емельянов В. А. Нейтронные влагомеры и гамма-мутномеры. Там же.
  30. Лейпунская Д. И., Зив Д. М., Фрадкин Г. М. и др. «Атомная энергия» (в печати) 1963.
  31. Емельянов В. А., Нестеров В. Е. «Атомная энергия», 6, № 5, 575 (1959).
  32. Дрынкин В. И., Лейпунская Д. И., Незванов Р. А. Применение изотопного активационного анализа в геологии. В сб.: «Ядерная геофизика». М., Гостоптехиздат, 1960.
  33. Леддикотт и др. Применение нейтронного активационного анализа в аналитической химии. В кн.: «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958». Т.5 — Химия радиоэлементов и радиационных превращений. М., Атомиздат, 1959.
  34. Лоповок Т. А. «Атомная энергия», 8, вып. 2, 158 (1960).
  35. Аглинцев К. К., Кодюков В. М. и др. «Прикладная дозиметрия». М., Госатомиздат, 1962.
-

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение . . . . .	3
Открытие нейтрона и его свойства . . . . .	5
Ядерные реакции, используемые при получении нейтронов . . . . .	8
Изотопы, используемые в качестве первичных излучателей в нейтронных источниках . . . . .	9
Альфа-излучатели . . . . .	—
Гамма-излучатели . . . . .	25
Мишени в изотопных источниках нейтронов . . . . .	28
Основные характеристики $\alpha$ -нейтронных источников . . . . .	34
Источники на основе $\text{Po}^{210}$ . . . . .	36
Источники на основе $\text{Ra}^{226}$ . . . . .	39
Источники на основе плутония . . . . .	42
Источники на основе $\text{Ac}^{227}$ . . . . .	43
Основные характеристики фотонейтронных источников . . . . .	45
Образцовые нейтронные излучатели . . . . .	47
Применение нейтронных источников . . . . .	49
Разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений . . . . .	50
Поиски полезных ископаемых . . . . .	54
Измерение влажности . . . . .	58
Активационный анализ . . . . .	60
Нейтронная радиография . . . . .	64
Пуск реактора . . . . .	65
Исследовательские работы, обучение специалистов . . . . .	66
Некоторые вопросы техники безопасности при работе с источниками излучений . . . . .	68
Контейнеры для транспортировки нейтронных источников . . . . .	70
Приложение 1. Изменение активности источника радиоактивного излучения со временем $\left(\frac{A}{A_0}\right) = f\left(\frac{t}{T_{1/2}}\right)$ . . . . .	78
Приложение 2. Изменение активности некоторых радиоактивных изотопов со временем . . . . .	78
Литература . . . . .	86

Григорий Михайлович Фрадкий  
ИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ

Редактор В. А. Подошвина

Техн. редактор Н. А. Власова

Корректор Н. А. Светлова

Слано в набор 15.VI.1963 г.

Подписано в печать 1.X.1963 г.

Бумага 60×90/16

Физич. печ. л. 5,5

Уч.-изд. л. 4,88

Заказ изд. 936

Тираж 3706 экз.

T-08802

Цена 24 коп.

Заказ тип. 1882

Госатомиздат, Москва, Центр, ул. Кирова, 18.

## СПИСОК ЗАМЕЧЕННЫХ ОПЕЧАТОК

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
12	11 св.	. . . четырех $\alpha$ -	. . . пяти $\alpha$ -
57	6 св.	. . . ( <i>л</i> , <i>р</i> )-реакции	. . . ( <i>л</i> , <i>р</i> )-реакции
66	15 св.	. . . не активировав- ный	. . . на активирован- ный
70	2 св.	. . . заполнителем	. . . замедлителем



Цена 24 коп.