

УДК 539.125.5.03

# Исследование характеристик макета коммутируемого $^{238}\text{Pu}$ - $\text{Be}$ источника нейтронов

В. Е. Аблесимов, А. А. Дружинин,  
В. Н. Вячин, М. Ю. Максимов,  
В. Н. Михеев, И. В. Поленов

*На основе препарата  $^{238}\text{Pu}$  высокой степени изотопной чистоты (99,7 %) и металлического бериллия изготовлен демонстрационный образец (макет) коммутируемого источника нейтронов. Максимальный выход нейтронов исследованного макета составляет в расчете на 1 г плутония  $1,1 \cdot 10^7$  нейтр./с. Фондовый выход нейтронов не превышает 1,5–2 % от выхода нейтронов в состоянии "включено". Максимальная мощность дозы гамма-излучения в положении "выключено" составила: в плотную 130 мкЗв/ч, на расстоянии 20 см – 5 мкЗв/ч.*

## Введение

Изотопные источники, постоянно излучающие нейтроны, получили широкое распространение в различных областях науки и техники [1]. По сравнению с ними существенными преимуществами могут обладать изотопные источники с изменяемым (переключаемым) выходом нейтронов, практически от нулевого выхода до максимального ( $\sim 10^6 - 10^7$  нейтр./с). Один из возможных вариантов подобного изотопного источника описан в [2, 3]. Переключение нейтронного выхода в нем осуществлялось перемещением по окружности закрепленной на оси бериллиевой мишени, изготовленной в виде сектора круга, мимо неподвижного излучателя альфа-частиц, также выполненного в виде сектора круга.

Применение коммутируемых источников перспективно при исследованиях кинетических характеристик активных зон ядерных реакторов. Основная задача при исследовании размножающих систем заключается в определении ее состояния относительно критичности. Одним из классических методов решения данной задачи является метод "сброса" источника нейтронов из подкритической размножающейся системы, находящейся в равновесном состоянии. Естественно, что после удаления источника размножающаяся система начинает релаксировать к новому равновесному состоянию, при этом характер переходного процесса будет однозначно связан с эффективным коэффициентом ее размножения.

Традиционный способ изменения мощности источника нейтронов заключается в быстром удалении (приближении) источника от размножающейся системы посредством некой механической (пневматической) системы, что в зависимости от условий эксперимента не всегда легко осуществимо. Поэтому альтернативный изотопный источник нейтронов, изменяющий свою мощность за счет внешнего механического управления реакцией ( $\alpha, n$ ) в диапазоне от  $10^4$  до  $10^7$  с $^{-1}$  и имеющий характерный размер  $\sim 5$  см, может служить достаточно простым и мощным инструментом при решении задач кинетики реактора.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАКЕТА КОММУТИРУЕМОГО $^{238}\text{Pu}$ -Be ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Практически коммутируемый изотопный нейтронный генератор (КИНГ) может быть выполнен на основе таких альфа-активных изотопов, как  $^{238}\text{Pu}$  или  $^{241}\text{Am}$ , и мишени из легкого вещества, например бериллия.

Некоторые свойства этих альфа-активных изотопов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Альфа-излучающие изотопы и их свойства [4, 5]

Изотоп	Период альфа-распада, год	Активность (A), Бк/г	Средняя энергия альфа-частиц, МэВ	Удельный выход (Y), нейтр./10 <sup>6</sup> α-частиц для мишени из Be	Выход для тонкого слоя (N), нейтр./(с·г)	Период спонтанного деления, год	Удельный выход нейтронов спонтанного деления, нейтр./(с·г)
$^{238}\text{Pu}$	87,7 ± 0,3	6,338·10 <sup>11</sup>	5,487	79	2,50·10 <sup>7</sup>	4,7·10 <sup>10</sup>	2,61·10 <sup>3</sup>
$^{241}\text{Am}$	432,2 ± 0,7	1,270·10 <sup>11</sup>	5,479	79	5,08·10 <sup>6</sup>	1,15·10 <sup>14</sup>	1,19

Зависимость удельного выхода нейтронов  $Y$  в веществе от начальной энергии альфа-частицы  $E_0$  при условии, что она полностью тормозится от начальной энергии до нуля только на атомах этого вещества, дается выражением [5]

$$Y = kE_0^m \text{ (нейтр./10}^6 \text{ альфа-частиц),}$$

где

$$\begin{aligned} k &= 0,080; m = 4,05 \text{ для } 4,1 < E_0 < 5,7 \text{ МэВ;} \\ k &= 0,80; m = 2,75 \text{ для } 5,7 < E_0 < 10,0 \text{ МэВ.} \end{aligned} \quad (1)$$

Выход нейтронов для тонкого слоя альфа-излучателя рассчитывается по формуле

$$N = AY\Omega/10^6. \quad (2)$$

Обозначения те же, что в табл. 1, множитель  $\Omega$  учитывает эффективный телесный угол выхода альфа-частиц. При наличии воздушного промежутка между излучателем и мишенью часть энергии альфа-частиц поглощается в воздухе. Потери энергии альфа-частиц при прохождении воздушного промежутка между пластинами приводят в соответствии с выражением (1) к уменьшению удельного выхода нейтронов из мишени. Таким же образом влияют потери энергии при прохождении альфа-частиц в веществе слоя альфа-излучателя. Ниже приводятся результаты измерений основных характеристик изготовленного нами демонстрационного образца (макета) коммутируемого нейтронного источника с расчетным выходом нейтронов примерно  $\sim 10^4$  нейтр./с.

## Эксперимент и результаты

Демонстрационный образец КИНГа (см. рисунок) представляет собой цилиндрическую кассету из оргстекла диаметром 66 мм и высотой 40 мм. Внутри нее размещены: 1 – излучатель альфа-частиц ( $^{238}\text{PuO}_2$ ); 2 – бериллиевая мишень в виде диска диаметром 20 мм и толщиной 0,13 мм и 3 – затвор из нержавеющей стали толщиной 1,2 мм в виде полоски длиной 70 мм и шириной 32 мм. Габариты макета были выбраны такими, чтобы КИНГ разместился в измерительном кана-

ле установки для счета нейтронов (диаметр канала 80 мм). Во избежание самопроизвольного перемещения затвора в конструкции образца предусмотрен стопорный винт, который фиксирует положение затвора в рабочем и нерабочем состояниях образца.

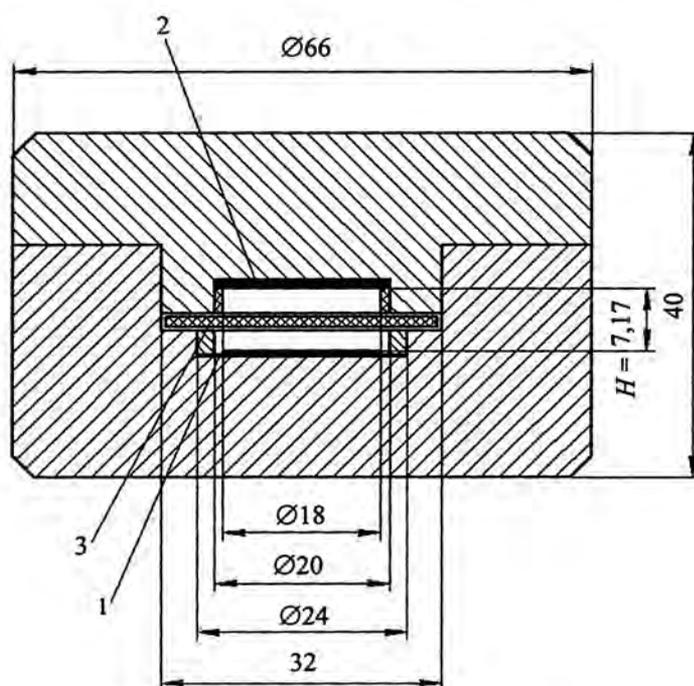


Схема демонстрационного образца КИНГа

В качестве излучателя альфа-частиц в настоящем макете используется тонкий слой радиоактивного изотопа  $^{238}\text{Pu}$ , нанесенный на металлический диск из титана или тантала диаметром 24 мм и толщиной 0,2 мм. Диаметр "активного" пятна равен  $(18 \pm 0,2)$  мм. Всего было изготовлено четыре излучателя альфа-частиц (табл. 2). Последовательно помещая их в корпус КИНГа (см. рисунок), были получены четыре варианта КИНГа для исследований. Расстояние  $H$  между слоем-излучателем и бериллиевым диском было выбрано равным 7,17 мм. С мишенью № 2 были проведены измерения при расстоянии  $H = 2,87$  мм.

Таблица 2

Абсолютная активность (масса)  $^{238}\text{Pu}$  в излучателе альфа-частиц макета КИНГа

Номер мишени	Активность $^{238}\text{Pu}$ , Бк ( $\times 10^8$ )		Масса $^{238}\text{Pu}$ , мкг
	Гамма-спектрометрия	Альфа-радиометрия	
1	$1,88 \pm 0,10$	—	$297 \pm 15$
2	$3,74 \pm 0,20$	—	$590 \pm 32$
3	$5,35 \pm 0,32$	—	$844 \pm 50$
4	$0,396 \pm 0,020$	$0,363 \pm 0,010$	$58 \pm 2$

Для изготовления излучателя альфа-частиц был взят препарат  $^{238}\text{Pu}$  высокой степени изотопной чистоты (99,7 %), полученный в 1993 году на электромагнитном сепараторе изотопов С-2 [6]. Плутоний электролитическим способом из спиртового раствора был нанесен на подложки из титана и тантала. Предварительно исходный препарат плутония был очищен от радиоактивных и инертных примесей. Осаждение плутония проводилось три раза на одну и ту же подложку из титана. Таким способом был изготовлен альфа-излучатель с последовательно увеличивающейся массой плутония (мишени № 1, 2, 3). Самый "тонкий" излучатель № 4 был изготовлен однократным осаждением плутония на танталовую подложку.

Определение массы плутония на изготовленных излучателях проводилось методом гамма-спектрометрии путем измерений интенсивности собственного гамма-излучения  $^{238}\text{Pu}$  с энергией 99,9 и 152,7 кэВ, имеющего квантовые выходы  $(7,35 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$  и  $(9,37 \pm 0,10) \cdot 10^{-4}$  % соответственно. Результаты измерений приведены в табл. 2. Для контроля масса плутония, нанесенного на мишень № 4, была определена другим методом – по интенсивности альфа-излучения, измеряемой методом счета альфа-частиц в камере с малым телесным углом. Видно, что результаты измерений, полученные разными методами, согласуются между собой.

### *Исследование характеристик КИНГа*

Для каждого из четырех вариантов КИНГа был измерен выход нейтронов. Измерения проводились на счетчике нейтронов "Корона" [7], состоящем из 20 борных счетчиков СНМ-11 в парафиновом замедлителе. Замедлитель имеет вид куба размером 450 × 450 × 450 мм, в центре которого имеется сквозной горизонтальный канал диаметром 80 мм для размещения анализируемых образцов. Вокруг канала по двум concentрическим окружностям радиусом 65 и 85 мм расположены счетчики СНМ-11, работающие в режиме коронного разряда.

Выход нейтронов из макета КИНГа определялся по формуле

$$Q = \frac{N_x}{\varepsilon} K, \quad (3)$$

где  $N_x$  – средняя скорость счета при измерениях макета КИНГа на установке "Корона", имп./с;  $\varepsilon$  – эффективность счета нейтронов установки "Корона", определяемая по нейтронным эталонным источникам;  $K$  – поправка на различие спектров нейтронов макета и эталона.

Эффективность счета  $\varepsilon$  определялась с помощью источников с известным выходом нейтронов. В настоящей работе использовались следующие эталоны:  $^{239}\text{Pu}$ -Be источник с выходом нейтронов  $(1,130 \pm 0,045) \cdot 10^4$  нейтр./с и два эталона на основе спонтанно делящихся изотопов  $^{252}\text{Cf}$  и  $^{244}\text{Cm}$  с нейтронным выходом  $(1,544 \pm 0,038) \cdot 10^4$  и  $(1,14 \pm 0,03) \cdot 10^3$  нейтр./с соответственно (в расчете на февраль 2005 года). Эффективность регистрации нейтронов и фон были практически постоянными в период проведения измерений (две недели) и составили  $\varepsilon = 1,90 \pm 0,04$  %,  $N_{\text{фон}} = 0,041 \pm 0,005$  имп./с.

Результаты измерений нейтронного выхода макета КИНГа приведены в табл. 3. Видно, что результаты измерений и расчета нейтронного выхода макета КИНГа в пределах ~ 10 % согласуются друг с другом. В результаты измерений введена поправка на различие спектров нейтронов

измеряемого макета КИНГа и эталонов на основе  $^{252}\text{Cf}$  и  $^{244}\text{Cm}$ . Поправка была определена экспериментально путем измерения эффективностей регистрации нейтронов эталонного  $^{239}\text{Pu}$  – Ве источника, имеющего спектр нейтронов, практически тождественный спектру нейтронов КИНГа, и эталонов на основе спонтанно делящихся изотопов  $^{252}\text{Cf}$  и  $^{244}\text{Cm}$ . Она составила  $K_1 = \varepsilon(^{252}\text{Cf}) / \varepsilon(^{239}\text{Pu} - \text{Ве}) = 1,57 \pm 0,08$ . Эффективность регистрации нейтронов для эталонов на основе  $^{252}\text{Cf}$  и  $^{244}\text{Cm}$  в пределах экспериментальных погрешностей была практически одинакова:  $K_2 = \varepsilon(^{252}\text{Cf}) / \varepsilon(^{244}\text{Cm}) = 1,03 \pm 0,06$ .

Расчет выхода нейтронов для геометрии эксперимента учитывал поглощение энергии альфа-частиц в воздушном промежутке и соответствующее снижение удельного выхода нейтронов из мишени. По программе МК [8] рассчитывалось распределение по остаточному пробегу числа частиц, пересекающих поверхность мишени. Далее, следуя [9], определялась остаточная энергия альфа-частиц, попадающих на бериллиевую мишень, для каждой группы альфа-частиц определялся выход нейтронов согласно выражению (2) и суммированием находился полный расчетный выход нейтронов из макета. Расчетный удельный выход из макета при расстоянии между пластинами 7,17 мм составил 37,9 нейтр./ $10^6$  альфа-частиц, при расстоянии 2,87 мм – 56,4 нейтр./ $10^6$  альфа-частиц при значении эффективного телесного угла соответственно 0,146 и 0,272.

Таблица 3

Результаты измерения выхода нейтронов из макета КИНГа

Масса $^{238}\text{Pu}$ в излучателе, мкг	Активность $^{238}\text{Pu}$ , Бк	Скорость счета в положении "вкл", имп./с	Скорость счета в положении "выкл", имп./с	Экспериментальный выход нейтронов, нейтр./с	Расчетный выход нейтронов, нейтр./с	Эксперимент/расчет	Выход нейтронов на 1 г $^{238}\text{Pu}$ , $\times 10^6$ нейтр./с-г
Расстояние между излучателем и бериллием 7,17 мм							
58	3,96E+07	2,686	0,060 $\pm$ 0,008	222	219	1,01	3,83
297	1,88E+08	13,5	0,16 $\pm$ 0,04	1116	1039	1,07	3,76
590	3,74E+08	27,603	0,427 $\pm$ 0,027	2281	2067	1,10	3,87
844	5,35E+08	34,503	0,627 $\pm$ 0,046	2851	2957	0,96	3,38
Расстояние между излучателем и бериллием 2,87 мм							
297	1,88E+08	38,1	0,180 $\pm$ 0,013	3148	2888	1,09	10,6
297	1,88E+08	39,4	0,180 $\pm$ 0,013	3254	2888	1,13	11,0

Экспериментальная проверка влияния поглощения альфа-частиц в воздушном промежутке между слоем окиси  $^{238}\text{Pu}$  и мишенью из Ве на величину выхода нейтронов была проведена следующим образом.

Использовался вариант макета № 3 с мишенью из плутония (844 мкг), находящейся на расстоянии 7,17 мм от бериллиевой пластины. Макет был размещен внутри металлического сосуда (~ 2 л), соединенного с откачанным буферным сосудом. Вся сборка располагалась у переднего торца парафинового куба установки "Корона".

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАКЕТА КОММУТИРУЕМОГО $^{238}\text{Pu}$ -Be ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Первое измерение было проведено при атмосферном давлении внутри первого сосуда, а следовательно, и в макете КИНГа. Последующее – после снижения давления до 0,35 атм (по манометру ОБМВ1-100) за счет соединения первого сосуда с буферным. При снижении давления воздуха в макете КИНГа от атмосферного (1 ата) до 0,35 ата выход нейтронов увеличился в  $1,82 \pm 0,13$  раза. Полученное значение хорошо согласуется с расчетным увеличением в 1,70 раза выхода нейтронов из макета при снижении давления в воздушном промежутке до указанной величины.

Для изготовленного в настоящей работе макета КИНГа в диапазоне массы плутония от 60 до 844 мкг среднее значение выхода нейтронов макета при  $H = 7,17$  мм составило  $3,7 \cdot 10^6$  нейтр./с-г  $^{238}\text{Pu}$ , при  $H = 2,87$  мм –  $10,8 \cdot 10^6$  нейтр./с-г  $^{238}\text{Pu}$ , что хорошо согласуется с расчетными значениями.

Уменьшение выхода нейтронов на 1 г  $^{238}\text{Pu}$  для мишени № 4 можно связать с поглощением энергии альфа-частиц в материале самого слоя.

Таким образом, результаты измерений и расчетов выхода нейтронов макета КИНГа практически совпадают, что подтверждает справедливость основных положений и оценок, выполненных при обсуждении характеристик коммутируемого  $^{238}\text{Pu}$  – Be источника нейтронов.

### Выводы

1. На основе имеющегося препарата  $^{238}\text{Pu}$  высокой степени изотопной чистоты (99,7 %) и металлического бериллия изготовлен демонстрационный образец (макет) коммутируемого источника нейтронов.

2. С использованием установки "Корона" (борные счетчики СНМ-11 в парафиновом замедлителе) проведено измерение выхода нейтронов в состоянии "включено". Для изготовленного в настоящей работе макета КИНГа в диапазоне массы плутония от 60 до 844 мкг среднее значение выхода нейтронов макета при  $H = 7,17$  мм составило  $3,7 \cdot 10^6$  нейтр./с-г  $^{238}\text{Pu}$ , при  $H = 2,87$  мм –  $10,8 \cdot 10^6$  нейтр./с-г  $^{238}\text{Pu}$ , что хорошо согласуется с расчетными значениями.

3. При снижении давления воздуха в макете КИНГа от атмосферного (1 ата) до 0,35 ата выход нейтронов увеличивается в  $1,82 \pm 0,13$  раза. Это хорошо согласуется с расчетным увеличением в 1,70 раза выхода нейтронов из макета при снижении давления в воздушном промежутке до указанной величины.

4. Выход нейтронов в состоянии "выключено" не превышает 1,5–2 % от выхода нейтронов в состоянии "включено".

5. Измерена мощность дозы гамма-излучения в положении "выключено". Она составила со стороны дна макета: вплотную 130 мкЗв/ч, на расстоянии 20 см – 5 мкЗв/ч.

6. Применение коммутируемого нейтронного источника существенно снижает дозовую нагрузку на персонал, смягчает требования к защите источника при транспортировке в выключенном состоянии.

### Список литературы

1. Бак М. А., Шиманская Н. С. Нейтронные источники. М.: Атомиздат, 1969.
2. U.S. Patent No. 4829191, May 9, 1989.
3. Rhodes E. A., Bowers D. L. et al. Report ANL/ACVT-95/2/.
4. Фролов В. В. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Hertz K. L., Hilton N. R., Lund J. C., J. M. Van Scyoc. Alfa-emitting radioisotopes for switchable neutron generators // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2003. Vol. A 505. P. 41–45.
6. Vesnovskii S. P., Polynov V. N. Highly enriched isotopes of uranium and transuranium elements for scientific investigation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1992. Vol. B70. P. 9–11.
7. Дружинин А. А., Винокуров В. А., Григорьев В. К. и др. Детекторы нейтронов на основе коронных счетчиков СНМ-11 // Труды ВНИИЭФ. 1968, № 8. С. 18–22.
8. Кочубей Ю. К., Житник А. К., Артемьева Е. В. и др. Программа С-95. Моделирование совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000. Вып. 2. С. 49–52.
9. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982.

## Research of Characteristics of the Demonstration Sample Switchable $^{238}\text{Pu}$ – Be Neutron Source

V. E. Ablesimov, A. A. Druzhinin, V. N. Vjachin, M. J. Maksimov,  
V. N. Miheev, I. V. Polenov

*The demonstration sample of a switchable neutron source is made on the basis of a preparation  $^{238}\text{Pu}$  a high degree of isotopic purity (99.7 %) and metal Be. The maximal yield of neutrons of the investigated sample in position "on" is  $1.1 \cdot 10^7$  neutron/s per 1 gramme of  $^{238}\text{Pu}$ . The background yield of neutrons in position "off" does not exceed 1.5–2 % from an output of neutrons in position "on". The maximal doze rate of gamma-radiation in position "off" is closely  $130 \mu\text{Sv/h}$ , on distance 20 cm –  $5 \mu\text{Sv/h}$ .*