

V. Измерения ионизирующих излучений

УДК 539.125.5: 539.125

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОМЕТРА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ
РАДИОНУКЛИДНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАЗЛИЧНЫХ
ТИПОВ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
РАДИОМЕТРА К НЕЙТРОНАМ РU- α -ВЕ ИСТОЧНИКА
И СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР**

А.В. Янушевич¹, В.Д. Севастьянов¹, Н.Н. Моисеев²

¹ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.,

²ФГУП «ВНИИМ» имени Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург

sevast@vniiftri.ru,

yanushevich@vniiftri.ru,

n.n.moiseev@vniim.ru

Приведено описание радиометра нейтронов РНЗ, разработанного для измерения потока нейтронов радионуклидных источников. Кратко описано устройство компактной замедляющей сборки радиометра. Описан процесс замедления быстрых нейтронов, испускаемых источниками с различными спектрами нейтронов. Измерена чувствительность радиометра РНЗ к быстрым нейтронам различных типов источников. По результатам выполненных исследований проведён анализ возможности применения радиометра РНЗ в научно-метрологических целях.

Ключевые слова: радиометр потока нейтронов, поток источника нейтронов, источники быстрых нейтронов.

**DEVELOPMENT AND INVESTIGATION
OF THE RADIOMETER FOR MEASURING OF NEUTRON
FLUX OF RADIOISOTOPE SOURCES OF VARIOUS TYPES:
DETERMINATION OF THE SENSITIVITY
OF RADIOMETER TO NEUTRONS OF SOURCE
AND SPONTANEOUS NUCLEI FISSION**

A.V. Yanushevich¹, V.D. Sevastyanov¹, N.N. Moiseev²

¹FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region,

²FSUE "D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM)", St. Petersburg

sevast@vniiftri.ru,

yanushevich@vniiftri.ru,

n.n.moiseev@vniim.ru

The description of neutron radiometer RNZ, that was developed for measuring neutron flux of point radioisotope neutron sources, is given inside. The design of compact moderation installation of radiometer is briefly described. The process of fast neutron moderation, that was emitted by different neutron sources with different spectra, is described. The sensitivity of neutron radiometer

to fast neutrons of different neutron sources type is measured. According to the results of the research, an analysis was carried out of the possibility of using a RNZ radiometer for scientific and metrological purposes.

Key words: neutron flux radiometer, the flux of the neutron source, sources of fast neutrons.

Введение

Радионуклидные источники быстрых нейтронов применяются при проведении исследований и при испытаниях продукции на разных этапах производственного цикла на предприятиях Росатома. Основной метрологической характеристикой закрытых радионуклидных источников быстрых нейтронов является величина полного потока быстрых нейтронов, испускаемых источником в телесный угол 4π . При выпуске радионуклидного источника быстрых нейтронов из производства и в процессе его эксплуатации необходим контроль этой величины путём её измерения с применением радиометров потока нейтронов.

В известных авторам радиометрических установках для измерения потока (в телесный угол 4π) быстрых нейтронов радионуклидных источников с отличающимися энергетическими спектрами применяют замедляющие сборки. Измерение с их помощью потоков быстрых нейтронов радионуклидных источников состоит в замедлении быстрых нейтронов в замедляющей сборке установки преимущественно до тепловых энергий (10^{-4} – 10^{-1} эВ) и регистрации их чувствительным детектором тепловых нейтронов. Чем больше быстрых нейтронов источников замедляется до тепловых энергий, тем менее чувствителен радиометр нейтронов к первичному энергетическому спектру калибруемого источника. В качестве замедлителей быстрых нейтронов в таких установках используют преимущественно призмы или сферы больших габаритных размеров (порядка нескольких метров) из реакторного графита [1–3], который незначительно поглощает тепловые нейтроны.

Из сказанного выше следует, что актуальной задачей при разработке радиометра подобного описанным выше установкам является уменьшение габаритных размеров и массы.

Целью настоящей работы было разработать компактный радиометр с гетерогенным замедлителем (РНЗ) для измерения потока быстрых нейтронов различных типов источников с отличающимися спектрами.

В разработанном радиометре нейтронов РНЗ применена компактная замедляющая гетерогенная сборка, включающая в себя замедлители из тяжёлой воды (D_2O) и оргстекла и отражатель тепловых нейтронов из бидистиллированной воды. Принцип работы радиометра нейтронов РНЗ заключается в замедлении быстрых нейтронов, вылетающих из радионуклидных источников, до энергий менее 0,5 МэВ и их термализации в тяжёлой воде и регистрации тепловых нейтронов ^3He -счётчиком тепловых нейтронов.

Устройство радиометра РНЗ

Устройство радиометра приведено на рис. 1.

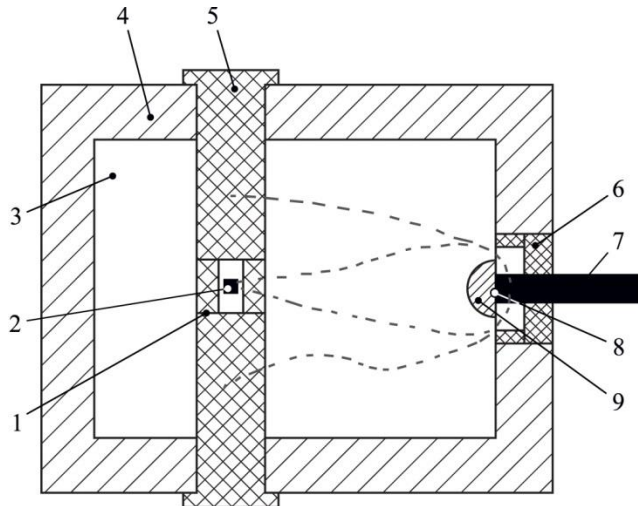


Рис. 1. Замедляющая гетерогенная сборка радиометра нейтронов:
 1 — замедлитель из оргстекла; 2 — калибруемый радионуклидный источник;
 3 — замедлитель из тяжёлой воды; 4 — полый цилиндрический отражатель
 тепловых нейтронов из бидистиллированной воды (H_2O); 5 — пробки из оргстекла;
 6 — полый цилиндр; 7 — 3He -счётчик; 8 — поглотитель тепловых нейтронов
 из кадмия толщиной 1 мм; 9 — полусфера из оргстекла

Калибруемый радионуклидный источник нейтронов 2 устанавливается в замедлителе из оргстекла 1, который размещён в экспериментальном канале замедлителя 3 из тяжёлой воды. Материалы указанных выше замедлителей имеют рекордные параметры замедления быстрых нейтронов и диффузии тепловых нейтронов [4–5]. Так, например, быстрый нейтрон только в результате одного акта рассеяния при прямом соударении с ядром водорода, содержащемся в оргстекле (или полиэтилене), может сбросить энергию до значений, близких к диапазону медленных нейтронов. Цилиндрический замедлитель из тяжёлой воды находится внутри полого цилиндрического отражателя тепловых нейтронов из бидистиллированной воды (H_2O) 4. Пробки 5 из оргстекла существенно уменьшают утечку тепловых нейтронов из замедлителей. Полусфера из оргстекла замедлителя 9 выполняет две функции: эффективно замедляет быстрые нейтроны, летящие от источника, и отражает тепловые нейтроны внутрь замедлителя из тяжёлой воды.

3He -счётчик 7 размещён внутри полого цилиндра 6, изготовленного из оргстекла. Он регистрирует преимущественно только тепловые нейтроны, попадающие на него через внутреннюю боковую поверхность цилиндра

из оргстекла. Это обусловлено тем, что со стороны торца счётчика установлен поглотитель тепловых нейтронов из кадмия толщиной 1 мм.

Габаритные размеры описываемой замедляющей гетерогенной сборки (диаметр — 895 мм, длина — 895 мм) значительно меньше указанных выше аналогов.

Анализ работы радиометра

Отличительными особенностями работы разработанного радиометра нейтронов РНЗ с замедляющей гетерогенной сборкой являются следующие факторы:

- быстрые нейтроны калибруемого радионуклидного источника независимо от его энергетического спектра практически одинаково замедляются до тепловых энергий в водородо- и дейтерийсодержащих средах замедляющей сборки;
- регистрируются преимущественно только тепловые нейтроны из замедлителя с тяжёлой водой и отражателя тепловых нейтронов с бидистиллированной водой, попадающие на боковую поверхность ^3He -счётчика через внутреннюю сторону полого цилиндра (рис. 1);
- большая часть быстрых нейтронов калибруемого радионуклидного источника, замедляясь до тепловых энергий до регистрации ^3He -счётчиком, проходит расстояние между источником и счётчиком не по прямой, а по ломаной линии (рис. 1), т.е. существенно большее расстояние через водородосодержащие среды замедлителей и отражателя нейтронов.

Именно эти факторы делают радиометр РНЗ малочувствительным к энергетическому спектру калибруемых радионуклидных источников нейтронов.

Регистрация тепловых нейтронов ^3He -счётчиком осуществляется по ядерной реакции: $^3\text{He} + n = ^1\text{H} + ^3\text{H} + 0,770 \text{ МэВ}$. Сечение указанной реакции для тепловых нейтронов большое и составляет (5400 ± 200) барн [5]. ^3He -счётчик тепловых нейтронов также одновременно является и спектрометром заряженных частиц. Регистрация счётчиком одного теплового нейтрона сопровождается также вылетом двух заряженных частиц протона (^1H) и тритона (^3H). Их суммарная энергия — 0,770 МэВ.

Спектрометр заряженных частиц включает в себя стандартные ионизационную камеру, наполненную газом ^3He под давлением порядка $2,066 \cdot 10^5$ Па, предусилитель, усилитель и амплитудный анализатор. Типичный аппаратурный амплитудный спектр импульсов спектрометра при калибровке радионуклидного источника нейтронов представлен на рис. 2.

В первом диапазоне амплитудного спектра I зарегистрированы импульсы от собственных шумов спектрометра; во втором II — от протонов и тритонов, пробеги которых уложились не полностью в чувствительном к нейтронам объёме ионизационной камеры; в третьем III — от обеих заряжённых

частиц, пробеги которых полностью уложились в чувствительном объёме ионизационной камеры; в четвёртом IV — от нейтронов с энергией более энергий тепловых нейтронов (более 10^{-6} МэВ).

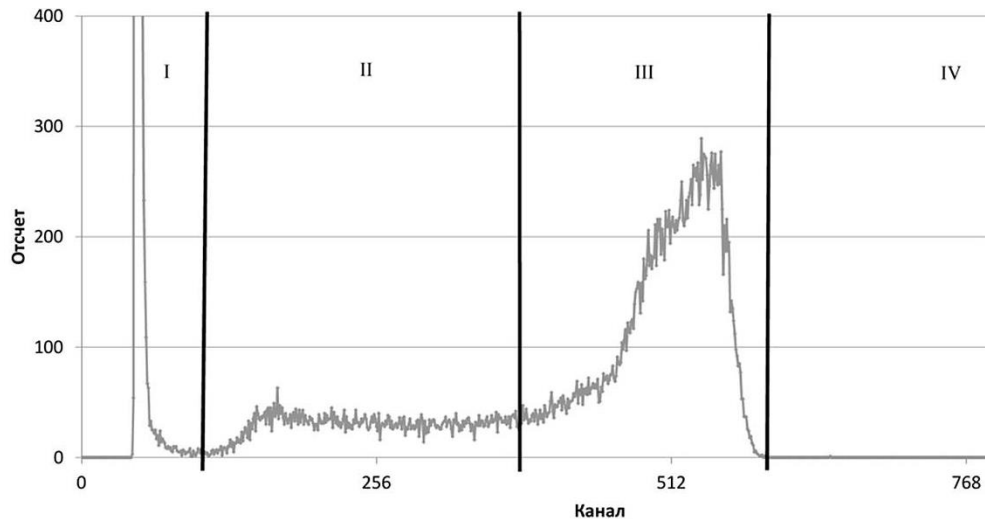


Рис. 2. Аппаратурный амплитудный спектр радиометра нейтронов.

I–IV — диапазоны амплитудного спектра: I — импульсы от собственных шумов спектрометра; II — импульсы от протонов и тритонов, пробеги которых уложились в объёме ионизационной камеры не полностью; III — импульсы от протонов и тритонов, пробеги которых уложились в объёме ионизационной камеры полностью; IV — импульсы от нейтронов с энергией более энергий тепловых нейтронов (более 10^{-6} МэВ)

Определение метрологических характеристик радиометра

Чувствительность разработанного радиометра РНЗ измеряли с применением двух типов аттестованных по потоку в телесный угол 4π точечных радионуклидных источников быстрых нейтронов с существенно отличающимися спектрами:

- ^{238}Pu - α - ^9Be -источники, в которых генерация нейтронов проходит по реакции $^4\text{He} + ^9\text{Be} = ^{12}\text{C} + n + 5,7$ МэВ. Средняя энергия в спектре нейтронов, излучаемых этими источниками, составляет приблизительно 4,5 МэВ;
- источники быстрых нейтронов спонтанного деления. Средняя энергия в спектре нейтронов, излучаемых этими источниками, составляет ~ 2 МэВ [6].

Отличие в средней энергии в спектре нейтронов для указанных выше источников существенно и составляет приблизительно 2,5 МэВ.

В таблице 1 приведены ядерно-физические и технические характеристики источников нейтронов, использованных для определения чувствительности радиометра РНЗ.

Таблица 1

Ядерно-физические и технические характеристики точечных радионуклидных источников нейтронов

№ п/п	Источник, тип, заводской номер	Паспорт, №, дата выдачи	Период полураспада [6], лет α - α -распад, СД-спонтанное деление	Поток нейтронов в 4π , с^{-1} . Дата аттестации	Средняя энергия нейтронов [6], МэВ
1	^{238}Pu - α -Be, ИБН-8-1, 141	№ 1197, 09.01.1989	87,74(9) (α) $4,77(14) \cdot 10^{10}$ (СД)	$4,60 \cdot 10^5$ (3%) 10.11.1994	—
2	^{238}Pu - α -Be, ИБН-8-2, 027	П № 2972, 25.08.2015	87,74(9) (α) $4,77(14) \cdot 10^{10}$ (СД)	$9,89 \cdot 10^5$ (2%) 10.12.2018	—
3	^{252}Cf , НК252М11, 64/12	№ 36285, 06.08.2013	2,638(10) (α + СД) 2,722(10) (α) 85,38(39) (СД)	$7,18 \cdot 10^5$ (2%) 10.12.2018	$2,13 \pm 0,08$
4	^{248}Cm , НК248М11, 13.7/04	М № 5381, 01.02.2007	$3,397(32) \cdot 10^5$ (α + СД) $3,703(35) \cdot 10^5$ (α) $4,112(41) \cdot 10^6$ (СД)	$7,20 \cdot 10^3$ (4%) 25.07.2013	$2,15 \pm 0,06$

Чувствительность ε радиометра к нейтронам указанных выше источников определяли по формуле

$$\varepsilon = n / (\Phi K_p),$$

где n — скорость счёта радиометра для калибруемого источника нейтронов; Φ — поток нейтронов источника в телесный угол 4π ; K_p — поправочный коэффициент, учитывающий уменьшение потока нейтронов источника с момента времени его калибровки до момента измерения его чувствительности.

Проверку стабильности работы радиометра РНЗ систематически производили до начала описываемых в настоящей работе измерений по определению чувствительности радиометра в течение 10 лет с использованием одного и того же источника нейтронов ^{238}Pu - α -Be (см. таблицу 1). Среднее взвешенное значение чувствительности радиометра за 10 лет составило $9,37 \cdot 10^{-4}$ с относительной погрешностью $\pm 1\%$.

Полученное значение чувствительности радиометра РНЗ подтвердило высокую степень воспроизводимости результатов измерений.

С двумя источниками, аттестованными с незначительной погрешностью (2%), ^{238}Pu - α -Be и ^{252}Cf (см. таблицу 1), производили прецизионные измерения чувствительности радиометра РНЗ в 2018 и 2019 гг.

До момента аттестации во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева указанные источники нейтронов были специально выдержаны в течение 2–3 лет с целью распада содержащихся в них короткоживущих изотопов и тем самым исключения влияния их на результаты измерений потока нейтронов источников. Так, например, технология изготовления источника нейтронов ^{252}Cf не исключает присутствия в нём уникального нуклида ^{254}Cf с малым периодом полураспада к спонтанному делению $60,5 \pm 0,2$ суток [7]. Уникальность

этого нуклида заключается в том, что его период полураспада к α -излучению более чем в 100 раз меньше, чем к спонтанному делению. За три года выдержки этого источника нуклид ^{254}Cf в нём полностью распадается.

Полученные в 2019 г. значения чувствительности радиометра РНЗ приведены в таблице 2. Значение чувствительности радиометра к нейтронам плутоний-бериллиевого источника практически совпало с полученными за предыдущие годы при исследовании воспроизводимости радиометра значениями (аттестация источника в 1998 г.).

Таблица 2

Результаты измерений чувствительности радиометра РНЗ к потоку нейтронов в телесный угол 4π для точечных радионуклидных источников ^{238}Pu - α -Be и ^{252}Cf с отличающимися спектрами быстрых нейтронов

№ п/п	Источник, тип, заводской номер. Дата измерений	Количество импульсов, ед., экспозиция, с.	Среднее значение скорости счёта, с^{-1}	Значение поправочного коэффициента, K_p	Поток нейтронов источника на дату аттестации	Значение чувствительности радиометра
1	^{238}Pu - α -Be, ИБН-8-1, 141. 11.01.2019	111864, 300 111691, 300 111220, 300 112111, 300 111981, 300	372,58	0,8593	$4,60 \cdot 10^5$ на 10.11.1998	$9,43 \cdot 10^{-4}$
2	^{238}Pu - α -Be, ИБН-8-2, 027. 11.01.2019	93720, 100 93768, 100 93556, 100 93959, 100 93263, 100 93562, 100	936,38	0,9777	$9,89 \cdot 10^5$ на 10.12.2018	$9,47 \cdot 10^{-4}$
3	^{252}Cf НК252М11, 64/12. 11.01.2019	63151, 100 63709, 100 63103, 100 63192, 100 63181, 100 62760, 100	631,83	0,9777	$7,18 \cdot 10^5$ на 10.12.2018	$9,00 \cdot 10^{-4}$
4	^{248}Cm НК248М11, 13.7/04, 23.04.2019	23610, 3600 23505, 3600 23458, 3600 23442, 3600 23617, 3600 23420, 3600	6,53	1,000	$7,20 \cdot 10^3$ на 25.07.2013	$9,07 \cdot 10^{-4}$

Значение чувствительности радиометра к потоку нейтронов плутоний-бериллиевого источника и источников спонтанного деления ^{252}Cf и ^{248}Cm отличается незначительно, всего на 4%. К тому же отметим, что погрешность аттестованных ВНИИМ им. Д.И. Менделеева значений потока нейтронов для использованных в исследованиях чувствительности источников быстрых нейтронов составляла 2–4% (см. таблицу 1).

Значения чувствительности радиометра РНЗ к нейтронам спонтанного деления ^{252}Cf и ^{248}Cm практически совпали (см. таблицу 2), что также свидетельствует о высокой степени достоверности определения чувствительности радиометра нейтронов РНЗ с применением источников ^{238}Pu - α -Be, аттестованных ВНИИМ (см. таблицу 1) как в 1998 г., так и в 2018 г.

Заключение

Выполнение описанного выше комплекса работ позволило получить следующие результаты.

1. Разработан радиометр с компактным гетерогенным замедлителем нейтронов РНЗ для определения потока радионуклидных источников с существенно отличающимися спектрами быстрых нейтронов.

2. Определена чувствительность радиометра РНЗ к потоку быстрых нейтронов радионуклидных источников двух типов.

3. Установлено, что чувствительность радиометра РНЗ к потоку нейтронов различных типов источников — плутоний-бериллиевого источника и источника спонтанного деления ^{252}Cf — со значительно отличающейся средней энергией спектров нейтронов (на 2,5 МэВ) изменяется всего на 4%.

4. Проведены длительные исследования, подтверждающие практическое совпадение значений чувствительности радиометра РНЗ к потоку нейтронов различных источников одного типа (спонтанного деления), но с разными делящимися нуклидами ^{252}Cf и ^{248}Cm .

Размеры и масса замедляющих сборок радиометров нейтронов для определения потока радионуклидных источников в телесный угол 4π можно существенно уменьшить за счёт применения в них материалов с рекордными значениями таких параметров, как длина замедления быстрых нейтронов, длина диффузии тепловых нейтронов и отражателей тепловых нейтронов.

Литература

1. Щёболев В.Т., Рамендик З.А., Стуков Г.М. и др. Государственный первичный эталон единиц потока и плотности потока нейтронов // Измерительная техника. 1984. № 2. С. 21–23.
2. Roberts N.J., Moiseev N.N., Kralik M. Radionuclide neutron source characterization techniques // Metrologia. 2011. No. 48. P. S239–S253.
3. Кошелев А.С., Мочкаев М.В., Арапов А.В. и др. Источник тепловых нейтронов ЭИ-Т-22 реактора БР-1М // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2013. Вып. 18. С. 162–170.
4. Власов Н. А. Нейтроны. М.: Наука, 1971.
5. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика: пер. с англ. / Под. ред. Л.А. Микаэляна, В.И. Лебедева. М.: Атомиздат, 1968.

6. Горбачев В.М., Замятин Ю.С., Лбов А.А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжёлых элементов и деления ядер: справочник. М.: Атомиздат, 1976. С. 388–389.
7. Сурин В.М., Фомушкин Э.Ф. Периоды полураспада долгоживущих изотопов трансактивных элементов (от ^{228}Th до ^{257}Fm) // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 1982. Вып. 4 (48). С. 3–38.