

УДК 621.378.3

## Калибровка алмазного спектрометра быстрых нейтронов

В. Н. Амосов, С. А. Власов, С. А. Мещанинов, Н. Б. Родионов, Р. Н. Родионов

*Рассмотрены проблемы, возникающие при калибровке детекторов на нейтронном генераторе, и реализован альтернативный метод абсолютной калибровки алмазных детекторов с использованием нейтронного источника на изотопе  $^{241}\text{Am}+\text{Be}$ . Проведено измерение амплитудного спектра и численное моделирование отклика алмазного детектора при облучении нейтронами изотопного источника  $^{241}\text{Am}+\text{Be}$ . Выполнена оценка эффективности регистрации быстрых нейтронов алмазным детектором по области амплитудного спектра, обусловленной  $(n,\alpha)$ -реакцией на углероде для нейтронов в диапазоне энергий от 8,7 до 10,7 МэВ. Эффективный расчетный объем детектора составил 80 % от физического размера алмаза под контактами. Показаны преимущества и недостатки использования изотопных источников нейтронного излучения для калибровки алмазных детекторов быстрых нейтронов.*

PACS: 29.40.VK; 81.05.ug; 07.79.KA

*Ключевые слова:* алмазный детектор, спектрометр, калибровка, нейтронный генератор, спектр.

### Введение

Компактные алмазные детекторы успешно используются в термоядерных исследованиях для спектрометрии быстрых нейтронов. Такого рода спектрометры-радиометры имеют ряд важных преимуществ перед другими системами нейтронной спектрометрии в первую очередь ввиду их малого размера и высокой радиационной стойкости. Примером эффективности и надежности алмазных спектрометров служит опыт их использования на токамаке JET [1].

В настоящее время для строящегося термоядерного проекта ИТЭР разрабатывается система алмазных спектрометров-мониторов нейтронного потока [2].

При разработке таких спектрометрических систем важной задачей является калибровка абсолютной чувствительности детекторов. Для решения этой задачи прежде всего необходимо осуществить выбор соответствующего источника нейтро-

нов. В лабораторной практике в целях тестирования и калибровки нейтронных спектрометров используются как изотопные нейтронные источники, так и нейтронные генераторы. Спектры отклика детекторов, получаемые на нейтронных генераторах, дают очень ценную информацию о спектрометрическом качестве детекторов. Однако определение абсолютной чувствительности детекторов в этих измерениях оказывается затруднено. Поток нейтронов на тестируемом детекторе определяется по показаниям стандартных нейтронных мониторов, например дозиметра МКС-01Р. Нейтронный детектор этого прибора измеряет суммарный поток нейтронов не селективно по энергии. В данном случае для точной абсолютной калибровки возникает проблема учета доли рассеянных нейтронов на самой конструкции генератора. Оценка отношения потока рассеянных нейтронов к основному нейтронному потоку показала, что оно оказывается значительным.

Цель данной работы — демонстрация метода калибровки алмазных детекторов с использованием изотопных нейтронных источников, в котором существенно снижено влияние потоков рассеянных нейтронов.

### Постановка задачи

В первом приближении оценку для генератора ИНГ-07Т доли рассеянных нейтронов можно сделать следующим образом. Окружающие мишень генератора конструкции рассмотрим в виде полусферы радиусом  $\sim 10$  см, источник разместим в центре полусферы.

---

Амосов Владимир Николаевич, начальник группы.  
Власов Сергей Александрович, инженер.  
Мещанинов Сергей Анатольевич, научный сотрудник.  
Родионов Николай Борисович, ведущий научный сотрудник.  
Родионов Роман Николаевич, аспирант.  
ФГУП "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований".  
Россия, 142190, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, владение 12.  
Тел. 8 (495) 334-55-80. E-mail: nbrodnik@triniti.ru  
Статья поступила в редакцию 25 сентября 2010 г.

Пусть  $P_0$  — мощность нейтронного выхода из мишени,  $P_1$  — интегральная мощность рассеянных нейтронов,  $r$  — расстояние от мишени до элементарного объема рассеивателя,  $d\Omega$  — телесный угол на этот объем,  $dr$  — толщина слоя,  $\rho$  — плотность,  $A$  — число Авогадро,  $n$  — количество атомов в молекуле,  $M$  — молярная масса. Так как монитор расположен далеко ( $L \gg R$ , где  $R$  — радиус полушарья), то для монитора неважно угловое распределение в источнике рассеянных нейтронов, а важен только интеграл. Для простоты оценки положим, что среднее сечение рассеяния порядка 1 барна. Интеграл считаем в полярных координатах —

$$dP_1 = (P_0/4\pi r^2) \sigma r^2 d\Omega dr \rho A n/M.$$

Интегрирование по объему приводит просто к замене  $d\Omega$  на  $4\pi$  и  $dr$  на  $R$ . В модели в качестве рассеивателя возьмем воду. Тогда

$$P_1/P_0 = 1/2 \sigma R \rho A n/M = 1/2 \cdot 10^{-24} \cdot 10 \cdot 1 \times \\ \times 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 3/10 = 0,9.$$

Таким образом, в нашем случае следует ожидать, что поток рассеянных нейтронов сравним по величине с первичным потоком. Более точные расчеты рассеяния нейтронов на конструкции нейтронного генератора, выполненные нами методом Монте-Карло (в рамках следующей схемы: цилиндр радиусом 10 см и высотой 15 см, на оси цилиндра на одном из его концов находится дейтериевая или тритиевая мишень), показали, что в потоке нейтронов в передней полусфере доля рассеянных нейтронов доходит до 30 %.

### Эксперимент

Измерения нейтронных потоков проводились алмазным детектором на базе кристалла природного алмаза типа Па [3] в виде пластины толщиной 354 мкм. Площадь под электрическими контактами на алмазной пластине равна 5,5 мм<sup>2</sup>. Энергетическое разрешение детектора при регистрации альфа-частиц составляло 3,5 %. Сигнал детектора регистрировался с помощью стандартного спектрометрического тракта, включающего зарядочувствительный предусилитель ПУГ-1, спектрометрический усилитель-формирователь и амплитудный анализатор АИ-1024-95М. Калибровка энергетической шкалы спектрометра была выполнена при регистрации альфа-частиц от образцовых альфа-источников набора ОСАИ.

Калибровка абсолютной чувствительности алмазного детектора выполнялась при облучении изотопным нейтронным источником <sup>241</sup>Am—Be. Схема эксперимента показана на рис. 1. Детектор был помещен предельно близко к источнику нейтронов за свинцовой пластиной толщиной 5 мм.

Пластина необходима для подавления сопутствующего альфа-распаду америция гамма-излучения 59 кэВ. Толщина свинца 5 мм обеспечивает полное поглощение этого излучения. При использовании свинцового фильтра активность сопутствующего гамма-излучения меньше активности нейтронного выхода источника. При этом основная часть гамма-фона приходится на линию 4,4 МэВ [4]. Это излучение также регистрируется алмазным детектором, однако для энергий гамма-квантов более 2 МэВ отклик в алмазном детекторе сильно уменьшается по амплитуде из-за малых размеров детектора. В результате возможно некоторое искажение регистрируемого отклика на нейтроны в области энергий менее 2 МэВ.

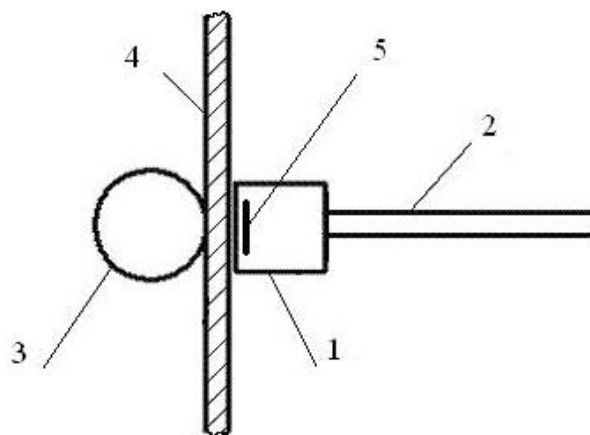


Рис. 1. Схема эксперимента:

- 1 — алмазный детектор в корпусе; 2 — кристалл алмаза;  
3 — америций — бериллиевый нейтронный источник;  
4 — свинцовая пластина толщиной 5 мм; 5 — кабель

Расчетные параметры калибровки следующие:  
объем алмазной пластины под электрическими контактами 1,95 мм<sup>3</sup>;  
активность нейтронного источника 10<sup>6</sup> Бк;  
расстояние между источником и детектором 20 мм;  
время экспозиции 14 ч.

Спектр нейтронного излучения Am—Be-источника хорошо изучен и может быть взят из литературы. На рис. 2 показан спектр нейтронного источника с активностью 10<sup>6</sup> Бк, полученный путем нормировки приведенной формы спектра, взятого из [4], на его интеграл по энергии.

### Анализ результатов

Отклик алмазного детектора при облучении быстрыми нейтронами формируется за счет регистрации электрического заряда, возникающего при поглощении вторичных продуктов ядерных реакций на углероде [5]. В этом случае алмаз работает как спектрометр суммарной энергии, поглощенной в кристалле. Ядерные реакции, дающие основной

вклад в спектральный отклик алмазного детектора следующие: упругое рассеяние  $^{12}\text{C} (n, n') ^{12}\text{C}$ , неупругое рассеяние  $^{12}\text{C} (n, n') ^{12}\text{C}^*$ , реакции ряда  $^{12}\text{C} (n, n') ^{12}\text{C}^*$  Ве ( $\alpha$ ) $\alpha$  и ( $n,\alpha$ )-реакция  $^{12}\text{C} (n, \alpha_0) ^9\text{Be}$ . Спектральный отклик алмазного детектора при облучении нейтронами источника Ам—Ве рассчитывался с помощью кода, моделирующего взаимодействие быстрых нейтронов с углеродом. Модель расчета, на основе которой создан код, приведена в работе [6]. База сечений сформирована на основании электронной базы данных [7]. Отклик детектора был рассчитан для спектра нейтронов Ам—Ве источника, который представлен на рис. 2. Для расчета функции энергетического распределения событий в углероде  $\frac{dN}{dE}$  используется соотношение углового распределения:

$$\frac{dN}{dE} = \pi \frac{d\sigma}{d\Omega} \frac{1}{Ek} \alpha,$$

где  $\bar{E}$  — энергия вторичной частицы в системе центра масс;

$k$  — фактор преобразования дифференциальных сечений из системы центра масс в лабораторную систему отсчета;

$\frac{d\sigma}{d\Omega}$  — дифференциальное сечение процесса;

$\alpha = nVt$ ,  $n$  — число атомов углерода в  $1 \text{ см}^3$ ;

$V$  — объем детектора;

$t$  — время экспозиции.

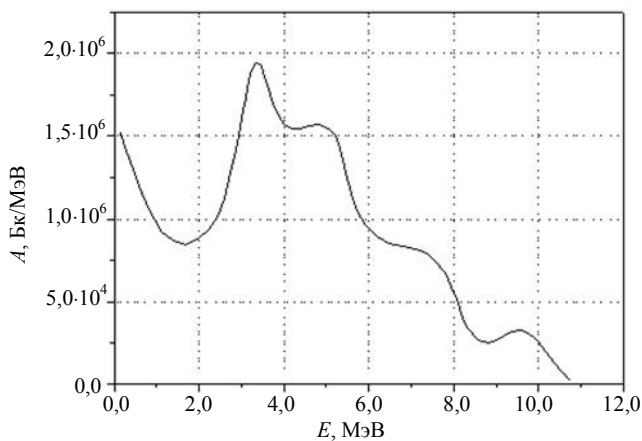


Рис. 2. Нормированный нейтронный спектр Ам—Ве источника [4] с активностью  $10^6$  Бк.

$A$  — активность источника в единичном интервале энергии;  $E$  — энергия нейтронов

Расчет спектральной функции отклика алмазного детектора выполнен в виде свертки расчетной функции  $\frac{dN}{dE}$  и аппаратной функции детектора  $U(E)$ , описывающей экспериментально изме-

ренную форму спектрального отклика на монолинию альфа-источника и заданной в виде

$$U(E) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\Delta}} \exp(-0,5((E - E_0) / \Delta)^2), E > E^*,$$

$$U(E) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\Delta}} \exp(0,5(\Delta / \delta)^2 - (E_0 - E) / \delta), E < E^*,$$

где  $E_0$  — положение максимума функции;

$A, \Delta, \delta, E^* = E_0 - \frac{\Delta^2}{\delta}$  — параметры аппаратной функции;

$\Delta, \delta$  — задаются на основании экспериментальных данных калибровки детектора (для тестируемого детектора было определено  $\Delta = 75$  КэВ,  $\delta = 250$  КэВ),  $A$  определяется из условия, что интеграл от функции (1) на области определения равен 1.

Сравнение модельного спектрального отклика с результатами эксперимента показано на рис. 3.

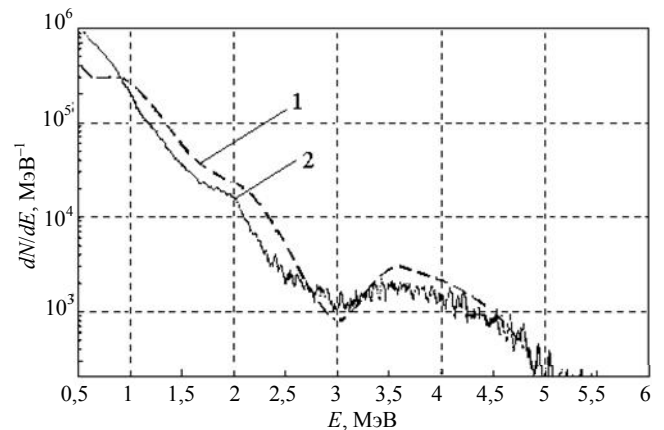


Рис. 3. Расчетный (1) и экспериментальный (2) спектры отклика алмазного детектора при облучении нейтронами Ам—Ве источника

Модельный спектр с удовлетворительной точностью описывает особенности эксперимента. При этом видно, что область спектрального отклика алмазного детектора с энергией  $> 3,1$  МэВ, обусловленная ( $n,\alpha$ )-реакцией на углероде, не пересекается с другими процессами. Действительно максимальную величину поглощенной энергии, например, для упругого процесса для нейтронов с энергией  $E$  можно оценить из соотношения [5]  $E_m = 4 * M_1 * M_2 * E / (M_1 + M_2)^2$ . Для максимальной энергии нейтронов Ам—Ве-источника в 11 МэВ это дает максимальную поглощенную энергию 3,12 МэВ. Поэтому для практических приложений расчет абсолютной чувствительности детектора можно проводить только по этому кана-

лу, не прибегая к сложным расчетам с учетом всех процессов.

Учитывая, что вторичные продукты  $(n, \alpha)$ -реакции на углероде полностью поглощаются в теле детектора, энергия реакции равна 5,7 МэВ, расстояние от Am—Ве источника до детектора 2 см, нейтронный выход Am—Ве источника  $10^6$  нейтронов в секунду, компоненту спектра отклика детектора, вызванной  $(n, \alpha)$ -реакцией, можно рассчитать как  $\frac{dN_\alpha}{dE} = \frac{t}{4\pi * r^2} I(E)\sigma(E)n$ , где  $I(E)$  — энергетический спектр Am—Ве источника нейтронов (см. рис. 2);  $\sigma(E)$  — интегральное сечение  $(n, \alpha)$ -процесса;  $n$  — количество атомов углерода в детекторе;  $t$  — время экспозиции. Интегральное сечение  $(n, \alpha)$  берется из базы данных [7], зависимость сечения этого процесса от энергии показана на рис. 4. Результат расчета компоненты спектрального отклика алмазного детектора, обусловленной  $(n, \alpha)$ -реакцией на углероде, показан на рис. 5 в сравнении с результатом эксперимента.

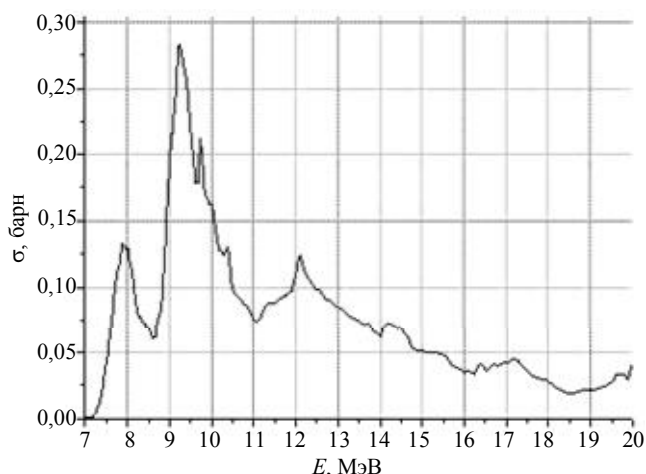


Рис. 4. Сечение  $\sigma(n, \alpha)$ -реакции на углероде

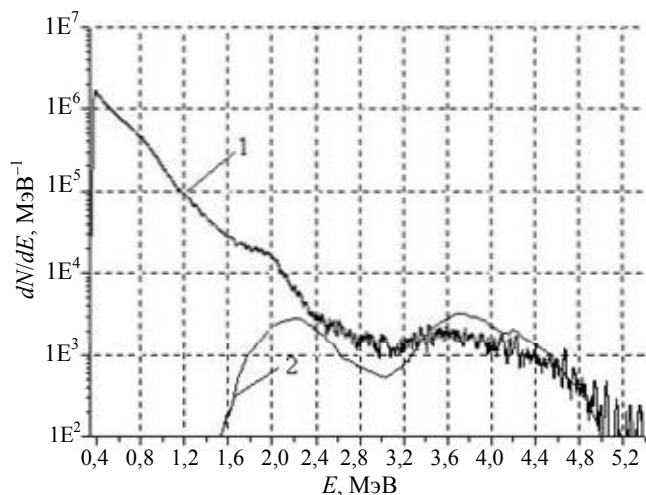


Рис. 5. Сравнение спектра отклика алмазного детектора (1) с расчетом компоненты отклика (2), обусловленной  $(n, \alpha)$ -реакцией

Количество зарегистрированных событий в интервале поглощенной энергии от 3 до 5 МэВ для экспериментально измеренного спектра отклика составило 2414 событий, а для расчетного спектра 3060. Следовательно, эффективный объем детектора равен 80 % от объема алмаза под электрическими контактами. Статистическая погрешность в данном измерении составила 2 %. Таким образом, данная методика позволяет калибровать абсолютную чувствительность алмазных детекторов с высокой точностью.

## Заключение

Реализован метод абсолютной калибровки алмазных детекторов с помощью нейтронного источника  $^{241}\text{Am} + \text{Be}$ . Проведено измерение и численное моделирование амплитудного спектра отклика алмазного детектора при облучении нейтронами изотопного источника  $^{241}\text{Am} + \text{Be}$ . Показано, что модельный спектр с удовлетворительной точностью описывает особенности эксперимента. Эффективный расчетный объем тестируемого детектора составил 80 % от объема алмаза под контактами. Получена оценка эффективности регистрации быстрых нейтронов алмазным детектором по области амплитудного спектра, обусловленной  $(n, \alpha)$ -реакцией на углероде для нейтронов в диапазоне энергий от 8,7 до 10,7 МэВ.

## Литература

1. Krasilnikov A. V., Amosov V. N., van Belle P., Jarvis O. N., Sadler G. J. Study of d-t neutron energy spectra at JET using natural diamond detectors // Nuclear instruments & methods in physics research. (A). 2002. V. 476. P. 500—505.
2. Азизов Э. А., Амосов В. Н., Красильников А. В., Мещанинов С. А., Родионов Н. Б. Конференция "Атомэко". Сб. статей. — М., 2008. С. 33.
3. Walker J. Optical absorption and luminescence in diamond. // Reports on Progress Physics, 1979. V. 42.
4. Райлли Д., Энслин Н., Смит Х., Крайнер С. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. — М.: Бинум, 2000.
5. Алмаз и ионизирующее излучение, Красильников А. В. в книге "Природные алмазы России"/Под ред. В. Б. Кваскова. "Полярон". — М., 1997. С. 131.
6. Гвоздев С. В., Фрунзе В. В., Амосов В. Н. Численное моделирование энергетического спектра ядер отдачи и частиц при взаимодействии быстрых нейтронов с алмазом//Приборы и техника эксперимента. 2009. № 5. С. 29—37.
7. ENDF/B-VII.0 (National Nuclear Data Centre) (<http://www.nndc.bnl.gov>)

## Calibration of diamond fast-neutron spectrometer

V. N. Amosov, S. A. Vlasov, S. V. Meshaninov, N. B. Rodionov, R. N. Rodionov

TRINITI, 12 Pushkov's str., Troitsk, Moscow region, 142190, Russia

E-mail: nbrodnik@triniti.ru

*Problems appearing with detector calibration at neutron generators were emphasized and the alternative method of absolute calibration of diamond detectors using the  $^{241}\text{Am}+\text{Be}$  neutron source was realized. Measurement and numerical simulation of amplitude spectrum of diamond detector response under isotopic  $^{241}\text{Am}+\text{Be}$  neutron source radiation were carried out. The estimation of the detection efficiency of fast neutrons by diamond detector using amplitude spectrum region of  $(n,\alpha)$  reaction on carbon for neutrons in energy range from 8.7 to 10.7 MeV was performed. Calculated effective volume of testing detector is equal to 80 % from physical size of diamond under its contacts. The advantages and disadvantages of usage of isotopic neutron sources for diamond fast neutron detectors calibration are showed.*

PACS: 29.40.VK; 81.05.ug; 07.79.KA

*Keywords:* diamond detector, spectrometer, calibration, neutron source, spectrum.

Bibliography— 7 references.

*Received September 25, 2010*