

## ИЗМЕРЕНИЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА АЛМАЗНЫМ ДЕТЕКТОРОМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСТАНОВКЕ «КВИНТА»

*А. И. Берлев<sup>а</sup>, Н. Б. Родионов<sup>б</sup>, С. И. Тютюнников<sup>а</sup>,  
В. Н. Амосов<sup>б</sup>, С. А. Мещанинов<sup>б</sup>, И. П. Юдин<sup>а,1</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва

Продемонстрирована работоспособность измерительной системы с алмазным детектором при измерении нейтронного спектра по функции отклика алмазного детектора установки «Квинта», помещенной на протонный пучок фазотрона ЛЯП ОИЯИ в энергетическом интервале 2,1–20 МэВ. Измерена скорость счета нейтронного потока. Из спектра отклика алмазного детектора оценен анализируемый спектр нейтронов в энергетическом интервале 7,4–25,7 МэВ. Исследованы спектры отклика алмазного детектора в зависимости от угла между направлением протонного пучка и прямой, проходящей через детектор и центр установки «Квинта», показана анизотропия нейтронного потока в зависимости от угла. Выполнены измерения нейтронного потока в зависимости от расстояния между детектором и установкой «Квинта».

The efficiency of measuring neutron spectra of “Quinta” installation by diamond detector was demonstrated in the experiments with proton beams of energy 2.1–20 MeV at the Phasotron of LNP, JINR. The diamond detector response spectra were used to estimate the energy of incident neutrons which turns out to be in range 7.4–25.7 MeV. The response spectra of a diamond detector were investigated as a function of the angle between the direction of the proton beam and a line passing through the center of the detector and the “Quinta” installation. The anisotropy of the neutron flux depending on the angle was demonstrated. Also the neutron flux was measured as a function of distance to “Quinta” installation.

PACS: 29.40.Wk; 81.05.ug; 07.77.Ka

### ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением применения искусственных монокристаллов алмаза является разработка измерительных систем с алмазными детекторами нейтронного излучения для решения задач термоядерного синтеза, атомной энергетики, физики высоких энергий и космических исследований. В сравнении с другими диэлектриками и полупроводниками наиболее важными свойствами синтетического алмаза для исследования

---

<sup>1</sup>E-mail: yudin@jinr.ru

нейтронов высоких энергий являются широкая запрещенная зона, высокая электрон-дырочная подвижность и короткое время жизни носителей зарядов. Такого рода устройства имеют ряд важных преимуществ перед традиционными системами нейтронной спектроскопии (времяпролетными спектрометрами, спектрометрами ядер отдачи и др.) в первую очередь ввиду их малого размера и простоты конструкции. Исследования последних лет подтвердили, что детекторы из природного алмаза могут с успехом применяться для исследования нейтронных полей реакции синтеза дейтерия и трития в термоядерных реакторах [3–6]. В работе [7] показано, что алмазный детектор нейтронов не имеет ограничений для применения в условиях диагностики вертикальной нейтронной камеры ИТЭР по всем критическим параметрам. Использование на токамаке JET алмазных детекторов показало их эффективность и надежность [8]. Важной задачей является восстановление исходного спектра нейтронного спектра по измеренному амплитудному отклику алмазного детектора (обратная задача). Задача определения нейтронного спектра по отклику алмазного детектора в диапазоне энергий нейтронов от 0,5 до 10,7 МэВ решалась в [9]. Диапазон измеряемых энергий нейтронов детектором: от 1 до 20 МэВ. Монокристаллический синтетический алмаз является также перспективным для применения в спектроскопии рентгеновского,  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучений [10].

К важным преимуществам измерительной системы на основе алмазного детектора относятся: компактность, малые размеры чувствительного элемента, автономность по электропитанию, радиационная стойкость, защищенность от неблагоприятных погодных условий, удобство в эксплуатации и возможность получать информацию в режиме on-line. Алмазный детектор с размерами чувствительного элемента  $4,5 \times 4,5 \times 0,5$  мм позволяет в счетном режиме измерять потоки быстрых нейтронов до  $10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Энергетическая область анализа нейтронного спектра обеспечивается установкой регулируемых порогов дискриминации.

Цель данной работы — исследование возможности применения алмазного детектора для оценки нейтронного спектра установки «Квинта» [1] (рис. 1), помещенной на протонный пучок фазотрона [2] (ЛЯП ОИЯИ).

В эксперименте в ЛЯП на пучке фазотрона ось пучка проходит через центр третьей урановой секции. С осью мишени ось пучка составляет угол  $2^\circ$  (см. рис. 1).

#### Основные параметры пучка из фазотрона

Энергия ускоренных протонов $T_p$ , МэВ	$659 \pm 6$
Энергетическая дисперсия $\delta E$ , МэВ	$3,1 \pm 0,8$
Частота циклов ускорения протонов (частота модуляции), Гц	250
Эмиттанс на границе рассеянного магнитного поля фазотрона: горизонтальный $\varepsilon_x$ , см · мрад вертикальный $\varepsilon_y$ , см · мрад	$5,1 \pm 2,3$ $3,4 \pm 1,4$
Интенсивность выведенного протонного пучка в режиме «быстрого» вывода (длительность импульса 30 мкс), мкА	2–2,5
Интенсивность выведенного протонного пучка в режиме «медленного» вывода (растянутый во времени пучок в течение 85 % длительности периода модуляции ( $\sim 4$ мс)), мкА	1,6–2,0
<i>Примечание.</i> Выведенный протонный пучок имеет микроструктуру — сгустки частиц длительностью около 10 нс следуют с интервалом около 70 нс.	

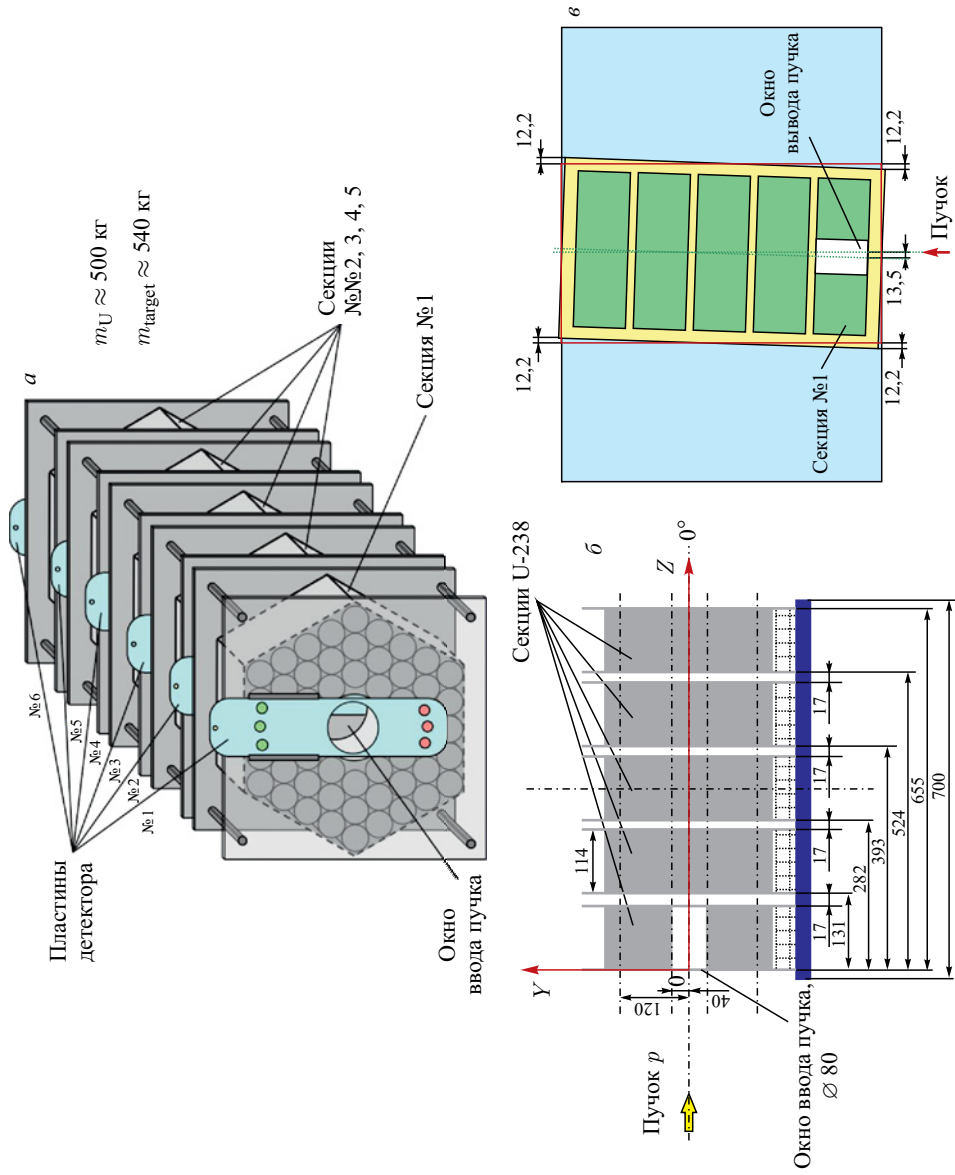


Рис. 1. а) Общий вид урановой мишени «Квинта», вертикальный разрез вдоль пучка. б) Мишень «Квинта», вид сверху

Основные параметры [2] пучка из фазотрона приведены в таблице.

В нашем эксперименте пучок протонов ( $p$ ) имел следующие характеристики: энергия 660 МэВ; частота модуляции 250 Гц;  $dT = 40$  мкс; средняя интенсивность  $10^{11}$  частиц/с.

### АЛМАЗНЫЙ ДЕТЕКТОР

Основной принцип регистрации нейтронов алмазным детектором основан на сборе заряда, возникающего при торможении в алмазном чувствительном элементе детектора ядер отдачи и продуктов ядерных реакций при взаимодействии нейтронов с ядрами углерода. При облучении нейтронами алмазный детектор регистрирует суммарную энергию продуктов реакций в теле алмазного детектора. При облучении алмаза в потоке быстрых нейтронов происходит упругое и неупругое рассеяние нейтронов и ядерные реакции на углероде с образованием новых заряженных частиц [3]:

- упругое рассеяние нейтрона  $^{12}\text{C}(n, n)^{12}\text{C}$ ;
- неупругое рассеяние нейтрона  $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*$ ;
- неупругое взаимодействие нейтрона с ядром углерода с испусканием трех  $\alpha$ -частиц  $^{12}\text{C}(n, n'3\alpha)$ ;
- неупругое взаимодействие нейтрона с ядром углерода с испусканием  $\alpha$ -частицы с первого возбужденного уровня бериллия  $^{12}\text{C}(n, \alpha_1)^9\text{Be}$ ;
- неупругое взаимодействие нейтрона с ядром углерода с испусканием  $\alpha_0$ -частицы с основного состояния  $^9\text{Be}$   $^{12}\text{C}(n, \alpha_0)^9\text{Be}$ ;
- реакция  $^{12}\text{C}(n, p)^{12}\text{B}$  при энергиях нейтронов более 15 МэВ;
- реакция  $^{12}\text{C}(n, d)^{11}\text{B}$  при энергиях нейтронов более 16 МэВ.

Вследствие особенностей конструкции алмазного детектора отклик от  $\gamma$ -излучения ограничен по амплитуде и легко дискриминируется порогом нижнего уровня.

Для обеспечения хорошего энергетического разрешения устройства для восстановления спектра нейтронов на основе алмазного детектора необходимо реализовать режим полного сбора заряда, что возможно в случае высокого кристаллографического качества

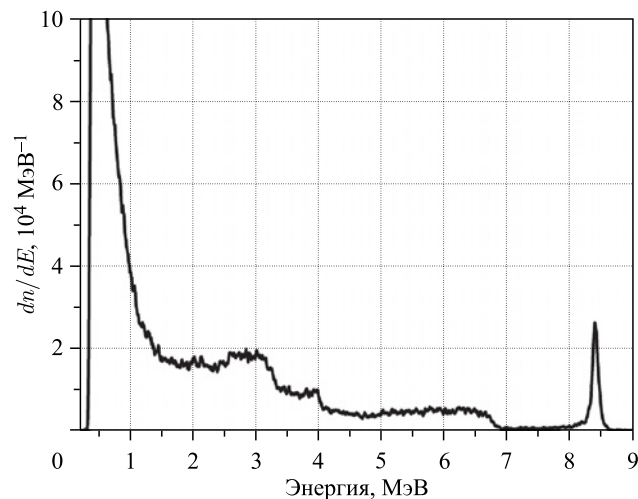


Рис. 2. Функция отклика алмазного детектора на 14-МэВ нейтроны

применяемого алмазного материала. Поэтому для обеспечения эффективной работы таких устройств применяют кристаллы высокого электронного качества. Функция отклика алмазного детектора для 14-МэВ нейтронов представлен на рис. 2 (в качестве чувствительного элемента используется CVD-алмаз фирмы «Element6»).

Чувствительный алмазный элемент измерительного устройства выполнен в виде пластины с размерами  $4,5 \times 4,5 \times 0,5$  мм электронного качества фирмы «Element6». На алмазный чувствительный элемент нанесены золотые контакты. Площадь под электрическими контактами на алмазной пластине составляла  $16 \text{ мм}^2$ , соответственно, рабочий объем детектора равен  $8 \text{ мм}^3$ . Энергетическое разрешение детектора при регистрации быстрых нейтронов было не хуже 1%. Алмазная пластина монтировалась в корпус с разъемом типа BNC. Конструкция детектора обеспечивает коаксиальное включение алмазной пластины, что дает высокую помехозащищенность.

Сигнал детектора регистрировался с помощью специализированного спектрометрического тракта, включающего зарядочувствительный предусилитель (ЗЧПУ), спектрометрический усилитель-формирователь и амплитудный анализатор. Основной частью специализированного тракта является блок обеспечения, выполняющий функции коммутации и обеспечения ЗЧПУ питанием и напряжением смещения детектора. В состав блока обеспечения также входит усилитель-формирователь сигнала. ЗЧПУ коммутируется с блоком обеспечения коаксиальной линией связи 50 Ом длиной до 100 м. Алмазный детектор непосредственно устанавливается на входной разъем ЗЧПУ. Блок обеспечения специализированного тракта, ЗЧПУ и алмазный детектор в корпусе представлены на рис. 3.

Восстанавливаемый спектр нейтронов может быть построен как на основе анализа формы пика реакции  $^{12}\text{C}(n, \alpha_0)^9\text{Be}$ , так и в результате анализа всей функции отклика детектора. Реакция  $^{12}\text{C}(n, \alpha_0)^9\text{Be}$  дает значение поглощенной в детекторе энергии ( $\alpha_0$ -частицы и ядра отдачи  $^9\text{Be}$ ), линейно связанной с энергией взаимодействующего ней-

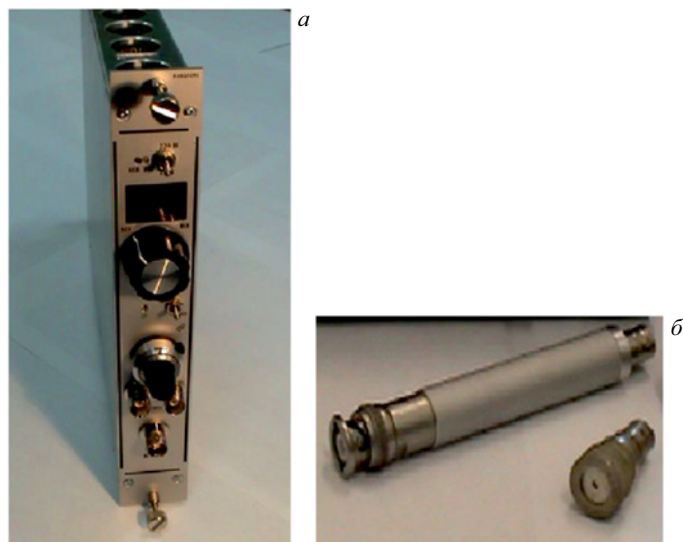


Рис. 3. Блок обеспечения специализированного тракта (а), зарядочувствительный предусилитель и алмазный детектор в корпусе (б)

трона. Для анализа всей функции отклика детектора требуется иметь полную функцию преобразования энергии нейтрона в продукты реакций на углероде в интересующем диапазоне энергий и отработанную программу обработки, решающую обратную задачу восстановления нейтронного спектра [9].

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА НА УСТАНОВКЕ «КВИНТА»

Калибровка энергетической шкалы тракта была выполнена при регистрации  $\alpha$ -частиц от образцовых  $\alpha$ -источников набора ОСАИ.  $\alpha$ -источник был прикреплен к детектору, расстояние между чувствительным элементом и поверхностью радиоактивного источника в воздухе составляло 2 мм. Тестирование проводилось по  $\alpha$ -спектру  $^{226}\text{Ra}$  при экспозиции 5 мин и напряжении смещения  $-250$  В. Спектры при регистрации  $\alpha$ -частиц от образцовых  $\alpha$ -источников набора ОСАИ в отсутствие нейтронного потока, инициированного протонным пучком, а также в экспериментах с нейтронным потоком, представлены на рис. 4. В последнем случае спектр  $\alpha$ -источников виден на фоне функции отклика детектора от нейтронного потока установки «Квинта». Из рис. 4 видно, что включение протонного пучка не влияет на положение  $\alpha$ -пиков от  $^{226}\text{Ra}$ , что свидетельствует о стабильности работы устройства и позволяет определить шкалу в энергетических единицах. На рис. 4 энергетическая шкала приведена с учетом поправок на прохождение  $\alpha$ -частиц в воздухе.

На рис. 5 приведена скорость счета алмазного детектора при облучении источником ОСАИ  $^{226}\text{Ra}$  (пунктирная кривая), суммарная скорость счета от нейтронного потока установки «Квинта» и радиоактивного источника (сплошная кривая), при этом алмазный детектор находится на расстоянии 5 м от установки. Из графика скорости счета видно, что при отключении протонного пучка (сплошная кривая, при  $t = 883$  с) скорость счета детектора соответствует облучению только источником ОСАИ, что свидетельствует о

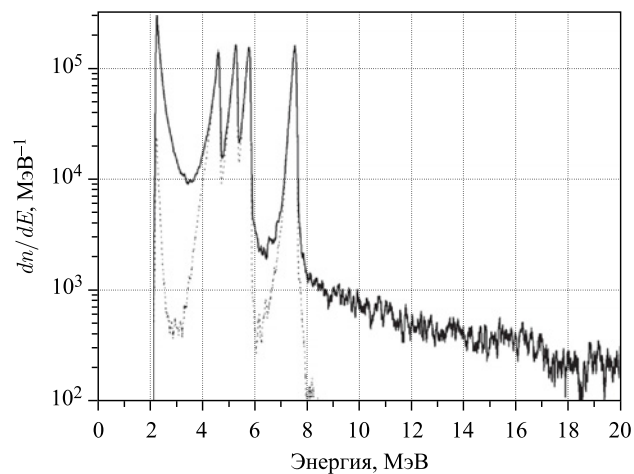


Рис. 4.  $\alpha$ -спектры  $^{226}\text{Ra}$  без протонного пучка (пунктирная кривая) и с протонным пучком (сплошная). Расстояние от установки «Квинта» до детектора 5 м. Напряжение смещения  $-250$  В, время экспозиции 15 мин, расстояние от чувствительного элемента детектора до ОСАИ по воздуху 2 мм

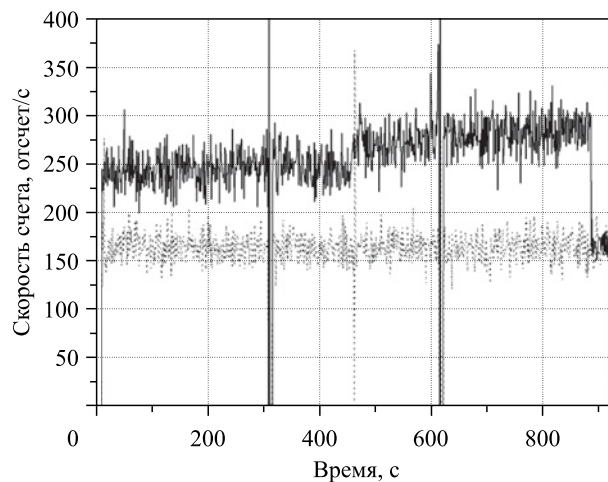


Рис. 5. Скорость счета алмазного детектора при облучении только ОСАИ  $^{226}\text{Ra}$  (пунктирная линия) и совместно с установкой «Квинта» (сплошная). Расстояние от установки «Квинта» до детектора 5 м. Напряжение смещения  $-250$  В, время экспозиции 15 мин, расстояние от чувствительного элемента детектора до ОСАИ по воздуху 2 мм

пренебрежимо малом вкладе  $\gamma$ -излучения в скорость счета, обусловленного активацией конструкции. Порог регистрации в этих измерениях составлял 2,1 МэВ. Из рис. 5 видно, что скорость счета при облучении  $\alpha$ -частицами  $^{226}\text{Ra}$  составляет  $\sim 150$  отсчетов/с, тогда как скорость счета, обусловленная нейтронами, 100 отсчетов/с. Эффективное сечение с углеродом для  $\alpha$ -частицы приблизительно на три порядка больше, чем для нейтрона, следовательно, при одинаковой скорости счета плотность потока нейтронов будет на три порядка превышать плотность потока  $\alpha$ -частиц источника  $^{226}\text{Ra}$ . Оценить величину потока нейтронов в эксперименте можно по данным рис. 5. Для рассматриваемых энергий эффективное сечение нейтронов  $\sim 8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ . Это значит, что плотность потока нейтронов в эксперименте составляет  $1,3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ .

В данной работе приведены результаты измерения функций отклика алмазного детектора и скорости счета устройства для восстановления нейтронного спектра в зависимости от угла между направлением протонного пучка и прямой, проходящей через детектор и центр установки «Квинта». Измерения были выполнены для углов  $0$ ,  $45$  и  $90^\circ$ . Цель данных экспериментов — продемонстрировать работу устройства и восстановление нейтронных спектров из установки «Квинта» под разными углами.

На рис. 6, 7 приведены функции отклика детекторов. Из рис. 6, 7 видно, что основная часть нейтронов имеет энергию менее 9 МэВ. Энергетический спектр отклика детектора для разных углов качественно совпадает. Как показали измерения, максимальный нейтронный поток зафиксирован при угле  $0^\circ$ . При увеличении угла до  $45^\circ$  нейтронный поток падает приблизительно в пять раз (рис. 6), при дальнейшем возрастании угла от  $45$  до  $90^\circ$  поток нейтронов увеличивается в два раза (рис. 7). Если сравнить функции откликов алмазных детекторов при углах  $0$  и  $45^\circ$ , можно видеть, что при угле  $0^\circ$  больше низкоэнергетических нейтронов, чем при угле  $45^\circ$ . Очевидно, с увеличением расстояния между детектором и установкой нейтронный поток падает (рис. 6, 7).

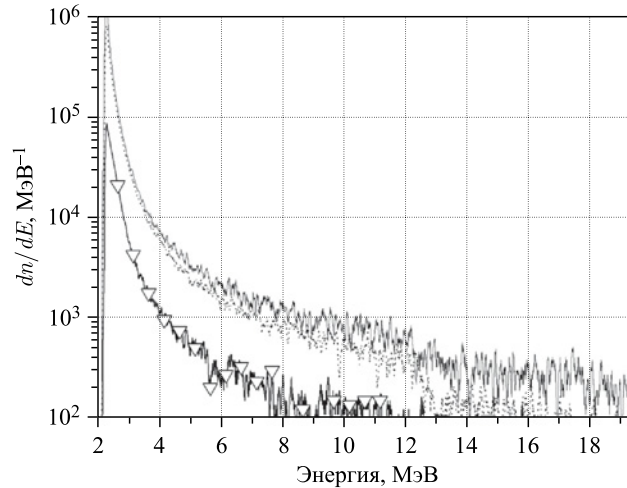


Рис. 6. Функция отклика алмазного детектора при угле  $0^\circ$  на расстояниях 5,5 м (сплошная кривая) и 3,4 м (пунктирная) от установки «Квинта». Функция отклика алмазного детектора при  $45^\circ$  на расстоянии 3,4 м от установки «Квинта» показана кривой, отмеченной символом  $\nabla$ . Напряжение смещения  $-250$  В, время экспозиции 30 мин

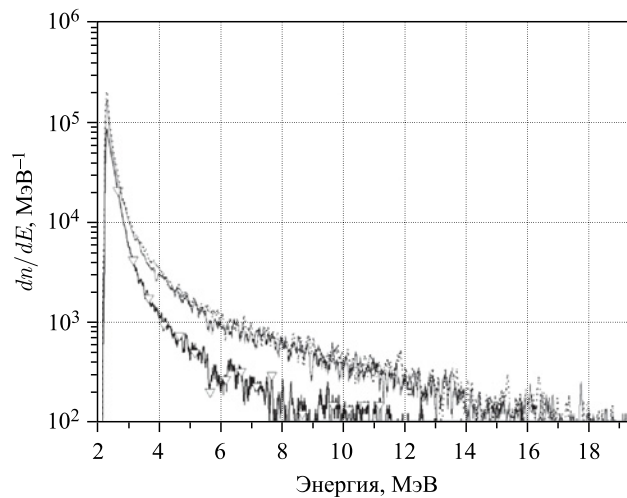


Рис. 7. Функция отклика алмазного детектора при угле  $45^\circ$  на расстоянии 3,4 м (сплошная кривая, отмеченная символом  $\nabla$ ) и на расстоянии 1,7 м для углов  $45^\circ$  (сплошная кривая) и  $90^\circ$  (пунктирная) от установки «Квинта». Напряжение смещения  $-250$  В, время экспозиции 30 мин

Функция отклика алмазного детектора и скорости счета детектора в зависимости от угла между направлением протонного пучка и прямой, проходящей через детектор и центр установки «Квинта» и расстояния между детектором и установкой показали сильную анизотропию нейтронного потока в зависимости от угла. Как видно из рисунков, функция отклика детектора находится в диапазоне 2,1–20 МэВ. Минимальная поглощенная энергия нейтронов в функции отклика алмазного детектора  $E_{\min}$  соответствует



упругому процессу. Это позволяет вычислить минимальную энергию нейтронов в спектре излучения [11,12]:  $E_1 = E_{\min}(M_1 + M_2)^2 / (4M_1M_2)$ , где  $M_1, M_2$  — массовые числа нейтрона и ядра углерода соответственно. Как указано выше, порог регистрации был равен  $E_{\min} = 2,1$  МэВ, поэтому минимальная энергия в нейтронном спектре составит 7,4 МэВ. Максимальная поглощенная энергия  $E_{\max}$  соответствует реакции  ${}^9\text{Be} \text{ }^{12}\text{C}(n, \alpha_0){}^9\text{Be}$ . Это позволяет вычислить максимальную энергию в спектре нейтронов:  $E_2 = E_{\max} - Q$ , где  $Q = -5,7$  МэВ — энергия реакции  ${}^9\text{Be} \text{ }^{12}\text{C}(n, \alpha_0){}^9\text{Be}$ . Таким образом, диапазон анализируемого спектра нейтронов составил 7,4–25,7 МэВ.

### ВЫВОДЫ

- Продемонстрирована работоспособность измерительной системы с алмазным детектором в энергетическом интервале 2,1–20 МэВ.
- Оценен анализируемый спектр нейтронов из спектра отклика алмазного детектора в диапазоне 7,4–25,7 МэВ.
- Продемонстрировано мониторингирование нейтронного потока в ограниченном диапазоне энергий.
- Выполнено измерение функций откликов детектора в зависимости от угла между направлением протонного пучка и прямой, проходящей через детектор и центр установки «Квинта», и показана анизотропия нейтронного потока в зависимости от угла.
- Оценен вклад вторичной активации в общий сигнал: в рассматриваемом диапазоне регистрируемых энергий активационный фон мал по сравнению с нейтронным потоком.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kadykov M. et al.* Experiments with Massive Uranium Target — on the Way to Technologies for Relativistic Nuclear Energy // J. Phys. Conf. Ser. V. 366. P. 012024.
2. Фазотрон Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и его пучки. Дубна: ОИЯИ, 1996.
3. *Красильников А. В.* Алмаз и ионизирующее излучение // Природные алмазы России. М.: Полярон, 1997. С. 131.
4. *Schmid G. J. et al.* Calibration of National Ignition Facility Neutron Detectors in the Energy Range  $E < 14$  MeV // Rev. Sci. Instr. 2004. V. 75, No. 10. P. 3589.
5. *Krasilnikov A. V. et al.* // Proc. of Sixteenth IAEA Fusion Energy Conf., Montreal, 1996. V. 1. P. 293.
6. *Krasilnikov A. V. et al.* // Fusion Engin. Design. 1997. V. 34–35. P. 573.
7. *Амосов В. Н., Мещанинов С. А., Родионов Н. Б.* Система компактных алмазных спектрометров и мониторов нейтронного потока вертикальной нейтронной камеры для международного экспериментального термоядерного реактора // Прикл. физика. 2011. № 4. С. 104–108.
8. *Krasilnikov A. V. et al.* Study of  $d - t$  Neutron Energy Spectra at JET Using Natural Diamond Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 476. P. 500–505.
9. *Amosov V. N. et al.* Fast Neutron Diamond Spectrometer // J. Diamond Rel. Materials. 2011. V. 20, No. 8. P. 1239–1242.
10. *Амосов В. Н. и др.* Разработка детекторов ионизирующих излучений для ядерной энергетики на основе искусственного алмаза // ПТЭ. 2010. № 2. С. 1–8.
11. *Немец О. Ф., Гофман Ю. В.* Справочник по ядерной физике. Киев: Наук. думка, 1975.
12. *Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985.

Получено 20 августа 2015 г.