

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ АЛМАЗНОГО СПЕКТРОМЕТРА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ИТЭР

© 2019 г. К. К. Артемьев^{а,*}, Н. Б. Родионов^б, В. Н. Амосов^а, В. А. Красильников^б,
С. А. Мещанинов^б, В. П. Родионова^б, И. В. Кедров^с, Е. Г. Кузьмин^с, С. Я. Петров^д

^а Проектный центр ИТЭР Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, стр. 3

^б ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований
Россия, 142190, Москва, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12

^с НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова
Россия, 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, 3

^д Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

* e-mail:artemevkk@gmail.com

Поступила в редакцию 23.08.2018 г.

После доработки 23.08.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Представлена конструкция алмазного спектрометра нейтральных частиц (а.с.н.ч.), который входит в состав анализатора атомов перезарядки (а.а.п.) ИТЭР. Описаны режимы работы а.с.н.ч. в составе комплекса а.а.п., его преимущества и ограничения. Система а.с.н.ч. включает в себя два алмазных детектора разной чувствительности, отличающейся в 9 раз. Проведены численные оценки энергетических потерь в контактах детектора. Представлены результаты тестирования алмазного детектора.

DOI: 10.1134/S0032816219020186

ВВЕДЕНИЕ

При проведении полномасштабных дейтериево-третиевых экспериментов на токамаках образуются значительные потоки нейтрализованных частиц МэВ-диапазона энергий [1]. Для диагностики плазмы по потокам атомов в ФТИ им. Иоффе были созданы атомные анализаторы. Представляется перспективным использовать для анализа алмазные детекторы благодаря таким их свойствам, как высокая радиационная стойкость (предельно допустимый флюенс нейтронов превышает $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $2 \cdot 10^{13}$ по α -частицам), высокая чувствительность к регистрации частиц, возможность эксплуатации при высоких температурах и малые размеры.

Система спектрометрии быстрых атомов перезарядки, состоящая из спектрометрического детектора на основе природного алмаза и цифрового спектрометрического тракта [2], использовалась для изучения эволюции функции распределения быстрых ионов при инжекции нейтралов и ионном циклотронном нагреве плазмы на токамаке JET. Исследования эффективности различных видов дополнительного нагрева плазмы и удержания быстрых ионов на токамаке JET с помощью алмазного детектора проводились также в

работах [3–6], а в работах [7, 8] проведена его калибровка для алмазного спектрометра нейтральных частиц (а.с.н.ч.).

Атомы и ионы, регистрируемые алмазным детектором, имеют небольшие пробеги в кристалле алмаза, например пробег α -частиц с энергией 5.48 МэВ составляет 13.8 мкм. Нижний порог регистрации определяется в большей степени толщиной фронтального контакта и имеет типичное значение 50 кэВ. Атомы с энергией более 8 МэВ способны пролететь алмазный детектор (толщиной 200 мкм) насквозь и унести оставшуюся часть своей энергии. Алмазный чувствительный элемент выдерживает высокие температуры, а также градиенты температуры [9]. Такие свойства позволяют применять алмазные детекторы для спектрометрии атомов перезарядки в жестких условиях токамака ИТЭР [3–8].

В данной работе представлена конструкция а.с.н.ч. подсистемы анализатора атомов перезарядки (а.а.п.) для ИТЭР, описаны режимы работы а.с.н.ч. в составе комплекса диагностики атомов перезарядки и его характеристики, указаны условия, в которых будет работать а.с.н.ч., представлена конструкция корпусов алмазных детек-

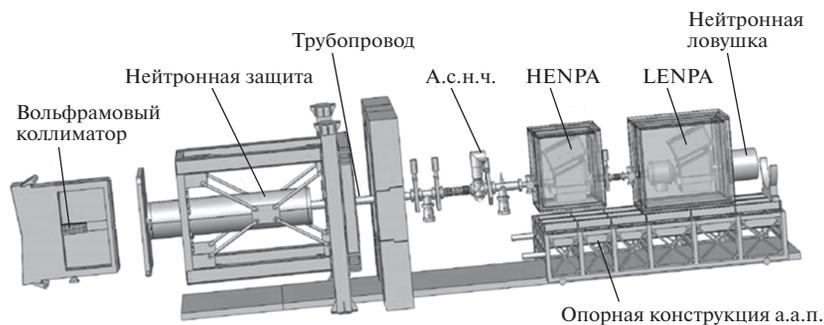


Рис. 1. Модель комплекса анализатора атомов перезарядки.

торов для а.с.н.ч. Проведено тестирование а.с.н.ч. на α -источниках.

1. КОМПЛЕКС А.А.П. ИТЭР

Как показывает практика, реализация системы диагностики атомов перезарядки в широком интервале энергии без ухудшения рабочих характеристик требует необходимости использовать два анализатора на разные диапазоны энергии: тепловой до 200 кэВ и сверхтепловой до 4 МэВ. В ИТЭР комплекс а.а.п. содержит анализаторы НЕНРА (High Energy Neutral Particle Analyzer) и ЛЕНРА (Low Energy Neutral Particle Analyzer) на диапазоны энергий 10–200 кэВ и 0.1–4 МэВ соответственно. Детекторы находятся в 10 метрах от первой стенки ИТЭР. Основное назначение анализаторов атомов перезарядки состоит в измерении и анализе потоков нейтральных атомов дейтерия и трития соответственно в сверхтепловом и тепловом диапазонах энергии. Анализаторы соединены с камерой токамака непрерывным вакуумным трубопроводом. Конструкция трубопровода предусматривает, что линия видимости прибора, расположенного за ним, не перекрывается элементами прибора, расположенного перед ним. Это позволяет обеспечить одновременную и независимую работу обоих анализаторов [10]. На рис. 1 представлен комплекс а.а.п.

В состав комплекса входят также трубопровод, соединяющий анализаторы с вакуумной камерой ИТЭР, и нейтронная защита. Нейтронная защита представляет собой систему, состоящую из установленного в портовой заглушке вблизи первой стенки ИТЭР вольфрамового коллиматора, защиты вокруг трубопровода и защиты, окружающей сами анализаторы, и нейтронной ловушки в торце системы анализаторов.

В состав комплекса а.а.п. входит а.с.н.ч., который в различных режимах работы ИТЭР способен регистрировать потоки атомов перезарядки с большим, чем у НЕНРА и ЛЕНРА, временным и энергетическим разрешением. В некоторых режимах (с мультичастичными потоками) а.а.п.

предоставляет а.с.н.ч. информацию о типе измеряемых частиц; по этой причине а.с.н.ч. следует рассматривать как вспомогательную систему для а.а.п.

Основная цель а.с.н.ч. — определение энергетического спектра атомов перезарядки для калибровки а.а.п. и перепроверки измерений в диапазоне энергий 50 кэВ–8 МэВ. Также а.с.н.ч. будет выполнять дополнительные задачи, такие как:

- исследование динамики энергии легкоподвижных ионов и пространственных распределений во время различных плазменных неустойчивостей; в процессе развития неустойчивости доля высокоэнергетических ионов движется вне ядра плазмы к периферии, где они могут перезарядаться, получившиеся атомы покидают плазму и могут достигать алмазного детектора; энергетический спектр этой доли ионов может предоставить информацию об особенностях развития неустойчивости в плазме;

- изучение эффективности дополнительного нагрева (нейтральной инжекции и ионно-циклотронного нагрева (и.ц.н.)); энергетический спектр и.ц.н.-ускоренных ионов после перезарядки в плазме может быть измерен а.с.н.ч.; это предоставит информацию об эффективности поглощения высокочастотных волн и удержании быстрых ионов пучка;

- изучение возникновения заряженных продуктов плазмы (α -частиц, протонов, тритонов) их удержание и торможение;

- измерение ионной температуры для перекрестной калибровки с помощью а.а.п.

В дейтерий-тритиевой (D-T) плазме ИТЭР нейтронные потоки будут значительно превышать потоки атомов (табл. 1), и так как алмазный детектор находится в прямой видимости плазмы, то а.с.н.ч. будет в основном регистрировать нейтроны. Действуя в качестве нейтронного спектрометра, а.с.н.ч. обеспечит измерения ионной температуры (D-T)-плазмы и регистрацию данных для изучения распределений энергии дейте-

Таблица 1. Ожидаемая плотность потока атомов, нейтронов, γ -излучения в водородно-гелиевой и (D-T)-плазме в разряде мощностью 500 МВт установки ИТЭР и максимальный флюенс в месте расположения а.с.н.ч.

Ионизирующее излучение	Ожидаемая плотность потока в плазме, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$		Максимальный флюенс, см^{-2}
	водородно-гелиевой	дейтерий-тритиевой	
Нейтроны	—	10^{10}	$2 \cdot 10^{14}$
Гамма	—	10^{10}	10^{16}
Атомы	10^7	$5 \cdot 10^6$	10^{13}

рия и трития. Он также обеспечит мониторинг потока нейтронов.

В водородно-гелиевой плазме минимальная радиационная стойкость алмаза определяется атомами перезарядки, вылетающими из плазмы, которая составляет $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, при ожидаемом потоке частиц $\sim 10^7 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. В (D-T)-плазме минимальная радиационная стойкость определяется нейтронами, максимальный допустимый флюенс которых составляет $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, при ожидаемом потоке частиц $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в месте расположения а.с.н.ч. во время разрядов установки ИТЭР с мощностью 500 МВт (табл. 1).

Регистрация и обработка данных в сочетании с быстрыми, специально разработанными, электронными компонентами позволяют а.с.н.ч. обрабатывать загрузку до 10^6 импульсов/с, что позволяет получить временное разрешение < 10 мс при спектрометрическом режиме измерений.

А.с.н.ч. не может различить регистрируемые частицы по массе и определить какие конкретно частицы измеряются. Особую ценность а.с.н.ч. для ИТЭР приобретает при совместном анализе данных с системой а.а.п.

Алмазные детекторы будут установлены в вакуумной трубе системы а.а.п. перед анализатором нейтральных частиц высокой энергии (НЕНПА). А.а.п. и а.с.н.ч. будут работать одновременно. А.с.н.ч. находится приблизительно в 10 метрах от первой стенки ИТЭР. Апертура в первой стенке составляет 20 см, а отверстие диафрагмы детектора — 2–10 мм.

Схема блока а.с.н.ч. представлена на рис. 2. Детекторы будут располагаться в “активных” и “неактивных” (вне прямого потока) позициях. Блок а.с.н.ч. будет представлять собой два идентичных набора алмазных детекторов. Для проведения ремонта кронштейн, на котором размещены алмазные детекторы, может быть выведен из корпуса а.с.н.ч. Мощность термоядерной нагрузки на а.с.н.ч. $< 5 \text{ Вт см}^{-2}$. Меньше 10% от этой мощности будет поглощаться корпусами детекторов и их держателем. Оценки показали, что нагрев детектора $< 1^\circ\text{C}$.

Для калибровки LENPA и HENPA а.с.н.ч. будет предоставлять данные о спектрах нейтраль-

ных частиц с энергетическим порогом 50 кэВ. Каналы LENPA с энергией ниже 50 кэВ не будут калиброваться а.с.н.ч. Энергетическое разрешение а.с.н.ч. составляет 30 кэВ для энергии выше 100 кэВ.

Из-за воздействия нейтронного потока ИТЭР компоненты а.с.н.ч. будут активироваться во время работы. Настоящая конструкция блока а.с.н.ч. должна обеспечить минимум общей активации и ограничивать облучение персонала при монтаже, установке, испытаниях и эксплуатации.

2. КОНСТРУКЦИЯ КОРПУСА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА

Система а.с.н.ч. включает в себя два алмазных детектора разной чувствительности. Были разработаны и изготовлены корпуса алмазных детекторов для а.с.н.ч. ИТЭР. Цель разработки: обеспечить минимальный вес и габариты конструкции детектора и разработать технологию приваривания тоководов к кабелю.

На рис. 3 представлена оправка алмазного детектора, а на рис. 4 — модель алмазного детектора. Алмазные пластины 4 (рис. 3) размещаются в оправке (1 на рис. 4) из высокотемпературного изоляционного материала, например сапфира с отверстием, размеры отверстия соответствуют

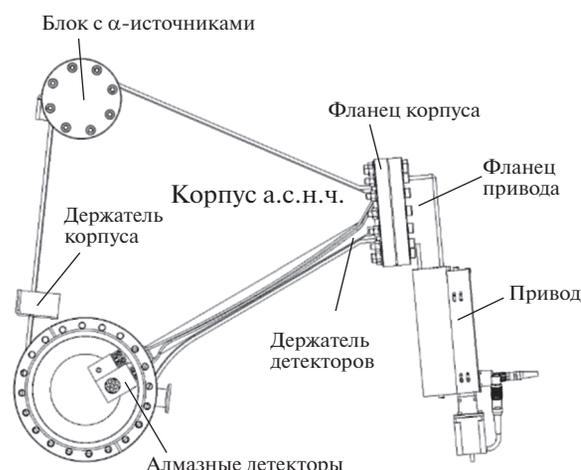


Рис. 2. Схема блока а.с.н.ч.

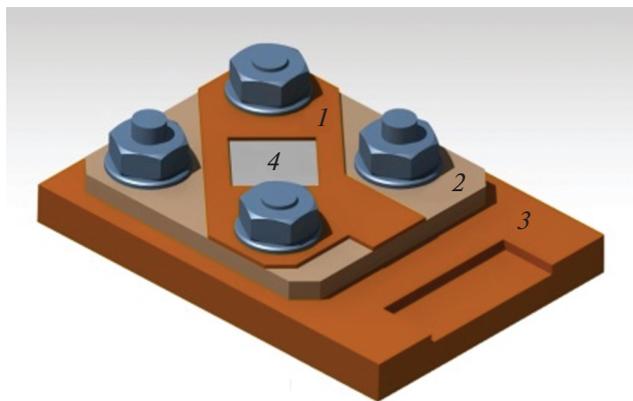


Рис. 3. Модель оправки алмазного детектора. 1 – верхняя диафрагма; 2 – сапфировый изолятор; 3 – основа первого экрана; 4 – алмазная пластина.

размерам алмазной пластины. Оправка алмазного детектора содержит сапфировый изолятор толщиной 1 мм, верхнюю диафрагму и основу первого экрана (рис. 3). Напряжение от внешнего источника питания на кристалл прикладывается через верхнюю диафрагму (1 на рис. 3). С основы первого экрана снимают сигналы. Второй экран детектора заземляют. Второй экран детектора представляет собой основу с крышкой, служащей для крепления алмазного детектора к системе ввода-вывода.

Схема подключения детектора – триаксиальная. Чувствительный элемент устанавливается в оправку (1 на рис. 4) и закрывается крышкой первого экрана 2. Далее собранная конструкция “накрывается” керамическими изоляторами 3, 4 и устанавливается в основание второго экрана 5, после чего накрывается крышкой второго экрана 6 и закручивается с торца. На второй экран также устанавливаются держатель кабеля 7 и крепеж-

ный винт 8, при помощи которого детектор крепится к штанге. Для подключения детекторов а.с.н.ч. используются высоковакуумные триаксиальные кабели 12. Центральная жила приваривается к верхней диафрагме оправки (1 на рис. 3), оплетка первого экрана приваривается к кольцу 9 (рис. 4), который в свою очередь приваривается к основе первого экрана (3, рис. 3). “Земля” приваривается к контактному кольцу 10 (рис. 4), а оно – к держателю кольца 11, который закрепляется к основе при помощи винта и приваривается. Детектор повышенной чувствительности имеет аналогичную конструкцию.

Для подсоединения а.с.н.ч. к электронному блоку использовался высоковакуумный триаксиальный кабель. Его тоководы приваривались к деталям корпусов алмазных детекторов с помощью иттербиевого волоконного лазера ЛК-300-В, завернутые в медную фольгу тоководы обжимали и пробивали (в атмосфере аргона) лазерными импульсами прямоугольной формы с энергией 15 Дж и длительностью 1 мс, соединяя с медным массивом.

3. ТЕСТИРОВАНИЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА

Очевидно, толщина металлического контакта влияет на нижний порог регистрации частиц. Поэтому лицевой контакт должен быть достаточно тонким для минимизации потерь энергии при прохождении частицами металла. Для подбора оптимальной толщины лицевого контакта рассчитывалась зависимость от нее энергетических потерь протонов и α -частиц в золоте.

Протоны с энергий 50 кэВ в лицевом контакте из золота (35 нм) теряют 12.1% энергии, изменение толщины контакта до 10 нм позволяет уменьшить энергетические потери в 3.5 раза (3.5%).

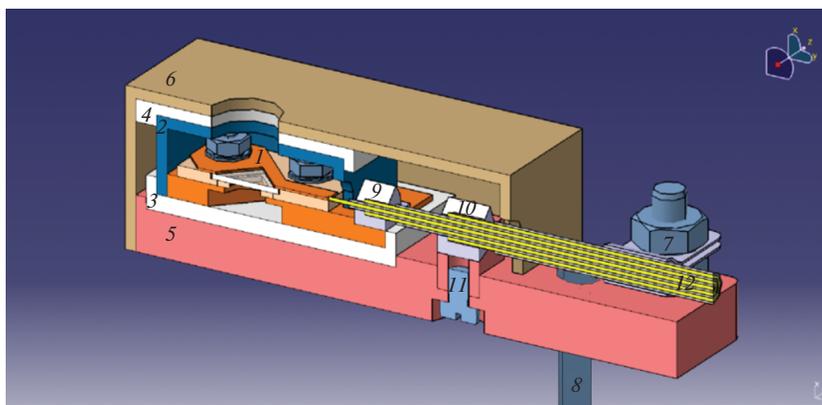


Рис. 4. Модель изготовленного алмазного детектора. 1 – оправка; 2 – крышка первого экрана; 3, 4 – керамические изоляторы; 5 – основа второго экрана; 6 – крышка второго экрана; 7 – держатель кабеля; 8 – крепежный винт; 9 – кольцо; 10 – контактное кольцо; 11 – держатель кольца; 12 – триаксиальный кабель.

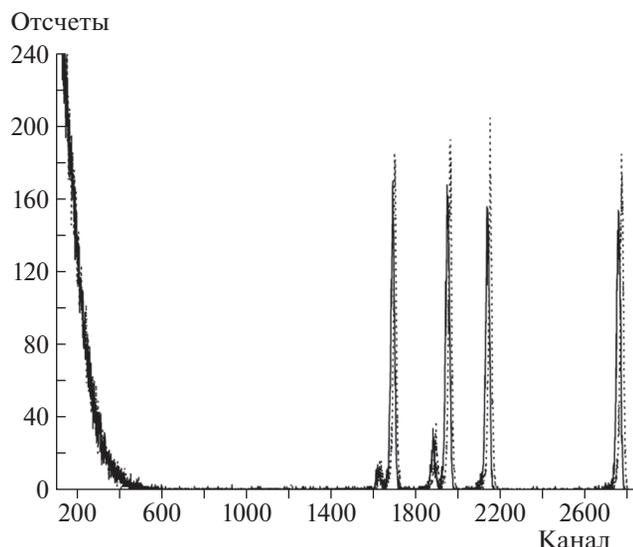


Рис. 5. Спектры отклика алмазного детектора с золотыми контактами (35 нм – пунктирная линия, 10 нм – сплошная линия) на α -частицы ^{226}Ra . Время измерения 15 мин.

При энергии протонов 150 кэВ в платиновом контакте толщиной 35 нм энергетические потери составляют 5.1%, а в контакте 5 нм энергетические потери уменьшаются до 1.5%.

Для α -частиц (50 кэВ) в золотом контакте (35 нм) теряется 15.4% энергии, а в 10-нм контакте энергетические потери составляют 4.4%. При энергии α -частиц 150 кэВ энергетические потери составляют: 8.9% (35 нм), 2.5% (10 нм).

Из полученных результатов следует очевидный вывод, что с уменьшением толщины лицевого контакта уменьшаются энергетические потери частиц и снижается погрешность измерений.

Для проведения испытаний алмазных детекторов с различными толщинами лицевого контакта использовался α -источник ^{226}Ra с энергиями α -линий: 4.78 МэВ (94.6%), 5.49 МэВ (99.9%), 6.00 МэВ (100%), 7.69 МэВ (100%). Результат измерения фиксировался в виде гистограмм амплитудного спектрального отклика детектора на поток излучения с помощью анализатора импульсов (рис. 5).

В ходе проведения испытаний алмазных детекторов с различными толщинами лицевого контакта из различных (Al, Au, Pt) материалов выяснилось, что при всех значениях толщин лицевого контакта алмазный детектор сохраняет свою работоспособность. При сравнении спектров отклика алмазного детектора с тонким контактом (≥ 10 нм) с результатами алмазного детектора со стандартным исполнением контакта (35 нм) наблюдаются незначительные изменения амплитуды сигнала.

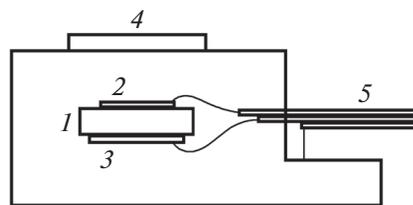


Рис. 6. Схема испытаний алмазного детектора. 1 – алмазный чувствительный элемент; 2 – лицевой контакт; 3 – задний контакт; 4 – α -источник ^{241}Am ; 5 – триаксиальный кабель.

В работе проведены испытания с целью определения чувствительности алмазных детекторов и определения спектрометрических характеристик для α -излучения.

При испытаниях измеряется спектр отклика детектора от излучения α -источника ^{241}Am .

Измерение спектров отклика алмазных детекторов на излучение α -источника выполнялось с помощью спектрометрической системы “Стенд нейтронной диагностики плазмы” в АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”. Результат измерения фиксировался в виде гистограмм амплитудного спектрального отклика детектора под облучением α -источника ^{241}Am с энергией α -линии: 5.49 МэВ (84.8%).

Альфа-источник устанавливался непосредственно на алмазный детектор на расстоянии 7 мм от чувствительного элемента в вакуумной камере. Схема измерения спектра отклика алмазных детекторов представлена на рис. 6. Проведены тестирования в вакуумной камере алмазного детектора в корпусе с высоковакуумным триаксиальным кабелем на α -источнике ^{241}Am . Экспериментально получено для алмазного детектора с одним кристаллом: положение α -пика – 825-й канал, полуширина линии – 13.3 канала (1.6%). Гистограмма амплитудного спектрального отклика представлена на рис. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определяющими свойствами алмаза для применения в качестве анализатора нейтральных частиц в ИТЭР является его предельная чувствительность при регистрации частиц и высокая радиационная стойкость. А.с.н.ч. будет предоставлять данные о спектрах нейтральных частиц с энергетическим порогом 50 кэВ для калибровки LENPA и HENPA ИТЭР.

Разработана конструкция корпусов алмазных детекторов и корпуса системы а.с.н.ч. с минимальным весом. Разработана технология приваривания тоководов к триаксиальному кабелю. Проведены тестирования в вакуумной камере алмазного детектора в корпусе с высоковакуумным

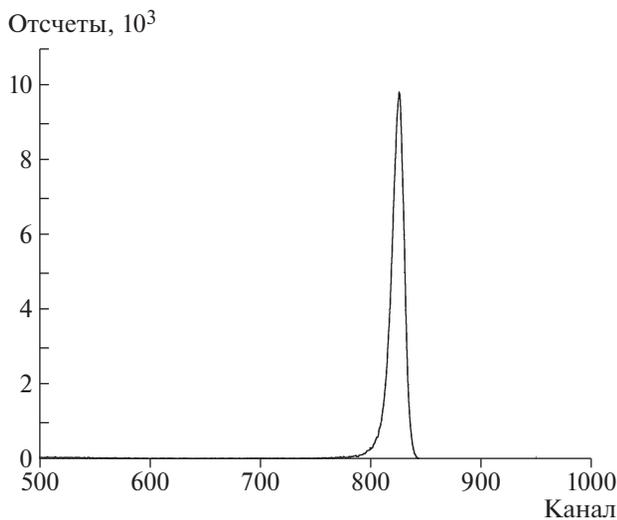


Рис. 7. Гистограмма амплитудного спектрального отклика детектора под облучением α -источника ^{241}Am .

триаксиальным кабелем на α -источнике ^{241}Am . Экспериментально получен амплитудный спектральный отклик детектора от α -источника ^{241}Am с полушириной линии 1.6%.

Работа проводилась в рамках контракта № Н.4а.241.9Б.17.1001 для частного учреждения "ИТЭР-Центр", посвященного разработке детекторов и систем вертикальной нейтронной камеры ИТЭР. Мнения, высказанные в данной статье, могут не совпадать с официальной позицией Организации ИТЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heibrink W.W., Sadler G. // Nuclear Fusion. 1994. V. 34. P. 535. doi 10.1088/0029-5515/34/4/107
2. Красильников В.А., Амосов В.Н., Коффей И., Поповичев С., Кашук Ю.А., Скопинцев Д.А., Мещанинов С.А., Немцев Г.Е. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2012. Вып. 4. С. 97.
3. Красильников В.А., Скопинцев Д.А., Амосов В.Н., Кашук Ю.А., Красильников А.В. // ПТЭ. 2008. № 4. С. 44.
4. Амосов В.Н., Красильников А.В., Скопинцев Д.А., Мещанинов С.А., Красильников В.А. // ПТЭ. 2008. № 2. С. 108.
5. Krasilnikov A.V., Azizov E.A., Roquemore A.L., Khrunov V.S., Young K.M. // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68. № 1. P. 553.
6. Van Eester D., Lerche E., Johnson T. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2009. V. 51. P. 044007.
7. Родионов Н.Б., Амосов В.Н., Артемьев К.К., Мещанинов С.А., Родионова В.П., Хмельницкий Р.А., Дравин В.А., Большаков А.П., Ральченко В.Г. // Атомная энергия. 2016. Т. 121. Вып. 2. С. 98.
8. Амосов В.Н., Родионов Н.Б., Дравин В.А., Артемьев К.К., Мещанинов С.А. // ПТЭ. 2017. № 1. С. 120. doi 10.7868/S0032816217010293
9. Pilotti R., Angelone M., Marinelli M., Milani E., Verona-Rinati G., Verona C., Prestopino G., Montekali R.M., Vinceti M.A., Schooneveld E.M., Scherillo A., Pietropaolo A. // EPL. 2016. V. 116. № 4. P. 42001. doi 10.1209/0295-5075/116/42001
10. Петров С.Я., Афанасьев В.И., Мельник А.Д., Мионов М.И., Наволоцкий А.С., Несеневич В.Г., Петров М.П., Чернышев Ф.В., Кедров И.В., Кузьмин Е.Г., Люблин Б.В., Козловский С.С., Мокеев А.Н. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2016. Т. 39. Вып. 1. С. 68.
11. Krasilnikov A.V., Kiptily V., Lerche E., Van Eester D., Afanasyev V.I., Giroud C., Goloborodko V., Hellesen C., Popovichev S.V., Mironov M.I. and JET contributors // Nuclear Fusion. 2018. V. 58. P. 026033. doi 10.1088/1741-4326/aa90c3