

Метрологическое обеспечение измерений плотности потока термоядерных нейтронов

С. Ю. ОБУДОВСКИЙ¹, А. В. БАТЮНИН¹, В. Д. СЕВАСТЬЯНОВ²,
В. А. ВОРОБЬЁВ¹, Ю. А. КАЩУК¹

¹ Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «РОСАТОМ» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия, e-mail: y.kashchuk@iterrf.ru
² Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г.п. (Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: sevast@vniiftri.ru

Описано оборудование стенда нейтронной диагностики плазмы. Приведены результаты аттестации моделирующих опорных полей нейтронов энергиями 2,5 и 14 МэВ.

Ключевые слова: нейтронное излучение, генератор, детектор, диагностика.

A stand with the equipment of neutronplasma diagnostics is described. The results of certification of simulating the supporting neutronfields with energies of 2,5 MeV and 14 MeV.

Key words: neutron radiation, generator, detector, diagnostics.

В рамках выполнения работ по созданию систем нейтронных диагностик для термоядерного экспериментального реактора ИТЭР [1] проведена модернизация стенда нейтронной диагностики плазмы в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»). Стенд предназначен для работы с нейтронными генераторами с выходом до 10^{11} нейтр./с, в нём используют следующие калибровочные источники ионизирующего излучения:

нейтронные генераторы непрерывного действия ИНГ-07Т ($E_n = 14$ МэВ, $\Phi = 10^9$ с⁻¹); ИНГ-07ДМ ($E_n = 2,5$ МэВ, $\Phi = 10^7$ с⁻¹); НГМ-17М ($E_n = 14$ МэВ, $\Phi = 10^{11}$ с⁻¹); импульсный нейтронный генератор ИНГ-031М ($f = 1...100$ Гц, $T_{имп} = (1$ мкс, $\Phi = 10^9$ имп⁻¹); изотопный источник быстрых нейтронов ИБН-241-5-1 ($\Phi = 2 \cdot 10^6$ с⁻¹; $A = 5 \cdot 10^{10}$ Бк); эталонные спектрометрические α - и γ -источники — наборы ОСАИ, ОСГИ и конверсионных электронов ($A = 10^5...10^6$ Бк).

Здесь E_n — энергия нейтронов; Φ — поток нейтронов; f , $T_{имп}$ — частота и длительность импульсов; A — активность источника.

В качестве измерительной аппаратуры применяют зарядочувствительные, токовые и широкополосные предварительные усилители; спектрометрические и радиометрические измерительные тракты (усилители-формирователи,

дискриминаторы, счётчики, амплитудно-цифровые преобразователи, амплитудные анализаторы, блоки питания). Чтобы исключить влияние электромагнитных наводок, возникающих при работе нейтронного генератора, на результаты измерений, сигналы от предварительных усилителей к регистрирующей аппаратуре передают по оптическим линиям связи. Метрологическое обеспечение нейтронных измерений на стенде основано на использовании моделирующих опорных полей (МОП) нейтронов энергиями 2,5 и 14 МэВ [2—4].

Моделирующее опорное поле нейтронов МОП 14 служит для определения чувствительности детекторов быстрых нейтронов к нейтронам энергией $E_n = 14$ МэВ. В качестве источника нейтронов применяют компактный нейтронный генератор ИНГ-07Т производства Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н. Л. Духова [5]. Генерацию нейтронов осуществляют с использованием реакции $T(d, n) {}^4\text{He}$. Радиометр-монитор нейтронного потока генератора ИНГ-07Т реализован на основе Si(Li)-детектора большого объёма 20 см³. В чувствительной области детектора регистрируются α -частицы и протоны, образующиеся в реакциях ${}^{28}\text{Si}(n, \alpha){}^{26}\text{Mg}$ и ${}^{28}\text{Si}(n, p){}^{28}\text{Al}$ под действием быстрых нейтронов. Нижний порог регистрации нейтронов составляет 6 МэВ и зависит от уровня дискриминации сигналов Si(Li)-детектора. Калибровку энергетической шкалы амплитудного спектра сигналов радиометра-монитора проводят по положению комптоновского края γ -излучения энергией $E_\gamma = 4,4$ МэВ от ${}^{241}\text{Am}$ —Ве радионуклидного источника быстрых нейтронов ИБН-241-5-1.

Аттестация моделирующего опорного поля генератора проведена во ФГУП «ВНИИФТРИ». Измерения характеристик поля нейтронов выполнены в пяти точках, в четырёх из них на расстояниях 50, 100 мм от тритиевой мишени генератора использовали наборы трековых детекторов, а на расстоянии 200 мм от мишени размещали активационный детектор — алюминиевое кольцо АК-2. Результаты последних измерений служили для непосредственного сравнения по реакции ${}^{27}\text{Al}(n, \alpha){}^{24}\text{Na}$ потоков эталонного источника нейтронов энергией 14,75 МэВ государственного эталона нейтронов ВНИИФТРИ [3] и генератора нейтронов МОП 14.

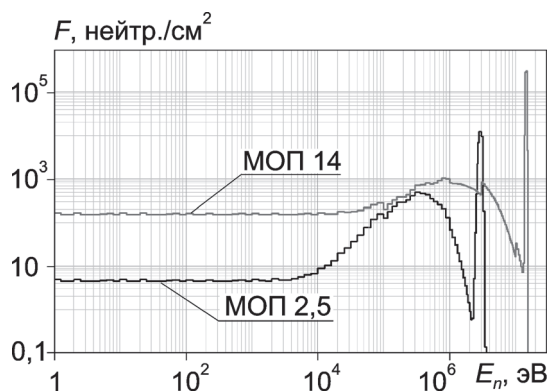


Рис. 1. Энергетические спектры нейтронов МОП 2,5 и МОП 14, полученные на стенде нейтронной диагностики плазмы

В качестве детекторов плотности потока нейтронов в местах проведения калибровочных измерений применяли наборы трековых делительных детекторов нейтронов (ТДДН) и активационных детекторов. Для определения спектра нейтронного потока использовали следующие ядерные реакции [6]:

$$^{103}\text{Rh}(n, n')^{103\text{m}}\text{Rh} \Rightarrow T_{1/2} = 56,119 \text{ мин}, 20\text{—}23 \text{ кэВ} (7,7 \ %);$$

$$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na} \Rightarrow T_{1/2} = 15,020 \text{ ч}, 1368 \text{ кэВ} (99,9 \ %);$$

$$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb} \Rightarrow T_{1/2} = 10,15 \text{ сут}, 934 \text{ кэВ} (99,2 \ %);$$

$$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co} \Rightarrow T_{1/2} = 70,86 \text{ сут}, 810,76 \text{ кэВ} (99,4 \ %);$$

$$^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni} \Rightarrow T_{1/2} = 35,60(6) \text{ ч}, 1377,6 \text{ кэВ} (81,7 \ %);$$

$$^{235}\text{U}(n, f) \text{ (ТДДН)}; ^{238}\text{U}(n, f) \text{ (ТДДН)}.$$

Количество реакций активации Q_a^i и деления Q_F^i в детекторах после их облучения нейтронами рассчитывали по формулам

$$Q_a^i = A_t^i t_0^i \left\{ N_{\text{я}}^i \left[1 - \exp(-\lambda^i t_0^i) \right] \exp(-\lambda^i t_{\text{в}}^i) \right\}^{-1};$$

$$Q_F^i = N_F^i (\varepsilon_F N_{\text{я}}^i)^{-1},$$

где A_t^i — активность i -го детектора на момент t ; t_0^i — эффективное время облучения i -го детектора нейтронами; $N_{\text{я}}^i$ — число ядер нуклида-мишени в i -м детекторе; λ^i — константа распада для продукта активации в i -м детекторе; $t_{\text{в}}^i$ — время выдержки детектора с момента окончания его облучения нейтронами до момента времени измерения его активности; N_F^i — число зарегистрированных актов в i -м делительном детекторе; ε_F — чувствительность регистрации актов деления в делительном детекторе, $\varepsilon_F = \varepsilon_0 [1 - d/(2R)]$ [7]; ε_0 — чувствительность регистрации осколков деления для системы делительный детектор с толщиной слоя делящегося вещества $d < 1 \text{ мкг/см}^2$ — регистратор из слюды мусковита ($\varepsilon_F = 0,915 \pm 0,005$); $d = 0,5 \text{ мг/см}^2$; R — средний пробег осколков деления в слое делящегося вещества в детекторе составляет порядка 10 мг/см^2 .

Обработка результатов измерений характеристик моделирующего опорного поля выполнена с использованием программного комплекса восстановления нейтронных спектров КАСКАД [8]. Энергетический спектр нейтронов МОП 14, восстановленный с помощью программы КАСКАД, показан на рис. 1. Плотность потока нейтронов в МОП 14 определяли на расстоянии 50 мм от тритий-титановой мишени генератора ИНГ-07Т в направлении пучка дейтронов, ускоренных до энергии 130 кэВ. Плотность потока нейтронов была нормирована на 1 отсчёт в секунду радиометра-мониторатора с Si(Li)-детектором, коэффициент нормировки равен $1,46 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При соблюдении условий, регламентированных правилами хранения и применения радиометра-мониторатора, воспроизведение плотности потока нейтронов обеспечивается с допустимым отклонением не более 5 % при доверительной вероятности 0,95.

Моделирующее опорное поле нейтронов МОП 2,5 предназначено для определения чувствительности детекторов к

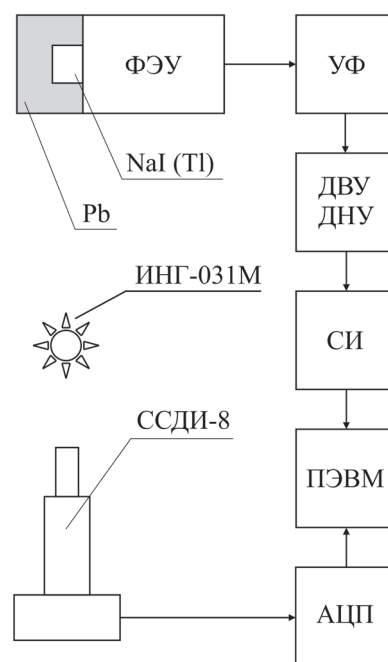


Рис. 2. Структурная схема системы измерений полного потока нейтронов импульсного генератора с тритий-титановой мишенью: Pb — свинцовый блок и блок детектирования БДЭГ-23 с кристаллом NaI(Tl); ФЭУ — фотоэлектронный умножитель; УФ — усилитель-формирователь; ДНУ, ДВУ — дискриминаторы нижнего и верхнего уровней; СИ — счётчик импульсов; ПЭВМ — компьютер; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ССДИ-8 — сцинтилляционный детектор

быстрым нейтронам в диапазоне энергии менее 3 МэВ. В качестве источника нейтронов использован компактный нейтронный генератор ИНГ-07ДМ, также изготовленный в ВНИИА им. Л. Н. Духова [5]. Генерация нейтронов происходит по реакции $D(d, n)^3\text{He}$. Чувствительным элементом радиометра-мониторатора генератора ИНГ-07ДМ является пороговая камера деления с радиатором ^{238}U (99,9994 %). Контроль стабильности и настройку радиометра выполняют с помощью радионуклидного источника ИБН-241-5-1 в фиксированной геометрии.

Моделирующее опорное поле генератора аттестовано во ВНИИФТРИ. Калибровка поля проведена в точке на расстоянии 50 мм от мишени генератора под углом 0° к направлению пучка дейтронов. В качестве детекторов плотности потока нейтронов использовали набор ТДДН по реакциям $^{237}\text{Np}(n, f)$, $^{238}\text{U}(n, f)$, $^{235}\text{U}(n, f)$. Для обработки результатов измерений характеристик моделирующего опорного поля применили программный комплекс восстановления нейтронных спектров КАСКАД. Энергетический спектр нейтронов МОП 2,5, восстановленный программой КАСКАД, показан на рис. 1. Плотность потока нейтронов в МОП 2,5 на расстоянии 50 мм от дейтерий-титановой мишени, нормированная на 1 отсчёт в секунду радиометра-мониторатора, составила $5,59 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При соблюдении условий, регламентированных правилами хранения и применения радиометра-мониторатора, обеспечивается воспроизведение плотности потока нейтронов с допустимым отклонением не более 5 % при доверительной вероятности 0,95.

Импульсный нейтронный генератор ИНГ-31М служит для исследования характеристик нейтронных детекторов в импульсных полях быстрых нейтронов. Генерация нейтронов

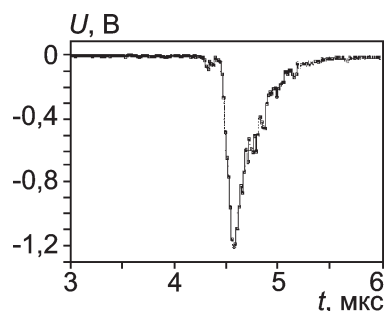


Рис. 3. Токовый сигнал детектора ССДИ-8 (ослабление 30 дБ)

онного потока: активационный в режиме однократных импульсов и сцинтилляционный в частотном режиме.

В качестве радиометра-монитора в режиме однократных импульсов использовали активационный детектор, состоящий из спектрометрического блока детектирования БДЭГ 2-23 с сцинтилляционным кристаллом NaI (Tl), окруженного слоем свинца толщиной 5 см. Блок детектирования регистрирует γ -излучение возбужденного состояния ядер ^{207}Pb , образующихся в результате реакций $^{207}\text{Pb}(n, n')^{207m}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}(n, 2n)^{207m}\text{Pb}$ (содержание изотопов свинца в природном материале 22,6 и 52,3%, соответственно). Период полураспада возбужденного состояния свинца ^{207m}Pb составляет 0,8 с; энергия и выход γ -излучения при радиоактивном распаде соответственно 569,7 кэВ (98%) и 1,0636 МэВ (90%).

Градуировку энергетической шкалы спектрометра с блоком детектирования БДЭГ 2-23 проводят с помощью радионуклидных источников из набора ОСГИ. Калибровку радиометра-монитора можно выполнять с использованием набора ТДДН и активационных детекторов, аналогичных набору ИНГ-07Т, примененному при калибровке МОП 14.

Радиометром-монитором генератора при работе в частотном режиме служит сцинтилляционный детектор ССДИ-8, состоящий из высокоточного ФЭУ и быстрого пластического сцинтиллятора. Калибровку радиометра-монитора проводили по показаниям радиометра-монитора однократных импульсов. Структурная схема измерений интенсивности импульсного нейтронного генератора ИНГ-31М приведена на рис. 2.

На рис. 3 показана форма токового сигнала детектора ССДИ-8. Интеграл токового сигнала пропорционален пол-

осуществляется из реакции $T(d, n)^4\text{He}$. Нейтронный выход генератора до 10^{11} нейтр./с, длительность импульсов излучения 0,01 мкс — 10 мс, частоты их повторения от одиночных до 10 кГц. Для работы импульсного нейтронного генератора ИНГ-31М [5] применяют два типа радиометров-мониторов ней-

ному выходу нейтронов в импульсе. Кривая уменьшения скорости счёта v_γ импульсов наведённой активности свинца, окружающего радиометр-монитор с БДЭГ 2-23, представлена на рис. 4, где отмечены тренды 1, 2 — соответственно периоды полураспада быстрого ^{207m}Pb (0,8 с) и медленного $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ (7,0 с) компонентов.

Нейтронный генератор непрерывного действия НГМ-17М предназначен для исследования характеристик нейтронных детекторов в полях быстрых нейтронов с плотностью потока до 10^9 (см $^{-2}$ ·с $^{-1}$) [9]. Нейтроны образуются в результате реакций $T(d, n)^4\text{He}$ или $D(d, n)^3\text{He}$ в зависимости от типа используемой трубки. В качестве радиометра-монитора применяется камера деления с радиатором ^{238}U (99,9994 %). Контроль стабильности и настройка радиометра-монитора выполняется с помощью радионуклидного источника ИБН-241-5-1 в фиксированной геометрии.

Закключение. Проведена модернизация экспериментального стенда для испытаний нейтронных детекторов и регистрирующей аппаратуры в потоках термоядерных нейтронов. Аттестованы моделирующие опорные поля нейтронов энергией 2,5 и 14 МэВ. Разработаны методики измерений чувствительности нейтронных детекторов к термоядерным нейтронам в стационарных и импульсных полях. Созданный аппаратный комплекс стенда обеспечивает испытания диагностических систем для различных ядерно-физических установок.

Работа выполнена в рамках государственного контракта ГКН.4к.52.9Б.14.1002 от 31.12.2013 г. по созданию систем нейтронных диагностик для экспериментального термоядерного реактора ИТЭР.

Л и т е р а т у р а

1. **Международный проект ИТЭР.** [Официальный сайт] <http://www.iter.org>
2. **ГОСТ 8.105—80. ГСИ.** Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений плотности потока и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках.
3. **Васильев Р. Д., Ярына В. П., Севастьянов В. Д.** Государственный специальный эталон единицы плотности потока нейтронов для области измерений на ядерно-физических установках // Измерительная техника. 1974. № 7. С. 10—14.
4. **Севастьянов В. Д.** Моделирующие опорные поля нейтронов в государственной системе обеспечения единства измерений на ядерно-физических установках РФ // Альманах № 2: Изд-во ВНИИФТРИ, 2015. С. 207—222.
5. **ВНИИА им. Н. Л. Духова** [Официальный сайт] <http://www.vniia.ru>
6. **Севастьянов В. Д., Кошелев А. С.** Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов КАСКАД 200(176) / Методика ГСССД МР 182—2011 (Аттестат № 182 от 03.05.2011). М., 2011. Деп. в СТАНДАРТИНФОРМ 03.05.2011 г., № 878а — 2011 кк.
7. **White P. H.** Alpha and fission counting of thin foils of fissile material // Nucl. Instrum. Meth. 1970. V. 79. N. 1. P. 1—12.
8. **Маслов Г. Н., Севастьянов В. Д., Кошелев А. С.** Метод расчёта спектров нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами, реализованный в новой версии программы КАСКАД // Измерительная техника. 2003. № 5. С. 58—62.
9. **Кирьянов Г. И.** Генераторы быстрых нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 186.

Дата принятия 06.04.2015 г.

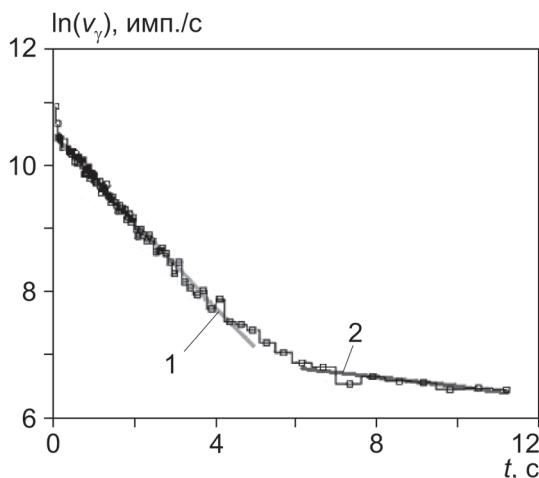


Рис. 4. Зависимость логарифма скорости счёта блока детектирования БДЭГ 2-23 от времени измерения