

3. Szady A. Enrichment of chromium isotopes by gas centrifugation. — Ibid, p. 277—280.
4. Ratz E., Coester E., de Jong P. e.a. Production of stable isotopes by gas centrifuge. — In: Intern. Symp. Synthesis and Applications of Isotopes and Isotopically Labelled Compounds. Toronto, Canada, Sept. 3—7 1991.
5. Борисевич В.Д., Левин Е.В., Наумочкин В.В. Численное исследование вторичных течений вязкого газа во вращающемся цилиндре при наличии источников и стоков. — Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа, 1989, № 4, с. 39—44.
6. Борисевич В.Д., Левин Е.В., Наумочкин В.В. Оптимальная структура течения в газовой центрифуге для разделения изотопов урана. — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 1, с. 28—32.
7. Kai T. Theoretical analysis of ternary UF_6 gas isotope separation by centrifuge. — J. Nucl. Sci. Technol., 1983, v. 20, № 6, p. 491—502.
8. Айсен Э.М., Борисевич В.Д., Левин Е.В. Течение и разделение в газовой центрифуге с организацией циркуляции по схеме Бимса. — Атомная энергия, 1992, т. 72, вып. 1, с. 44—47.
9. Olander D. Technical basis of the gas centrifuge. — Adv. Nucl. Sci. Technol., 1972, v. 6, p. 105—173.
10. Борисевич В.Д., Грибков М.В., Лагунцов Н.И. и др. Об оптимальной координате ввода питания в разделительных устройствах колонного типа. — Инж.-физ. журнал, 1988, т. 55, № 3, с. 471—476.
11. Halle E. Remarks on the Axial Flow Taper in Countercurrent Gas Centrifuge. KOA-5590, 1983.

Поступила в Редакцию 12.05.94

УДК 539.1.074.8+621.387.426

ЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО СПЕКТРА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ

Пепельшев Ю.Н., Чуляев С.В. (ВНИИТФА), Тулаев А.Б., Бобраков В.Ф. (ОИЯИ)

В настоящей статье изложены принцип построения системы на основе газонаполненной ионизационной камеры деления и персонального компьютера IBM PC, предназначенной для проведения эффективных исследовательских работ с источниками нейтронов на базе ИБР-2 [1], и ускорителей протонов LANSCE [2], ISIS [3]. Приведены результаты измерения времяпролетного спектра тепловых нейтронов водяного и криогенного метанового замедлителей в ИБР-2.

Метод измерения. Времяпролетный спектр тепловых нейтронов $M_L(t)$, выходящих с поверхности замедлителя, в каждый момент времени t связан с электрическим током $1/\nu$ -детектора $I_c(t)$, компенсированного по собственному фоновому току, току сопутствующего γ -излучения, быстрых нейтронов и нейтронов энергией выше кадмиевой границы, соотношением

$$W_\theta * G_M * G_D * G_E * M_L(t) = I_c(t) / (\eta_{th} Q),$$

где W_θ — временная зависимость потока быстрых нейтронов в импульсе мощности; G_M , G_D , G_E — импульсные характеристики замедлителя, детектора и измерительной аппаратуры соответственно; $I_c(t) = I(t) - I_{fb} - I_E$; I — ток во внешней цепи системы; $I_{fb} = {}^1I_{fb} + {}^2I_{fb}$ — ток детектора от фонового излучения тепловых нейтронов; ${}^1I_{fb}$, ${}^2I_{fb}$ — постоянная и импульсная составляющие I_{fb} соответственно; I_E — ток шумов измерительной аппаратуры; η_{th} — чувствительность детектора к тепловым нейтронам; Q — средний заряд, образующийся во внешней цепи на одну реакцию нейтрона в чувствительном объеме детектора; * — оператор свертки. Если выполняется условие

$$t_0^2/2 \gg \tau_\theta^2 + \tau_M^2 + \frac{a}{6} T_+^2 + \Delta t^2, \quad (1)$$

где t_0 — время пролета нейтронов скоростью $v_0 = \sqrt{2kT/m_n}$ расстояния L между источником и детектором; k — постоянная Больцмана; T — температура нейтронов; m_n — масса нейтрона; τ_θ — длительность импульса мощности на половине максимального значения; τ_M — константа спада основной гармоники плотности потока тепловых нейтронов в замедлителе; $a = 1/2$; T_+ — время собирания положительных ионов в чувствительном объеме газонаполненной камеры; Δt — период дискретизации по времени, то спектр $M_L(t)$ можно выразить в явном виде

$$M_L(t) = I_c(t)/(\eta_{th}Q).$$

Значение $t_0 = L/v_0$, при котором выполняется условие (1), в основном определяется τ_θ и τ_M . Для образца водяного замедлителя температурой 300 К, установленного в ИБР-2, $t_0 \gg 200$ мкс.

Погрешность измерения обусловлена, главным образом, флуктуациями тока тепловых нейтронов, собственного фонового тока детектора I_α , который в камере деления связан с α -активностью нуклида, шумами измерительного тракта и шумами, возникающими при преобразовании аналогового сигнала в цифровой код. Суммарная дисперсия статистических шумов измеряемого тока оценивается соотношением

$$\sigma_\Sigma^2/I^2 \approx 4\Delta f Q/(Im) [1 + Q_\alpha I_\alpha/(QI) + \nu^2/(QI)] + (0,29I_m/G_E 2^n I)^2,$$

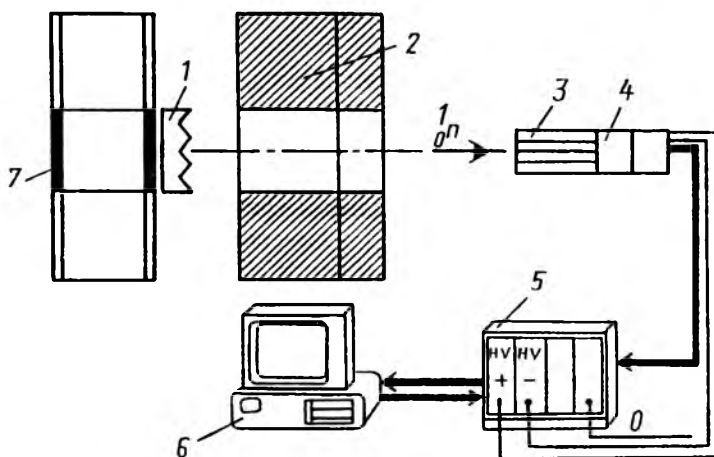
где Δf — полоса пропускания аналогового фильтра, установленного в цепи измерительной электроники; m — число усреднений; n — разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП); Q_α — заряд, протекающий в чувствительном объеме камеры деления на одну α -частицу; I_m — максимальный ток камеры; ν^2 — интенсивность флуктуационной помехи измерительного тракта. При включении оптимальной фильтрации и усреднения в одночасовом измерении спектра тепловых нейтронов, выходящих из замедлителя ИБР-2, который работает с частотой повторения вспышек мощности 5 с^{-1} , относительная среднеквадратичная погрешность уменьшается в 500 раз. Шумы дискретизации в режиме работы электронной аппаратуры с переменным коэффициентом усиления не превышают 1%.

Детерминированная погрешность восстановления спектра тепловых нейтронов в основном обусловлена неопределенностью в зависимости η_{th} от λ , которая для камеры деления с электродами, изготовленными в виде набора из N плоскопараллельных пластин толщиной d , расположенных одна за другой и ориентированных перпендикулярно коллимированному пучку, рассчитывается по формуле

$$\eta_{th} = S_0 \exp(-C) [1 - \exp(-a_u)] [1 - \exp(-bN)] / [\exp(b) - 1],$$

где $a_u = \Sigma_u X$; $b = a_u + a_F$; $a_F = \Sigma_F d$; Σ_u , Σ_F — макроскопическое сечение взаимодействия нейтронов с делящимся материалом и сечение поглощения в материале пластин соответственно; X , S_0 — толщина слоя делящегося материала на поверхности пластин и площадь пластины соответственно. Коэффициент C учитывает ослабление потока нейтронов в стенке камеры.

Характеристика аппаратного и программного обеспечения системы. Структурная схема системы измерения показана на рис. 1. Первичный преобразователь — скомпенсированная по току фонового излучения газонаполненная ионизационная камера деления КНК-21А с ^{235}U [4]. Коэффициент компенсации собственного фонового тока и тока сопутствующего γ -излучения около 70, коэффициент компенсации быстрых



Р и с. 1. Схема системы измерения спектра тепловых нейтронов: 1 — замедлитель; 2 — радиационная защита; 3 — коллиматор; 4 — ионизационная камера деления; 5 — электронный блок; 6 — персональный компьютер; 7 — активная зона реактора

нейтронов и нейтронов энергией выше кадмиевой границы не менее 4. Камеру с цилиндрическим кадмиевым коллиматором размещали в канале за радиационной защитой на расстоянии 5,55 м от поверхности замедлителя. Апертурный угол коллиматора подобрали таким, чтобы он охватывал всю видимую сквозь канал поверхность замедлителя. Ток, вырабатываемый первичным преобразователем под воздействием тепловых нейтронов, которые распространяются с поверхности замедлителя, поступал в электронный блок, синхронизированный сигналом «старт» с системой управления ИБР-2. Массив значений записывался в оперативную память компьютера, в конце измерения — на диск для детальной обработки.

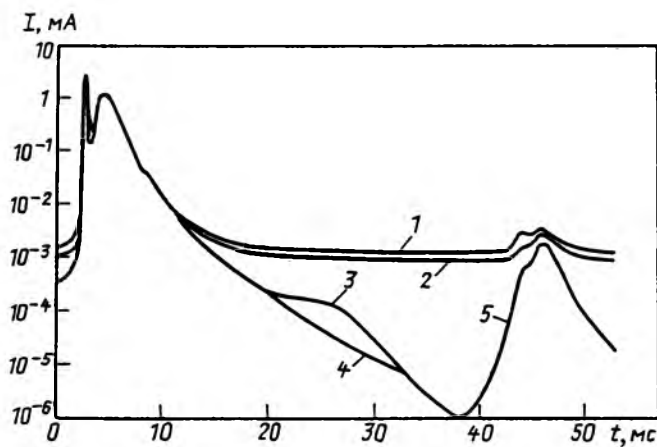
Электронная часть системы состоит из входного модуля, модуля ввода-вывода и персонального компьютера IBM PC. Входной модуль предназначен для преобразования токового сигнала в напряжение, усиления, фильтрации, подавления синфазных помех и согласования сигнала «старт» со входом модуля аналогового ввода. Входная чувствительность модуля 2 нА, динамический диапазон 120 дБ, число ступеней коэффициента преобразования и усиления 4 и 64 соответственно, частота среза фильтра нижних частот 4 кГц. Модуль изготовлен в стандарте CAMAC. При этом магистраль CAMAC не используется. Модуль ввода-вывода преобразует измеряемый сигнал в цифровой код, вводит его в компьютер и управляет входным модулем. Входных каналов модуля 8, разрядов АЦП с режимом работы от 0 до 10 В, от -5 до +5 В 10, время преобразования АЦП менее 30 мкс, режим считывания — программный и DMA. Модуль изготовлен в стандарте IBM PC/XT/AT [5] и установлен в один из разъемов расширения системного блока персонального компьютера.

Программное обеспечение построено по принципу разветвленного меню, работающего под MS DOS, и состоит из измерительной и обрабатывающей программ. Измерительная программа реализована на языке Turbo Pascal и включает в себя комплекс процедур нижнего уровня, работающих с электронной аппаратурой и организующих измерение и накопление данных. Программа позволяет автоматически включать или отключать фильтр нижних частот, оптимально устанавливать период дискретизации АЦП от 30 мкс до 35 мс, период и число отсчетов в одном измерении, диапазон входного сигнала до 2, 20, 200 или 2000 мкА, число циклов измерения, в том числе с усреднением, нормировкой и графической визуализацией данных, записью в конфигурационный файл для последующего восстановления результатов и условий измерения. При этом программа предусматривает возможность оптимального выбора и автоматического переключения коэффициента усиления по ступеням от 1 до 64 в каждом диапазоне.

Обрабатывающая программа реализована на языке Фортран-77 и включает процедуры обработки результатов измерения. Конечным результатом обработки данных по описанному в методике алгоритму является распределение плотности потока тепловых нейтронов по длине волны λ и аппроксимация его распределением Максвелла.

Измерительная и обрабатывающая программы взаимодействуют на уровне файлов данных.

Результаты измерения. На рис. 2 показаны временные зависимости электрического тока камеры, которые усреднены за 1 ч измерения потока тепловых нейтронов, выходящего с поверхности водяного замедлителя в ИБР-2. Видно, что включение компенсационной секции в несколько раз снижает вклад сопутствующего γ -излучения и фонового излучения быстрых нейтронов и нейтронов энергией выше кадмиевой границы в электрический ток от тепловых нейтронов в сопряженной с коллиматором секции камеры. Здесь же показана временная зависимость тока, полученная после вычитания постоянной составляющей фонового излучения тепловых нейтронов $^1I_{\text{тб}}$ между соседними вспышками мощности. Импульсную составляющую $^2I_{\text{тб}}$,



Р и с. 2. Усредненные за 1 ч измерения временные зависимости электрического тока в сопряженной с коллиматором секции камеры (1), тока камеры (2), компенсированной по вкладу фонового излучения и нейтронов энергией выше кадмиевой границы, тока тепловых нейтронов, выходящих с поверхности водяного замедлителя, после вычитания постоянного вклада (3), тока тепловых нейтронов во вспышке мощности (4) и тока тепловых нейтронов, возникающего при прохождении противовеса лопасти подвижного отражателя вблизи активной зоны (5), при средней мощности ИБР-2 2 МВт, частоте повторения вспышек мощности 5 с^{-1}

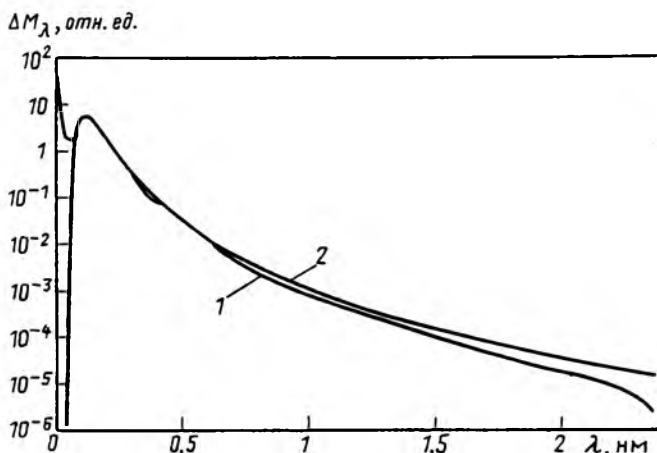


Рис. 3. Распределение плотности потока по длине волны тепловых нейтронов (1), выходящих из водяного замедлителя при средней мощности ИБР-2 2 МВт и частоте повторения вспышек мощности 5 с^{-1} , и Максвелла при $\lambda_0 = 0,177 \text{ нм}$ (2)

связанную с прохождением противовеса лопасти основного подвижного отражателя вблизи активной зоны, аппроксимировали распределением Гаусса. Вычитание $^2I_{\text{тб}}$ дает временную зависимость тока от тепловых нейтронов, выходящих с поверхности замедлителя во вспышке мощности ИБР-2, или времяпролетный спектр $M_L(t)$.

Плотность распределения тепловых нейтронов M_λ по λ аппроксимируется распределением Максвелла и при выполнении условия (1) связана с времяпролетным, измеренным $1/\nu$ -детектором, соотношением

$$M_\lambda(\lambda) = N_0 \lambda_0^3 / \lambda^4 \exp[-\lambda_0 / \lambda]^2 = N_0 M_L(t),$$

где N_0 — коэффициент, зависимый от условий измерения и

нормировки; λ_0 — длина волны нейтронов, распространяющихся с поверхности замедлителя со скоростью v_0 ; $t = m_n \lambda / h$; h — постоянная Планка. Результаты измерения спектра тепловых нейтронов, выходящих из водяного замедлителя, и аппроксимации его распределением Максвелла показаны на рис. 3. Расхождение кривых с увеличением длины волны частично обусловлено взаимодействием нейтронов с материалом оболочки замедлителя и воздухом на пролетной базе.

Таким образом, описанная система с токовой ионизационной камерой деления позволяет значительно повысить точность и сократить время измерения импульсных потоков тепловых нейтронов. При этом она определяет плотность распределения нейтронов, выходящих с поверхности замедлителя, по длине волны в импульсе мощности ИБР-2. Авторы надеются оптимизацией конструкции камеры деления повысить эффективность системы и увеличить точность измерения потока нейтронов с длиной волны до 3 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев В.Д., Архипов В.А., Бабаев А.И. и др. Энергетический пуск реактора ИБР-2 и первые исследования на его пучках. — Атомная энергия, 1984, т. 57, вып. 4, с. 227—234.
2. Rylla R. LANSCE'90. The manuel Lujan Jr. neutron scattering center. — In: Proc. 11th Meeting of Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources, v. 1, KEK, Tsukuba, Oct. 22—26, 1990, p. 32—39.
3. Broome T., Gounder I., Rees G. General abstracts of the ISIS upgrade. — Ibid., p. 134—139.
4. Чукляев С.В., Пепельшев Ю.Н. Ионизационная камера деления КНК-21А для измерения потока и температуры тепловых нейтронов в импульсных источниках. — См. наст. вып., с. 499—504.
5. Бобраков В.Ф., Тулаев А.Б. Модуль ввода-вывода аналоговой и цифровой информации для ПК типа IBM PC/XT/AT: Сообщение ОИЯИ, Р10-89751, 1989.

Поступила в Редакцию 6.12.93

УДК 539.1.074.8+621.387.426(088.8)

ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА ДЕЛЕНИЯ КНК-21А ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ

Чукляев С.В. (ВНИИТФА), Пепельшев Ю.Н. (ОИЯИ)

Повышение эффективности регистрации тепловых нейтронов, испускаемых импульсными источниками на основе ядерных реакторов или ускорителей заряженных частиц, по крайней мере в 10^4 раз влечет необходимость использования токового первичного преобразователя, обладающего временным разрешением выше 0,2 мс. При этом требуется снизить в несколько десятков раз вклад фонового тока сопутствующего излучения.

В настоящей статье описана конструкция газонаполненной ионизационной камеры деления, скомпенсированной по току собственного α -излучения и сопутствующего излучения фотонов, быстрых и надкадмиевых нейтронов. Приведена характеристика детектора и результаты измерения потока тепловых нейтронов, испускаемых водяным и криогенным метановым замедлителями в ИБР-2. Показано преимущество этой камеры при определении температуры нейтронов в импульсных источниках.

Устройство и характеристики камеры. КНК-21А состоит из размещенных в цилиндрическом корпусе из нержавеющей стали двух одинаковых секций, установленных одна за другой (рис. 1) [1]. Каждая секция содержит два электрода, собранных из 20 и 21 диска из нержавеющей стали диаметром 44, толщиной около 0,36 мм и закрепленных в отверстиях несущих стоек. Стойки изолированы от корпуса опорными изоляторами из высокоглиноземистой керамики, установленными в специальные гнезда во фланцах. Расстояние между соседними дисками разноименных электродов около