



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2007–21
ОРИ

А.В. Санников, В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая,
С.И. Купцов, М.М. Сухарев

МНОГОШАРОВОЙ СПЕКТРОМЕТР НЕЙТРОНОВ
НА ОСНОВЕ СЕРИЙНОГО ПРИБОРА РСУ-01

Направлено в *АНРИ*

Протвино 2007

Аннотация

Санников А.В., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н. и др. Многошаровой спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01: Препринт ИФВЭ 2007–21. – Протвино, 2007. – 12 с., 4 рис., 2 табл., библиогр.: 16.

Высокочувствительный многошаровой спектрометр нейтронов разработан на базе серийного прибора РСУ-01. Функции чувствительности спектрометра установлены на основе расчетов и сравнения с экспериментом. Измеренные в опорных полях нейтронов ИФВЭ спектры и интегральные дозиметрические характеристики сравниваются с данными, полученными ранее с помощью двух различных спектрометрических систем. Представлены основные физические характеристики нового спектрометра.

Abstract

Sannikov A.V., Peleshko V.N., Savitskaya E.N. et al. A Multisphere Neutron Spectrometer Based on the RSU-01 Serial Device: IHEP Preprint 2007–21. – Protvino, 2007. – p. 12, figs. 4, tables 2, refs.: 16.

A high sensitive multisphere neutron spectrometer has been developed on the basis of the RSU-01 serial device. Response functions of the spectrometer were established using calculations and comparison with experiment. The neutron energy spectra and integral dosimetric quantities measured in the IHEP neutron reference fields are compared with the data obtained earlier using two different spectrometric systems. The main physical characteristics of the new spectrometer are presented.

Введение

Методы спектрометрии нейтронного излучения широко используются в физике радиационной защиты и дозиметрии нейтронов. Необходимость их применения в дозиметрии обусловлена широким диапазоном энергий нейтронов за защитами ядерных установок и невозможностью измерения характеристик нейтронного излучения с требуемой точностью с помощью простых дозиметрических систем. В последние годы актуальность этих методов возросла в связи с введением новых норм и правил радиационной безопасности НРБ-99 [1] и ОСПОРБ-99 [2], а также широким внедрением на предприятиях Росатома новых индивидуальных дозиметров смешанного излучения ДВГН-01 [3] в составе автоматизированного комплекса индивидуального дозиметрического контроля АКИДК-301 [4].

Дозиметр обладает высокими дозиметрическими и эксплуатационными характеристиками, однако его энергетическая зависимость чувствительности (ЭЗЧ) к нейтронам не удовлетворяет нормативным требованиям [5,6]. Для определения поправочных коэффициентов на ЭЗЧ ДВГН-01 к нейтронам на рабочих местах персонала применяются различные методы [3,6,7], наиболее универсальным и точным среди которых является метод спектрометрии нейтронного излучения. В данной статье представлены методы реализации и характеристики высокочувствительного спектрометра Боннера СБ-PCY-01 на основе детектора тепловых нейтронов серийного прибора PCY-01 [8], размещаемого в шаровых полиэтиленовых замедлителях различных диаметров.

Оптимизация угловой зависимости чувствительности

Спектрометр Боннера СБ-PCY-01 разработан на основе блока детектирования нейтронов СБДН-01 радиометра-дозиметра PCY-01, имеющего рабочий диапазон измерений плотности потока тепловых нейтронов от 1 до 3000 см⁻² с⁻¹. Детектор размещается в центре полиэтиленовых шаров диаметром 3, 4, 5, 6, 8, 10 и 12 дюймов, покрытых кадмием толщиной 1 мм. На выступающую из шаров часть блока детектирования надевается кадмиевый чехол для исключения натекания тепловых нейтронов. Для измерения флюенса тепловых нейтронов используется также «голый» детектор нейтронов без кадмиевого чехла и в кадмиевом чехле.

В состав блока детектирования нейтронов СБДН-01 входит сцинтилляционный детектор нейтронов в виде тонкого диска диаметром около 25 мм, размещенный на фотокатоде ФЭУ. Детектор изготовлен из полиметилметакрилата с добавкой LiF, обогащенного изотопом ^6Li , и ZnS(Ag) . Нейтроны регистрируются по реакции $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ с последующим детектированием заряженных продуктов реакции сцинтиллятором ZnS .

При разработке спектрометра использован стандартный детектор РСУ-01 без применения дополнительного световода, снижающего чувствительность прибора. Связанное с этим наличие полости (ФЭУ и делитель) внутри шаров Боннера и форма самого детектора приводят к анизотропии чувствительности, различной для разных диаметров шаров и разных нейтронных спектров. Анизотропия чувствительности голого детектора в полях с большим вкладом тепловых нейтронов достигает коэффициента 3, при размещении детектора в центре полиэтиленовых шаров она значительно меньше и зависит от диаметра шара.

Проблема анизотропии чувствительности в этом случае решалась экспериментально путем поиска оптимального положения детектора относительно центра каждого шара с целью минимизации среднего отношения чувствительности при облучении под углом 0° (вдоль оси детектора и ФЭУ) и под углом 90° (перпендикулярно оси) в полях нейтронов различной жесткости. При этом использовались цилиндрические полиэтиленовые вставки различной толщины. В результате оптимизации максимальное отклонение отношения чувствительности $M(0^\circ)/M(90^\circ)$ от единицы составило менее 10% для всех шаров Боннера для спектров нейтронов опорных полей ИФВЭ [9,10].

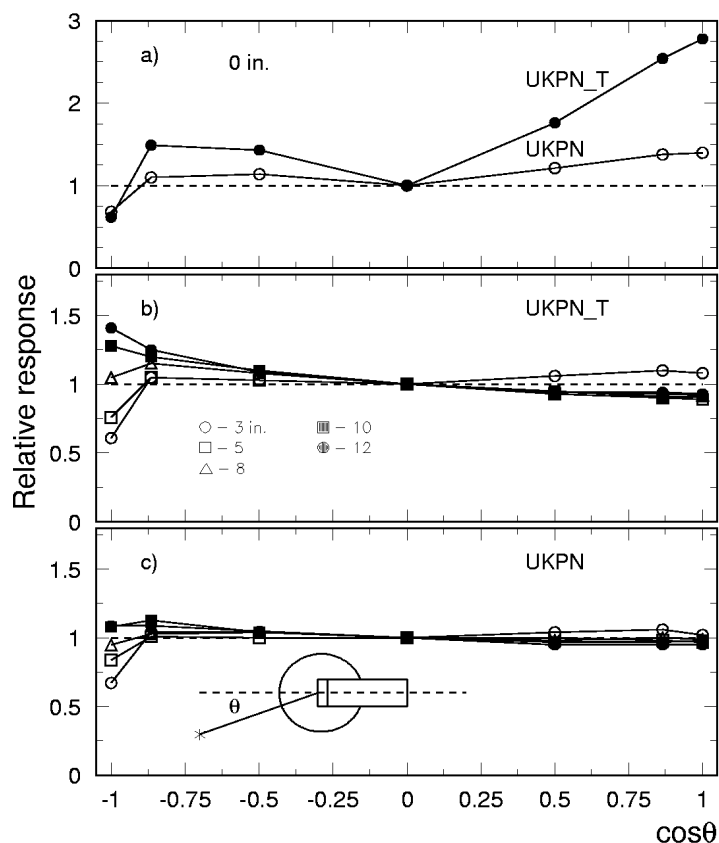


Рис. 1. Угловая зависимость чувствительности СБ-РСУ-01 в полях нейтронов поверочной установки УКПН-1М ($^{239}\text{Pu-Be}$) и УКПН-1М с тепловой насадкой (^{252}Cf): а) голый детектор; б) детектор в шарах диаметром 3, 5, 8, 10 и 12" в поле УКПН-1М с тепловой насадкой; в) то же, в поле УКПН-1М.

Угловая зависимость чувствительности СБ-РСУ-01 исследовалась в полях нейтронов на установке УКПН-1М с источником $^{239}\text{Pu-Be}$ и УКПН-1М с тепловой насадкой (^{252}Cf) [11]. Данная установка создавалась для проведения градуировки и поверки радиометров и дозиметров

нейтронов и характеризуется малым вкладом рассеянного излучения. Первое поле является жестким, средняя энергия спектра надкадмиевых нейтронов ($> 0,4$ эВ) составляет около 3 МэВ. Второе поле, напротив, мягкое, со средней энергией спектра около 0,6 МэВ и вкладом тепловых нейтронов во флюенс около 43%. Результаты измерений голым счетчиком и в шарах различных диаметров представлены на **рис.1** в зависимости от косинуса угла между осью симметрии блока детектирования и направлением детектор-источник. Данное представление позволяет визуально оценить вклад различных углов $\Delta\Omega = 2\pi \Delta \cos\vartheta$ в полный телесный угол 4π .

Анизотропия чувствительности голого счетчика в жестком поле нейтронов не превышает 40%, в мягком поле она достигает коэффициента 2,8. Эти различия объясняются преимущественной регистрацией во втором случае тепловых нейтронов, анизотропия чувствительности к которым оценивается приблизительно коэффициентом 3. При облучении детектора в шаровых замедлителях чувствительность постоянна в пределах 10% в широком диапазоне углов от 0° до 120° . Под углами близкими к 180° (облучение со стороны блока детектирования) анизотропия чувствительности возрастает до 40% в мягком поле за счет рассеяния и поглощения нейтронов на материалах корпуса счетчика, а также наличия полости.

Эти эффекты, приводящие к увеличению погрешности измерений, минимизируются при преимущественном облучении шаров Боннера со стороны боковой поверхности счетчика. Стандартная методика измерений состоит в том, что ось счетчика должна быть примерно перпендикулярна направлению на предполагаемый максимум интенсивности излучения, который обычно хорошо известен. Анизотропия проявляется только в малом телесном угле при углах близких к 180° . Так, например, вклад углов от 150° до 180° в полный телесный угол составляет менее 7%. Выполненные оценки показывают, что при выбранной геометрии измерений дополнительная неопределенность за счет анизотропии чувствительности не превышает 5% в худшем случае изотропного углового распределения излучения.

При измерениях флюенса тепловых нейтронов голым детектором СБДН-01 преимущественное облучение перпендикулярно оси счетчика также оказалось оптимальным. Так как направление максимума в этом случае не всегда известно, используется следующая схема. Проводятся измерения при ориентации оси счетчика в трех взаимно перпендикулярных направлениях и выбирается минимальный результат. В данном положении проводится также измерение детектором в кадмиевом чехле для вычитания вклада надкадмиевых нейтронов. В этом подходе получено хорошее согласие с результатами измерений [9,10] плотности потока тепловых нейтронов в опорных полях нейтронов ИФВЭ независимо как от углового распределения тепловых нейтронов (от направленного до изотропного), так и от их вклада в полный флюенс нейтронов (от 2,6% до 43%).

Энергетические зависимости чувствительности спектрометра

Расчеты энергетических зависимостей чувствительности спектрометра выполнены по программе FANEUT [12], широко использовавшейся в исследованиях функций чувствительности различных дозиметров и спектрометров [13], а также в недавнее время в расчетах ЭЗЧ индивидуального дозиметра ДВГН-01 к нейтронам [3]. Основной проблемой при решении задачи установления ЭЗЧ СБ-PCY-01 являлось отсутствие данных о характеристиках детектора, определяющих форму аппаратурного спектра в данном поле нейтронов, а также величину чувствительности при заданном пороге дискриминации.

Для моделирования реальных характеристик детектора (массовое содержание LiF и ZnS, дисперсность этих добавок и др.) проводились оптимизационные расчеты энергетических зависимостей чувствительности голого детектора и детектора в полиэтиленовых шарах для выполнения следующих условий:

- воспроизведения анизотропии чувствительности голого детектора в направленном поле с большим вкладом тепловых нейтронов (УКПН с тепловой насадкой);

- минимизации анизотропии чувствительности $M(0^\circ)/M(90^\circ)$ для различных шаров, достигнутой экспериментально;
- минимизации различий поправочных коэффициентов k_i для разных шаров i и разных спектров нейтронов опорных полей, определявшихся как отношение измеренных под углом 90° откликов M_i^{exp} и рассчитанных в результате свертки функций чувствительности $R_i^{cal}(E)$ с известными спектрами $\Phi(E)$:

$$k_i = M_i^{exp} / \int R_i^{cal}(E) \Phi(E) dE . \quad (1)$$

Опорные поля нейтронов ИФВЭ [9] были созданы в 1990 г. на основе радионуклидных источников $^{239}\text{Pu-Be}$ и ^{252}Cf . Их спектры и интегральные характеристики были измерены специалистами ФЭИ (Обнинск) и ИФВЭ с помощью двух спектрометров Боннера и сцинтилляционного спектрометра на основе монокристалла стибьена. При оптимизации ЭЗЧ СБ-PCY-01 использовались поля нейтронов от следующих источников: 1) $^{239}\text{Pu-Be}$; 2) ^{252}Cf ; 3) ^{252}Cf в стальном шаре диаметром 30 см; 4) ^{252}Cf в полиэтиленовом шаре диаметром 30 см. Эти поля реализованы в бетонном помещении размерами 5,4×17,8 м и высотой 4 м. Источник и точка измерения находятся на высоте 160 см от пола на расстоянии 75 см друг от друга. Кроме того, в качестве опорных полей применялись также жесткое и мягкое поля на установке УКПН-1М. Спектры шести полей были измерены в 2006 г. [10] с помощью спектрометра Боннера на основе индиевого активационного детектора и получено хорошее согласие с результатами предыдущих измерений.

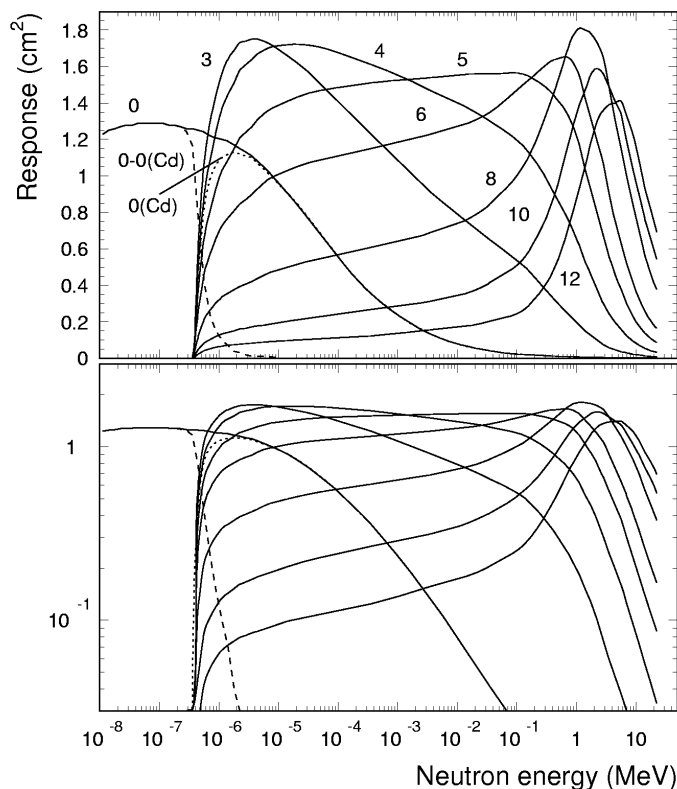


Рис. 2. Энергетические зависимости чувствительности спектрометра СБ-PCY-01 при облучении перпендикулярно оси счетчика. Цифры у кривых – диаметр шаров в дюймах.

Детектор в расчетах задавался в виде диска диаметром 25 мм и различной толщины для учета окружающих водородсодержащих материалов. Варьировалось также содержание ^6LiF

в детекторе и положение детектора относительно центра шаров Боннера. Другие материалы, кроме детектора, находящиеся в корпусе блока детектирования, в расчетах не учитывались и описывались воздушной полостью. Результаты расчетов подтвердили наблюдавшуюся в экспериментах большую зависимость чувствительности от положения детектора относительно центра замедлителя при облучении под углом 0° и слабую зависимость при облучении перпендикулярно оси счетчика.

Поправочные коэффициенты \bar{k}_i определялись на первом этапе как средние по различным спектрам нейтронов. Далее они уточнялись на основании результатов сравнения восстановленных спектров и интегральных характеристик опорных полей с литературными данными [9,10]. Оптимизированные функции чувствительности $R_i(E) = \bar{k}_i \cdot R_i^{cal}(E)$ для условий облучения под углом 90° с учетом поправочных коэффициентов \bar{k}_i , отличие которых от среднего значения для разных шаров, а также голого счетчика, составляет менее 15%, представлены на **рис. 2**. Эти функции чувствительности соответствуют режиму измерения плотности потока тепловых нейтронов (ППТН) на пульте прибора РСУ-01. В этом режиме проводились все измерения, результаты которых приведены в данной работе.

Методика восстановления нейтронных спектров

При восстановлении нейтронных спектров по показаниям СБ-РСУ-01 используется программа BON95 [13,14], основанная на методах параметризации и итераций. Программа реализует решение системы уравнений

$$M_i = \sum_{j=1}^n A_i(E_j) \Phi(E_j) + \Delta M_i, \quad i=1, \dots, m, \quad (2)$$

где M_i – показания детектора в различных шарах Боннера; ΔM_i – неопределенности, включающие погрешности результатов измерений и функций чувствительности $A_i(E_j) = \bar{R}_i(E_j) \Delta E_j$; $\Phi(E_j)$ – искомый спектр нейтронов в групповом представлении.

Эффективный метод параметризации применяется для поиска начального спектра, который уточняется далее с помощью итерационной процедуры метода направленного расхождения [15]. В стандартном варианте программы низкоэнергетические нейтронные спектры параметризуются линейной суперпозицией максвелловского пика тепловых нейтронов, E^{-b} – хвоста эпитепловых нейтронов, $1/E$ – хвоста промежуточных нейтронов и квазимакселловского пика быстрых нейтронов с изменяемой температурой и шириной:

$$E \Phi_p(E) = a_1 F_{th}(E) + a_2 F_{epi}(E) + a_3 F_{int}(E) + a_4 F_f(E), \quad \text{где} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_{th} = X_{th}^{3/2} e^{-X_{th}}, & X_{th} = E/T_{th} \\ F_{epi} = E^{-b} (1 - e^{-X_{th}}) e^{-X_f} \\ F_{int} = (1 - e^{-X_{th}}) e^{-X_f} \\ F_f = X_f^{3/2} e^{-X_f}, & X_f = (E/T_f)^c \end{cases} \quad (4)$$

Температура пика тепловых нейтронов выбрана равной $T_{th} = 0,035$ эВ, что соответствует спектрам за водородсодержащими защитами. Экспоненциальные факторы в выражениях для F_{epi} и F_{int} включены для подавления этих компонентов в областях тепловых и быстрых нейтронов.

Свободные параметры b , c и T_f , описывающие наклон эпитеплового хвоста, ширину и температуру пика быстрых нейтронов, меняются на заданной сетке шаг за шагом для поиска оптимального решения, удовлетворяющего условию:

$$\chi^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{M_i - M_i^p}{\Delta M_i^{exp}} \right)^2 = \min, \quad (5)$$

$$\text{где } M_i^p = \sum_{j=1}^n A_i(E_j) \Phi_p(E_j). \quad (6)$$

Значения коэффициентов a_k в уравнении (3) для каждой комбинации свободных параметров также находятся методом наименьших квадратов. Уравнение (5) благодаря линейризации спектров преобразуется в систему линейных уравнений относительно неизвестных a_k :

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^m (B_{ik} - C_{ik} a_k) = 0, \quad (7)$$

которая имеет единственное решение, так как компоненты параметризованного спектра линейно независимы.

Оптимальный спектр $\Phi_p(E_j)$, соответствующий минимуму χ^2 , используется далее в качестве начального спектра в итерационной процедуре с критерием окончания $\chi^2 < 1$. Было найдено, что алгоритм параметризации дает хорошее решение в большинстве случаев (обычно $\chi^2 < 1$, если экспериментальные ошибки не слишком малы) и итерационная процедура дает видимое улучшение лишь в некоторых случаях сложных спектров. Полученный спектр $\Phi_0(E_j)$ используется для расчета полных погрешностей ΔM_i :

$$\Delta M_i = \sqrt{(\Delta M_i^{exp})^2 + \left(\sum_{j=1}^n \Delta A_i(E_j) \Phi_0(E_j) \right)^2}. \quad (8)$$

Описанная процедура поиска спектра $\Phi_0(E_j)$ выполняется для N различных комбинаций показаний спектрометра: $M_i' = M_i + \xi \cdot \Delta M_i$, где ξ – случайное число с нормальным распределением. В результате мы получаем N различных нейтронных спектров (стандартное значение $N=25$), по которым определяются средние значения и неопределенности спектра и различных функционалов. Представленный выше стандартный алгоритм был несколько упрощен, т.к. в спектрометре СБ-PCY-01 используется небольшое число шаров Боннера. Компонент эпитепловых нейтронов исключен из параметризации (3,4). Расчеты показали, что для спектров, форма которых в промежуточной области отличается от $1/E$ -зависимости, поправка этих хвостов эффективно осуществляется итерационным алгоритмом.

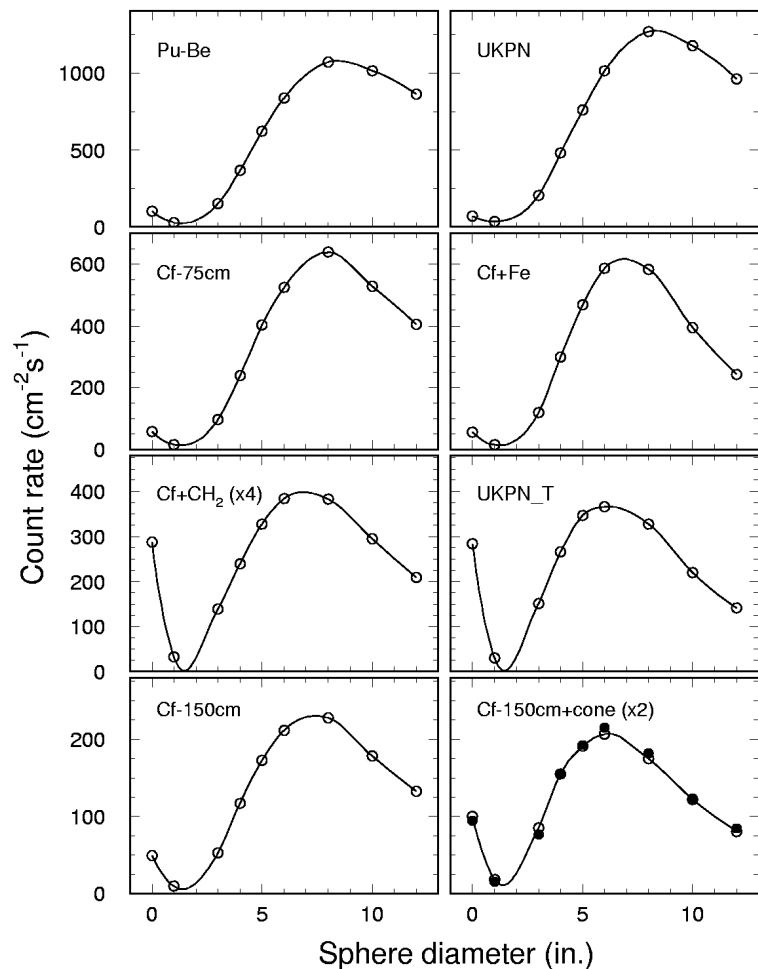
Основными отличительными особенностями программы BON95 от отечественных и зарубежных аналогов является оптимальное использование физической априорной информации о характерной форме нейтронных спектров и объективность получаемого решения, т.е. независимость от пользователя. Кроме экспериментальных данных с их погрешностями, во входном файле задается значение единственного параметра APRIN, который может принимать значение "LOW" (восстановление низкоэнергетического спектра с параметризацией (3,4)), "HIGH" (параметризация высокоэнергетического спектра с пиками испарительных и каскадных нейтронов [13,14]) или "SP0" (априорный спектр считывается из файла, параметризация не проводится). Все приведенные в работе спектры восстанавливались при значении APRIN="LOW".

Результаты измерений

Результаты измерений в шести опорных полях нейтронов в зависимости от диаметра шарового замедлителя приведены на **рис. 3**. Точки на диаметре 1 дюйм соответствуют голому детектору в кадмиевом чехле. При измерениях с каждым шаром результаты определялись как

среднее значение по трем экспозициям длительностью 30 с. Статистические ошибки (средне-квадратичные отклонения СКО) результатов измерений в режиме ППТН определялись по формуле $\Delta M_i^{exp} = 1,7 \cdot \sqrt{M_i} / t$ (t – время измерения в с), полученной из анализа экспериментальных данных. Они составляли обычно менее 3% и во всех случаях укладываются в размеры экспериментальных точек. Можно видеть, что экспериментальные данные для всех спектров хорошо описываются гладкими кривыми. Это свойство является характерной особенностью спектрометров Боннера, имеющих широкие перекрывающиеся функции чувствительности, и может служить для выявления систематических ошибок при измерениях, которые проявляются в виде нерегулярностей в зависимостях $M(d)$.

Рис. 3. Скорость счета СБ-РСУ-01 в зависимости от диаметра замедлителя в опорных полях ИФВЭ. Черные точки – вклад рассеянного излучения на расстоянии 150 см от ^{252}Cf , определенный по результатам измерений на 75 см и 150 см.



Для анализа характеристик рассеянного излучения и создания перспективных опорных полей были проведены также измерения на расстоянии 150 см от источника ^{252}Cf с рассеивающим конусом и без конуса. Эти данные приведены в нижней части **рис. 3**. Поле излучения за конусом характеризует собой рассеянное излучение от стен, пола и потолка помещения. Вклад этого компонента в показания детекторов можно оценить также по результатам измерений на расстояниях 75 см и 150 см от источника ^{252}Cf в предположении, что он одинаков:

$$\begin{cases} M_i^{150} = M_i^{np} + M_i^{pac} \\ M_i^{75} = 4M_i^{np} + M_i^{pac} \end{cases} \quad (9)$$

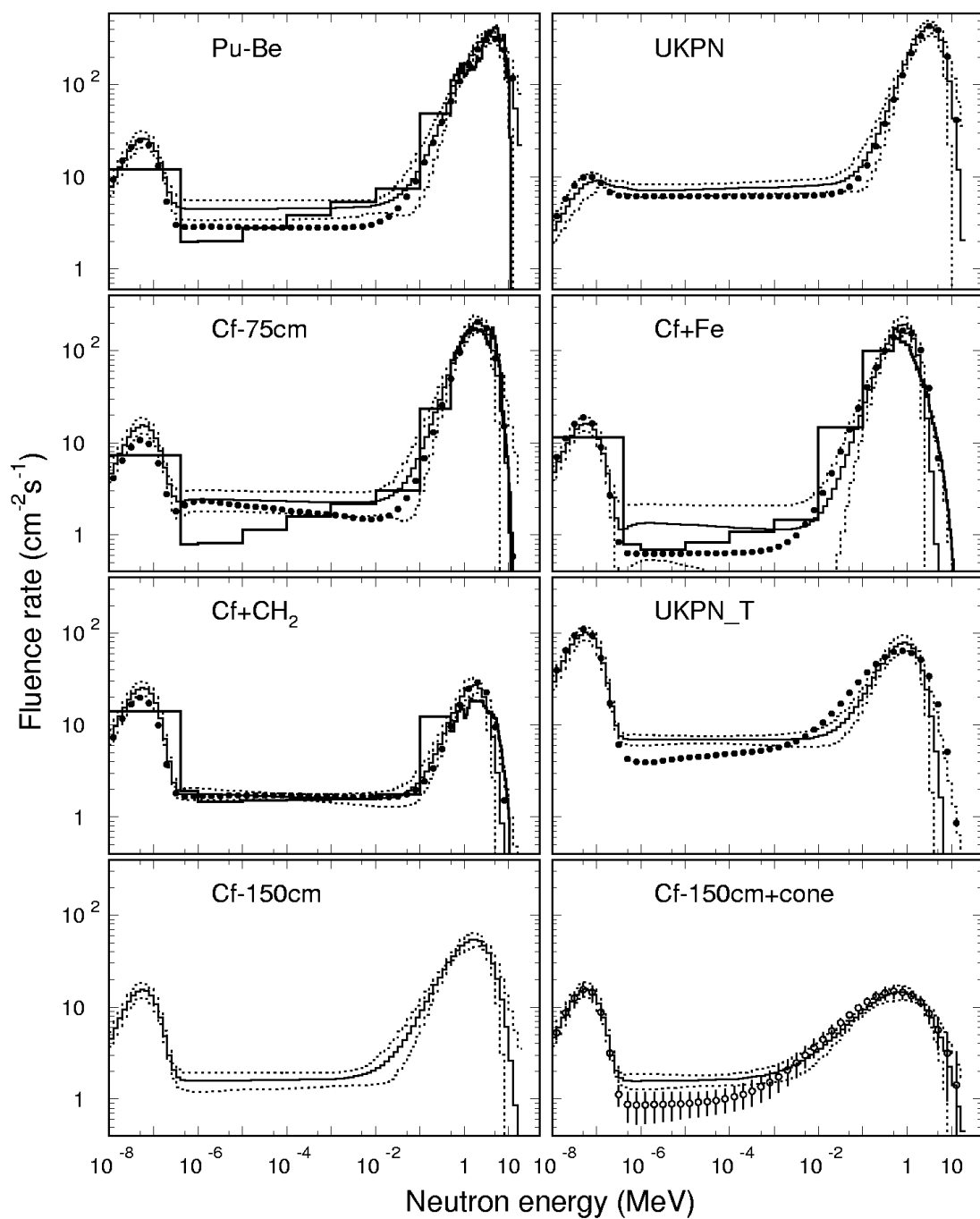


Рис. 4. Спектры нейтронов опорных полей ИФВЭ. Сплошные и пунктирные гистограммы – результаты измерений СБ-РСУ-01 с коридором неопределенностей. Жирные гистограммы – данные [9], точки – индиевый спектрометр Боннера [10]. Точки с погрешностями на нижнем правом рисунке – спектр рассеянного излучения на расстоянии 150 см от источника ^{252}Cf , восстановленный по результатам измерений на 75 см и 150 см (черные точки на рис. 3).

где M_i^{np} – вклад нерассеянного излучения в показания детекторов на расстоянии 150 см. Решение этой системы для рассеянного компонента имеет вид:

$$M_i^{\text{pac}} = (4M_i^{150} - M_i^{75}) / 3 . \quad (10)$$

Результаты расчета, показанные на рисунке черными точками, согласуются в пределах погрешностей с данными прямых измерений за конусом.

Результаты восстановления нейтронных спектров опорных полей ИФВЭ представлены на **рис. 4** в сравнении с данными измерений [9] с помощью сцинтилляционного спектрометра (выше 0,5 МэВ) и спектрометра Боннера, а также с данными [10] (индиевый спектрометр Боннера). Погрешности функций чувствительности (СКО) при восстановлении задавались равными 5%, за исключением голого детектора, для которого погрешности составляли 15% для учета дополнительной систематической неопределенности вследствие анизотропии.

Во всех случаях наблюдается хорошее согласие в области пиков тепловых и быстрых нейтронов, кроме энергетической группы 0,1-0,5 МэВ в спектре $^{252}\text{Cf} + \text{CH}_2$ из работы [9]. Анализ литературных данных по спектрам утечки нейтронов из полиэтилена не дает подтверждения нерегулярностей при этих энергиях, что свидетельствует в пользу наших результатов. Наибольшее расхождение имеет место в области промежуточных нейтронов для спектров с малым вкладом этого диапазона в полный флюенс (Pu-Be, Cf, Cf + Fe), однако оно находится обычно в пределах погрешностей измерений сравниваемых методик. Спектры рассеянного излучения на расстоянии 150 см от источника ^{252}Cf , измеренные разными методами, также согласуются друг с другом в пределах двух СКО.

В **табл. 1 и 2** приведены измеренные СБ-PCY-01 интегральные характеристики нейтронных спектров, такие, как плотности потока тепловых и надкадмиевых нейтронов, мощности амбиентного эквивалента дозы, удельные амбиентные эквиваленты дозы и средние энергии спектров. Для удобства последующего использования все данные приведены в абсолютных единицах к 20.03.07 г. Полный выход нейтронов в 4π на эту дату составлял $5,26 \cdot 10^7$ н/с для источника $^{239}\text{Pu-Be}$ и $2,30 \cdot 10^7$ н/с для ^{252}Cf . Результаты находятся в хорошем согласии с данными [9,10,16] в пределах погрешностей, в качестве которых также приведены значения СКО.

Таблица 1. Сравнение результатов измерений плотности потока тепловых и надкадмиевых (>0,4 эВ) нейтронов в опорных полях нейтронов ИФВЭ спектрометром СБ-PCY-01 с литературными данными [9,10,16].

| Опорное поле | $\dot{\Phi}_{th}$ (см ⁻² с ⁻¹) | | | $\dot{\Phi}_f$ (см ⁻² с ⁻¹) | | |
|---|---|-------------|-----------|--|-------------|------------|
| | СБ-PCY-01 | Лит. [9] | Лит. [10] | СБ-PCY-01 | Лит. [9] | Лит. [10] |
| $^{239}\text{Pu-Be}$ | 57,2 ± 7,4 | 44 ± 13 | 53 ± 5 | 843 ± 46 | 826 ± 53 | 817 ± 44 |
| УКПН | 25,5 ± 4,8 | | 27 ± 11 | 962 ± 49 | (978 ± 59)* | 971 ± 46 |
| $^{252}\text{Cf} - 75\text{см}$ | 33,4 ± 5,8 | 28 ± 8 | 24 ± 6 | 433 ± 19 | 414 ± 23 | 414 ± 17 |
| $^{252}\text{Cf} + \text{Fe}$ | 33,4 ± 5,7 | 42 ± 11 | 39 ± 9 | 392 ± 11 | 391 ± 23 | 410 ± 13 |
| $^{252}\text{Cf} + \text{CH}_2$ | 51,2 ± 8,6 | 52 ± 8 | 41 ± 13 | 76,0 ± 2,7 | 77,8 ± 4,4 | 79,4 ± 7,1 |
| УКПН_Т | 207 ± 34 | (204 ± 12)* | 222 ± 20 | 279 ± 8 | | 296 ± 8 |
| $^{252}\text{Cf} - 150\text{см}$ | 32,4 ± 5,6 | | | 169 ± 7 | | |
| $^{252}\text{Cf} - 150\text{см} + \text{K}$ | 33,0 ± 5,7 | | | 80,6 ± 2,8 | | |

* по данным свидетельства о поверке установки УКПН-1М от 18.01.07 г. [16].

Таблица 2. Сравнение результатов измерений мощности амбиентного эквивалента дозы, удельного амбиентного эквивалента дозы и средней энергии спектра надкадмиевых нейтронов в опорных полях нейтронов ИФВЭ спектрометром СБ-PCY-01 с литературными данными [9,10].

| Опорное поле | $\dot{H}^* (10)$ (мкЗв/ч) | | $h^* (10)$ (пЗв·см ²) | | \bar{E} (МэВ) | |
|-------------------------------------|---------------------------|------------|-----------------------------------|-----------|-----------------|----------|
| | СБ-PCY-01 | Лит. [10] | СБ-PCY-01 | Лит. [10] | СБ-PCY-01 | Лит. [9] |
| ²³⁹ Pu-Be | 1134 ± 71 | 1137 ± 72 | 350 ± 6 | 363 ± 7 | 3,56 ± 0,68 | 3,04 |
| УКПН | 1244 ± 69 | 1294 ± 70 | 350 ± 4 | 360 ± 6 | 2,81 ± 0,58 | |
| ²⁵² Cf -75см | 565 ± 20 | 558 ± 20 | 337 ± 8 | 354 ± 8 | 1,90 ± 0,39 | 1,90 |
| ²⁵² Cf +Fe | 444 ± 13 | 467 ± 18 | 290 ± 12 | 290 ± 10 | 0,77 ± 0,12 | 0,76 |
| ²⁵² Cf + CH ₂ | 77,5 ± 2,4 | 81,0 ± 4,9 | 168 ± 12 | 183 ± 16 | 1,16 ± 0,23 | 1,36 |
| УКПН_Г | 234 ± 8 | 251 ± 13 | 134 ± 11 | 135 ± 9 | 0,63 ± 0,13 | |
| ²⁵² Cf -150см | 193 ± 7 | | 265 ± 10 | | 1,61 ± 0,41 | |
| ²⁵² Cf -150см+К | 60,9 ± 2,1 | | 149 ± 9 | | 0,92 ± 0,28 | |

Линейка опорных полей ИФВЭ является достаточно представительной с точки зрения жесткости спектров (диапазон средних энергий от 0,63 до 3,56 МэВ), вклада во флюенс тепловых нейтронов (от 2,6% до 43%), углового распределения нейтронов (от коллимированных пучков на УКПН до чисто рассеянного излучения с квазиизотропным распределением) и т.д. Хорошее согласие полученных в этих полях с помощью СБ-PCY-01 результатов с данными других спектрометрических систем свидетельствует о надежности выбранной методики измерений, функций чувствительности спектрометра и программы восстановления нейтронных спектров.

Спектрометр показал свою работоспособность в диапазоне мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов от 1 мкЗв/ч до 1250 мкЗв/ч. Собственный фон детектора PCY-01 составляет менее 0,07 см⁻²с⁻¹ в режиме ППН. Он практически нечувствителен к фотонному излучению при установленном изготовителем пороге дискриминации. При измерениях спектров в полях с низкой мощностью дозы необходимо контролировать величину статистических погрешностей, которые не должны превышать 10%. Это достигается увеличением времени и/или числа экспозиций. В случае массовых измерений используется обычно более простой вариант спектрометра, без шаров диаметром 4" и 6". Результаты, полученные при восстановлении спектров опорных полей при этой конфигурации спектрометра, близки к данным **рис. 4** и **табл. 1** и **2**, за исключением несколько больших неопределенностей.

Заключение

Спектрометр СБ-PCY-01 разрабатывался первоначально в качестве рабочего средства оценки поправочных коэффициентов на ЭЗЧ ДВГН-01 к нейтронам на рабочих местах персонала с низкими мощностями дозы нейтронов. Примененные методы минимизации угловой зависимости чувствительности и оптимизации функций чувствительности, а также мощная программа восстановления нейтронных спектров позволили, однако, создать надежный физический инструмент для измерения характеристик нейтронного излучения с широким диапазоном применимости. В настоящее время с его помощью успешно измерено около 100 низкоэнергети-

ческих спектров на ускорительных комплексах ИФВЭ и ИТЭФ, а также трех комбинатах ядерного топливного цикла Росатома.

Авторы выражают благодарность С.А. Другаченку, В.Е. Косьяненко и М.О. Шмелеву за помощь в изготовлении спектрометра и проведении измерений.

Список литературы

- [1] *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)*. М.: Минздрав России, 1999.
- [2] *Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99)*. М.: Минздрав России, 2000.
- [3] А.В.Санников, В.Н.Лебедев, В.Н.Кустарев, Е.Н.Савицкая, Е.Г.Спилов. *Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01: разработка и исследование характеристик*. АНРИ №3, 50-59 (2005); препринт ИФВЭ 2005-6, Протвино, 2005.
- [4] *Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКИДК-301*. Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2001.
- [5] МУ 2.6.1.25 - 2000. *Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования*. Методические указания. ДБЧС МАЭ РФ, Федеральное управление «Медбиоэкстрем» Минздрава России, 2000.
- [6] МУ 2.6.1.45 - 2001. *Определение индивидуальных эффективных доз нейтронного излучения*. Методические указания. ДБЧС МАЭ РФ, Федеральное управление «Медбиоэкстрем» Минздрава России, 2001.
- [7] МУ 2.6.1. __-2007. *Обеспечение качества измерений при проведении индивидуального дозиметрического контроля внешнего облучения на предприятиях Росатома РФ*. Методические указания. Управление ядерной и радиационной безопасности Росатома, Федеральное управление «Медбиоэкстрем» Минздрава РФ, 2007.
- [8] *Радиометр-спектрометр универсальный РСУ-01 «Сигнал-М»*. Руководство по эксплуатации. АО Экспертцентр, 2002.
- [9] Г.И.Бритвич, В.С.Волков, Ю.И.Колеватов, А.К.Кременецкий, В.Н.Лебедев, В.Д.Майоров, Я.Н.Расцветалов, Л.А.Трыков, А.А.Чумаков. *Спектры и интегральные характеристики опорных полей нейтронов на базе радионуклидных источников нейтронного излучения*. Препринт ИФВЭ 90-48, Протвино, 1990.
- [10] Г.И.Крупный, Я.Н.Расцветалов, Е.Н.Савицкая, А.В.Санников. *Многошаровой спектрометр нейтронов с активационным детектором тепловых нейтронов на основе реакции $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116m}\text{In}$* . IX Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». Тезисы докладов, с. 121-123. 2006.
- [11] *Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки*. ГОСТ 8.355-79, Москва, 1979.
- [12] A.M.Biskupchuk, V.E.Borodin., V.T.Golovachik, E.P.Korshunova, V.N.Lebedev and A.V.Sannikov. *Interpretation of the Readings of Combined Albedo-Track Personnel Neutron Dosimeters in the Terms of Dose Equivalent*. Kernenergie **30**, 419-424 (1987); V.E.Borodin, V.T.Golovachik, E.P.Korshunova, V.N. Lebedev, A.V.Sannikov and E.G.Spirov. *Response of Albedo anf Fission Track Detectors to Neutrons in the Energy Range from Thermal to 20 MeV*. Kernenergie **31**, 267-273 (1988).
- [13] А.В.Санников. *Развитие методов спектрометрии нейтронного излучения на больших протонных ускорителях*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Протвино, 2006.
- [14] A.V.Sannikov. *BON95, a universal user-independent unfolding code for low informative neutron spectrometers*. GSF report. Munich, 1995.

- [15] М.З.Тараско. *Об одном методе решения линейных задач со стохастическими матрицами.* Препринт ФЭИ-156. Обнинск, 1969.
- [16] *Свидетельство о проверке установки поверочной нейтронного излучения УКПН-1М № 03-130700.* ФГУ Менделеевский ЦСМ. Менделеево, 2007.

Рукопись поступила 19 декабря 2007 г.

А.В. Санников, В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая и др.
Многошаровой спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01.

Редактор Л.Ф. Васильева.

| | | | |
|--------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Подписано к печати | 21.12.2007. | Формат 60 × 84/8. | Офсетная печать. |
| Печ.л. 1,5. | Уч.– изд.л. 1,2. | Тираж 80. | Заказ 132. |
| ЛР №020498 | от 17.04.97. | Индекс 3649. | |

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

