



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2018–11

В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая, А.В. Санников,
М.М. Сухарев, А.Г. Музоверов*

**Опорные поля нейтронов на основе
радионуклидного источника $^{239}\text{Pu-Be}$**

Направлено в АЭ

* ООО «Основа Лаб», Москва,
Спартакoвская пл., д. 14, стр. 2

Протвино 2018

Аннотация

Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Сухарев М.М., Музоверов А.Г. Опорные поля нейтронов на основе радионуклидного источника $^{239}\text{Pu-Be}$: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2018-11. – Протвино, 2018. – 15 с., 6 рис., 3 табл., библиогр.: 13.

Представлено описание новых опорных полей нейтронного излучения на основе радионуклидного источника $^{239}\text{Pu-Be}$, предназначенных для повышения точности измерений нейтронных дозиметров на ускорительном комплексе ИФВЭ. Спектры нейтронов опорных полей измерены спектрометром Боннера СБ-PCY-01. Восстановление спектров из результатов измерений проводилось по программе BON95, где начальные спектры для итерационной процедуры определялись методом параметризации или расчетом по программе FAN15. Получено хорошее согласие спектров нейтронов и интегральных характеристик опорных полей, рассчитанных двумя методами.

Abstract

Peleshko V.N., Savitskaya E.N, Sannikov A.V., Sukharev M.M., Muzoverov A.G. Neutron Reference Fields Based on the $^{239}\text{Pu-Be}$ Radionuclide Source: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2018-11 – Protvino, 2018. – p. 15, figs. 6, tables 3, refs.: 13.

A description of the new reference fields of neutron radiation on the basis of the $^{239}\text{Pu-Be}$ radionuclide source, intended to improve measurement accuracy of neutron dosimeters at the IHEP accelerator complex, is presented. Neutron spectra of the reference fields have been measured by the Bonner spectrometer SB-RSU-01. Unfolding of the spectra from measurement data was performed by the BON95 code, where initial spectra for the iteration procedure were defined by parametrization method or by FAN15 code calculation. A good agreement of the neutron spectra and integral characteristics of the reference fields, calculated by two methods, have been obtained.

Введение

Спектры нейтронов на ускорительном комплексе ИФВЭ варьируются в широком диапазоне энергий и значительно отличаются от спектра градуировочного источника. В связи с этим для дозиметрических и других применений создаются опорные поля нейтронного излучения, позволяющие расширить энергетический диапазон нейтронных спектров по сравнению с полями, применяемыми обычно для градуировки и поверки приборов и методик. В ИФВЭ такие поля были созданы более 25 лет назад [1] на основе радионуклидных источников $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ ИБН-27 № 005 и ^{252}Cf ИНК-7 № 190. Срок службы этих источников давно истек, поэтому источник $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ № 005 был выведен из эксплуатации. Срок эксплуатации мощного источника ^{252}Cf № 190 несколько раз продлевался, пока в опорных полях на основе этого источника в 2015 г. не было обнаружено отклонение временной зависимости выхода нейтронов от экспоненциального закона распада с рекомендованным периодом полураспада 2,645 г. [2].

Анализ литературных данных показал, что основным неучтенным источником нейтронов является ^{250}Cf с периодом полураспада 13,08 лет. Относительное содержание ^{250}Cf в источнике в начальный период времени составляло по результатам измерений [3] около 11%. Кроме того, при распаде ^{252}Cf происходит накопление изотопа кюрия ^{248}Cm , так как распад ^{252}Cf идет преимущественно через испускание α -частиц ($p_\alpha = 96,91\%$): $^{252}\text{Cf} \rightarrow \alpha + ^{248}\text{Cm}$. По результатам оценок канал спонтанного деления ^{248}Cm также вносит небольшой вклад в суммарный выход нейтронов при $t > 20$ лет.

С учетом этих факторов было принято решение закончить эксплуатацию источника ^{252}Cf № 190 и создать новую линейку опорных полей нейтронов ИФВЭ ОП-2017 на основе источника $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$. Преимуществом этого источника перед ^{252}Cf является очень большой период полураспада нуклида ^{239}Pu ($\sim 2,41 \cdot 10^4$ лет), что обеспечивает постоянство выхода нейтронов в течение срока службы.

В данной работе приведено описание опорных полей ОП-2017, а также выполнены измерения спектров и интегральных характеристик нейтронного излучения в этих полях с помощью спектрометра Боннера СБ-PCY-01 [4]. Использовались два метода восстановления спектров по программе BON95 [5]. В первом из них начальные спектры для итерационной процедуры находились методом параметризации. Во втором – использовались расчетные спектры.

Описание опорных полей нейтронов ИФВЭ ОП-2017

За основу при создании новых опорных полей были взяты поля нейтронного излучения, описанные в работе [4]. Поля на основе источника ^{252}Cf исключены либо в той же геометрии вместо этого источника используется $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$. Кроме того, в качестве стандартного расстояния между центром источника и точкой измерения принято расстояние 1 м вместо 75 см в работах [1, 4]. Исключением является поле рассеянного излучения за поглощающим конусом, где расстояние равно 1,5 м. Поля реализованы в бетонных помещениях размерами 5,4x17,8 м² и высотой 4 м. Источник и точка измерения находятся на высоте 1,65 м от пола. В табл. 1 приведены номера, условные обозначения и краткие описания опорных полей. Поля UKPN и UKPN_T содержат малый вклад рассеянного от пола, потолка и стен излучения. Поле за поглощающим конусом (CONE), напротив, практически полностью обусловлено рассеянным излучением. В полях Pu-Be и CH₂ присутствуют оба компонента излучения.

Измерения проводились с источником $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ ИБН-25 № 050 с выходом нейтронов 10^7 н/с по паспортным данным. Мощность амбиентного эквивалента дозы на расстоянии 1 м от этого источника в установке УКПН-1М по данным последней поверки [6] равна 132,6 мкЗв/ч с погрешностью 10% при доверительной вероятности 0,95. Эта величина использовалась при градуировке спектрометра СБ-PCY-01.

Таблица 1. Краткое описание опорных полей нейтронов ОП-2017.

№	Условное обозначение	Описание
1	Pu-Be	Источник ^{239}Pu -Be без защиты
2	UKPN	Источник в градуировочно-поверочной установке УКПН-1М [7]
3	CH ₂	Источник в центре полиэтиленового шара диаметром 30,5 см
4	UKPN_T	Источник в градуировочно-поверочной установке УКПН-1М с тепловой насадкой [8]
5	CONE	Источник за поглощающим конусом на расстоянии 1,5 м

Спектрометр Боннера СБ-PCY-01 и методика измерений

Спектрометр Боннера СБ-PCY-01 разработан на основе блока детектирования СБДН-01 радиометра-дозиметра PCY-01. 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. При измерении плотности потока тепловых нейтронов используется также «голый» счетчик без кадмиевого чехла и в кадмиевом чехле.

В состав блока детектирования нейтронов СБДН-01 входит сцинтилляционный детектор нейтронов в виде тонкого диска диаметром 25 мм, размещенный на фотокатоде ФЭУ. Детектор изготовлен из полиметилметакрилата с добавкой порошка 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 PCY-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 энергий нейтронов.

Эти эффекты, приводящие к увеличению погрешности измерений, минимизируются при преимущественном облучении шаров Боннера со стороны боковой поверх-

ности счетчика. Стандартная методика измерений [4] 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° (облучение сзади). Выполненные оценки показывают, что при выбранной геометрии измерений дополнительная неопределенность за счет анизотропии чувствительности не превышает 5% в худшем случае изотропного углового распределения излучения. Измерения в полях 1-4 проводились при вертикальном размещении счетчика в полиэтиленовых шарах. В поле 5 с преобладанием рассеянного излучения счетчик в шарах размещался горизонтально.

При измерениях плотности потока тепловых нейтронов «голым» счетчиком 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 счетчиком в кадмиевом чехле для вычитания вклада надкадмиевых нейтронов. В этом подходе в работе [4] получено хорошее согласие с результатами измерений [1, 9] 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 полную плотность потока нейтронов (от 2,6% до 43%).

Энергетические зависимости чувствительности спектрометра рассчитаны в работе [4]. Далее они уточнялись на основе результатов сравнения восстановленных спектров и интегральных характеристик опорных полей с данными [1, 9]. Оптимизированные функции чувствительности (ФЧ) $R_i(E) = k_i \cdot R_i^{cal}(E)$ для условий облучения под углом 90° к оси счетчика с учетом поправочных коэффициентов k_i представлены на рис. 1 [4]. В данной работе для обеспечения единства с другими средствами измерений спектрометр дополнительно градуировался по данным поверки поля УКПН-1М [6]: $R_i'(E) = k_{sp} \cdot R_i(E)$. Значение градуировочного коэффициента k_{sp} определялось из условия, что мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронов, определенная по восстановленным спектрам в поле 2 (УКПН), должна быть равна 132,6 мкЗв/ч.

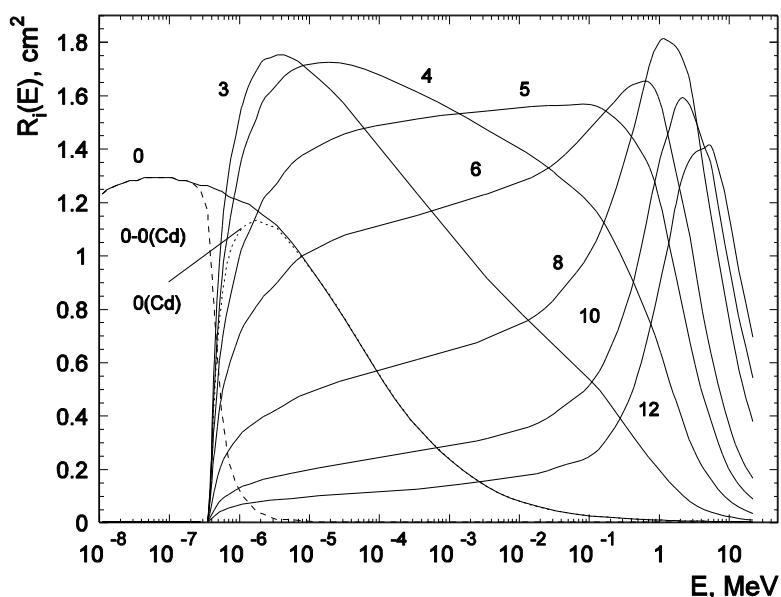


Рис. 1. Энергетические зависимости чувствительности спектрометра СБ-РСУ-01 при облучении перпендикулярно оси счётчика [4]. Цифры у кривых – диаметры шаров в дюймах.

Методика восстановления нейтронных спектров

Восстановление нейтронных спектров из результатов измерений СБ-РСУ-01 проводилось по программе BON95 [5], основанной на методах параметризации и итераций. Программа реализует решение системы уравнений

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

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

Метод параметризации применяется для поиска начального спектра, который уточняется далее с помощью итерационной процедуры метода направленного расхождения [10]. В стандартном варианте программы низкоэнергетические 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:

$$E\Phi_p(E) = a_1 F_{th}(E) + a_2 F_{epi}(E) + a_3 F_{int}(E) + a_4 F_f(E), \text{ где} \quad (2)$$

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

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:

$$\chi^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{M_i - M_i^p}{\Delta M_i^{\text{exp}}} \right)^2 = \min, \quad (4)$$

$$\text{где} \quad M_i^p = \sum_{j=1}^n A_j(E_j) \Phi_p(E_j). \quad (5)$$

Значения коэффициентов a_k в уравнении (2) для каждой комбинации свободных параметров также находятся методом наименьших квадратов. Уравнение (4) благодаря линеаризации спектров преобразуется в систему линейных уравнений относительно неизвестных a_k :

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^m (B_{ik} - C_{ik} a_k) = 0, \quad (6)$$

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 :

$$\Delta M_i = \sqrt{(\Delta M_i^{\text{exp}})^2 + \left(\sum_{j=1}^n \Delta A_i(E_j) \Phi_0(E_j)\right)^2}. \quad (7)$$

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 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, так как в спектрометре СБ-РСУ-01 используется небольшое число шаров Боннера. Компонент эпитепловых нейтронов исключен из параметризации (2, 3). Расчеты показали, что для спектров, форма которых в промежуточной области отличается от $1/E$ -зависимости, поправка этих хвостов, как правило, 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, то есть 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 (2, 3)), "HIGH" (параметризация высокоэнергетического спектра с пиками испарительных и каскадных нейтронов [5, 11]) или "SP0" (априорный спектр считывается из файла, параметризация не проводится).

Результаты измерений и восстановление нейтронных спектров с использованием метода параметризации

Результаты измерений в пяти опорных полях нейтронов в зависимости от диаметра шарового замедлителя приведены на рис. 2. Точки на диаметре 1 дюйм соответствуют «голому» счетчику в кадмиевом чехле. При измерениях с каждым шаром

результаты определялись как среднее значение по трем экспозициям длительностью 100 с. Статистические ошибки результатов измерений (среднеквадратичные отклонения СКО) определялись по формуле $\Delta M_i^{\text{exp}} = 1,7 \cdot \sqrt{M_i / t}$ (t – время измерения в с), полученной из анализа экспериментальных данных. Они малы и во всех случаях укладываются в размеры экспериментальных точек. Основной вклад в полную погрешность ΔM_i (7) вносят погрешности функций чувствительности $\delta A_i(E_j)$, которые задавались равными 10%, за исключением «голового» счетчика без кадмия и в кадмиевом чехле, для которых погрешности составляли 15%. Восстановленные с использованием метода параметризации спектры нейтронов опорных полей ОП-2017 с коридором неопределенностей (СКО) показаны на рис. 3. Число энергетических групп при восстановлении спектров равнялось 10 групп на порядок энергии нейтронов. Значение градуировочного коэффициента, полученное при восстановлении спектра в поле UKPN, равно $k_{cp} = 0,89$.

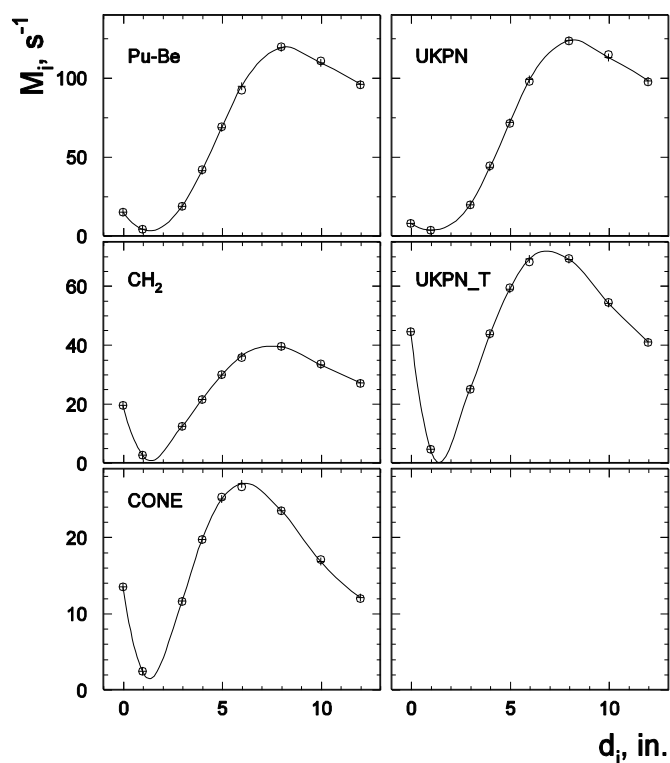


Рис. 2. Скорость счета СБ-РСУ-01 в зависимости от диаметра шара в дюймах в опорных полях ОП-2017. Кружки – результаты измерений. — + — — результаты расчета, полученные при восстановлении спектров нейтронов с использованием метода параметризации.

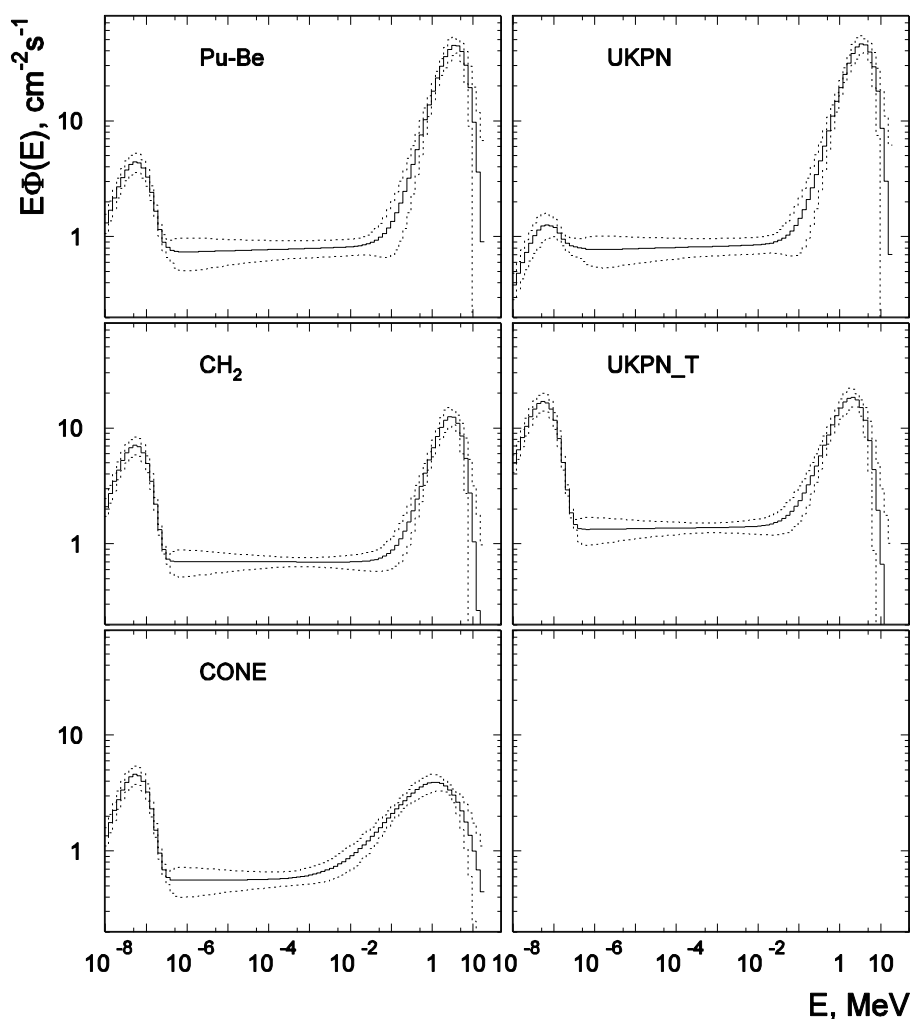


Рис. 3. Спектры нейтронов опорных полей ОП-2017, восстановленные по результатам измерений СБ-РСУ-01 методами параметризации и итераций. Сплошные гистограммы – средние значения, пунктирные гистограммы – коридор неопределенностей.

Применение расчетных спектров нейтронов для восстановления спектров ОП-2017

Расчеты нейтронных спектров ОП-2017 выполнялись по программе FAN15 [12]. В качестве первичного источника нейтронов использовался спектр радионуклидного источника $^{239}\text{Pu} - \text{Be} (\alpha, n)$ массой 80 г, измеренный в работе [13] с помощью ядерной фотоэмульсии (< 1 МэВ) и стильбенового спектрометра (> 1 МэВ). На рис. 4 приведен этот спектр, нормированный на единицу. Средняя энергия спектра равна 4 МэВ при максимальной энергии 11 МэВ. Геометрия установок УКПН и УКПН с тепловой

насадкой задавалась по данным [7, 8]. Состав бетона, учитывавшегося в расчетах вклада излучения, рассеянного от стен, пола и потолка, представлен в табл. 2. Рассчитанные на единичный нейтрон источника $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ (рис. 4) спектры ОП-2017 умножались на паспортный выход источника № 050.

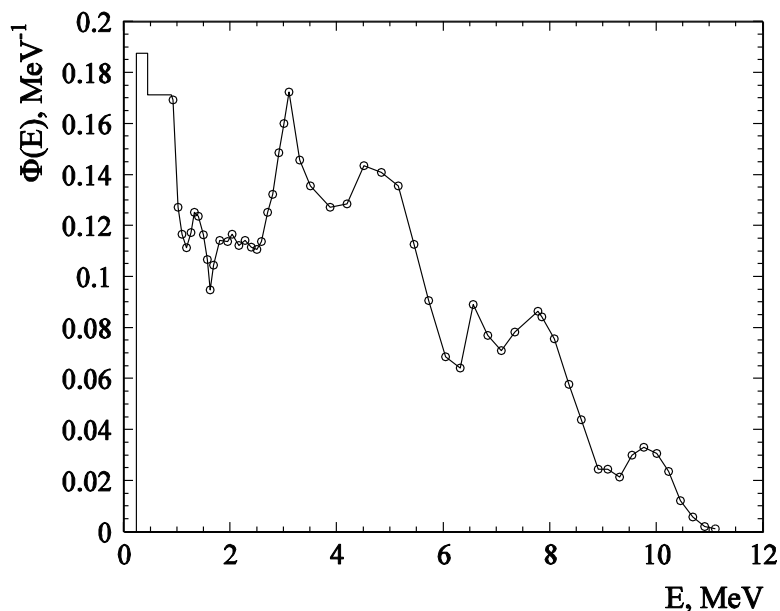


Рис. 4. Экспериментальный спектр нейтронов радионуклидного источника $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ [13], нормированный на единицу. Гистограмма при $E < 1$ МэВ – ядерная фотоэмульсия, точки при $E > 1$ МэВ – стильбеновый спектрометр.

Таблица 2. Массовый химический состав бетона (%) в расчетах вклада рассеянного излучения в ОП-2017.

Н	С	О	Mg	Al	Si	Ca	Fe
0,9	2,3	50	4,5	5,2	25	10	2,1

Результаты расчета показаны на рис. 5 в сравнении со спектрами, восстановленными по данным СБ-РСУ-01 с помощью метода параметризации. В целом наблюдается удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных спектров. Имеющиеся расхождения можно объяснить нерегулярностями в спектре источника $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ (рис. 4), которые не описываются параметризацией (2, 3), а также неточным заданием состава бетона и конструкций установок УКПН и УКПН с тепловой насадкой.

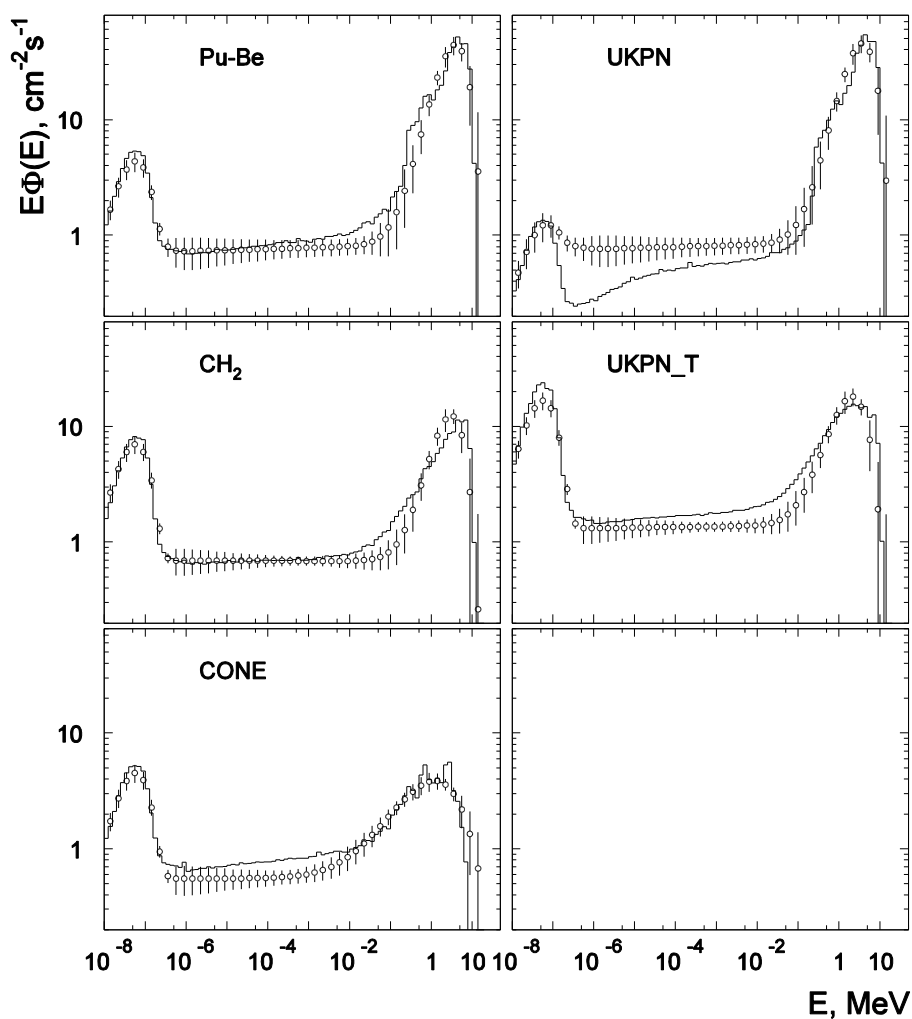


Рис. 5. Расчетные спектры нейтронов ОП-2017 (гистограммы) в сравнении со спектрами, восстановленными методами параметризации и итераций по результатам измерений СБ-PCY-01 (рис. 3).

Расчетные спектры использовались далее в качестве начального приближения в итерационной процедуре метода направленного расхождения. Восстановленные спектры нейтронов приведены на рис. 6. Значение градуировочного коэффициента, полученное в поле UKPN, также равно $k_{cp} = 0,89$, как и ранее при использовании метода параметризации. За исключением поля UKPN в диапазоне $10^{-7} - 10^{-6}$ МэВ и нерегулярностей в поле CONE, связанных с энергетической зависимостью сечений рассеяния нейтронов на ядрах бетона, восстановленные двумя методами спектры согласуются друг с другом в пределах погрешностей.

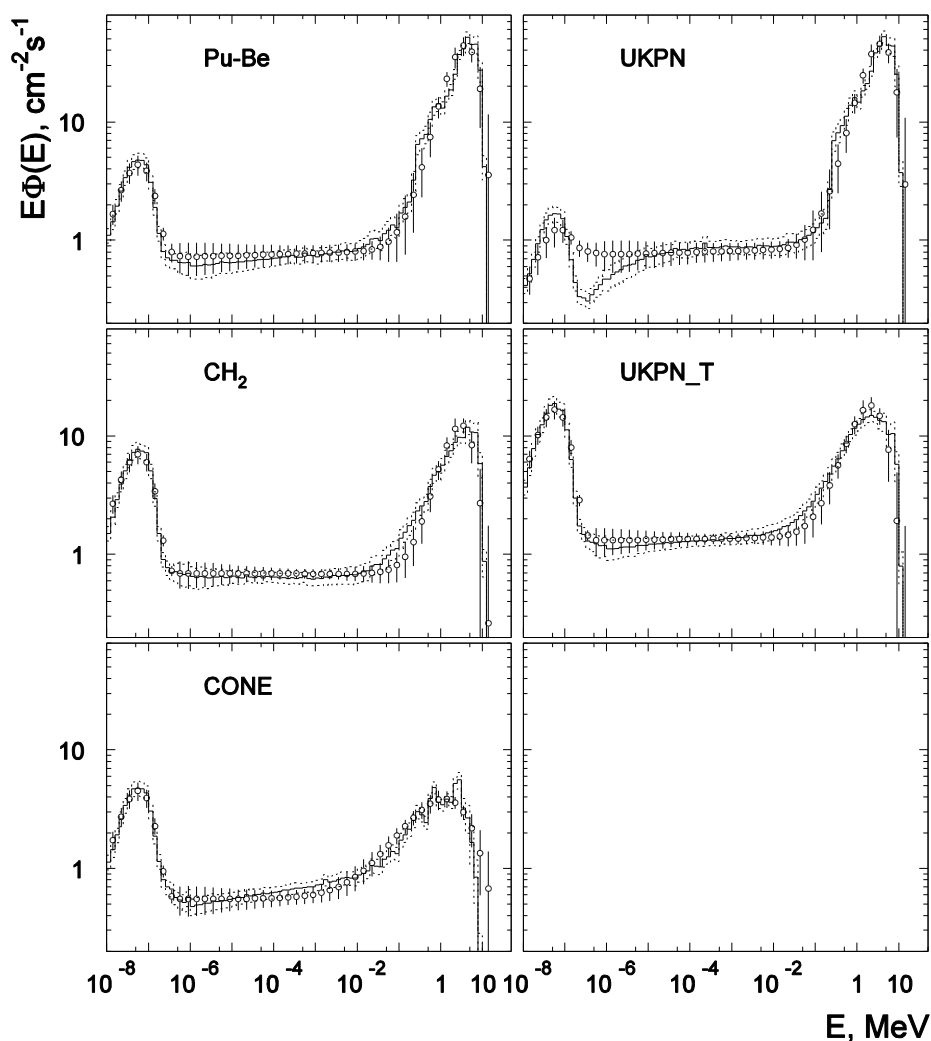


Рис. 6. Спектры нейтронов опорных полей ОП-2017, восстановленные по результатам измерений СБ-PCY-01 с использованием в качестве начальных приближений параметризованных (точки) и расчетных спектров (гистограммы с коридором погрешностей).

Интегральные характеристики спектров нейтронов опорных полей ОП-2017

В табл. 3 представлены интегральные характеристики опорных полей нейтронов ОП-2017, рассчитанные по спектрам, восстановленным двумя методами. Значения мощности индивидуального эквивалента дозы $\dot{H}_p(10)$ приведены только в полях с малым вкладом рассеянного излучения. За исключением средней энергии спектра, остальные величины близки друг к другу при разных методах восстановления. Различие между ними значительно меньше погрешностей, в качестве которых приведены

СКО. Средние энергии спектров нейтронов, рассчитанные с использованием метода параметризации, систематически ниже тех, которые основаны на расчетных спектрах. Исключением является поле CONE. В целом результаты, полученные с помощью расчетных спектров, представляются более надежными. Это связано с тем, что в отличие от гладких параметризованных спектров с максимальной энергией 20 МэВ, расчетные спектры основаны на измеренных спектрах $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ (рис. 4) с нерегулярной структурой и максимальной энергией 11 МэВ.

Таблица 3. Интегральные характеристики опорных полей нейтронов ОП-2017 с источником $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ ИБН-25 № 050 при градуировке по $\dot{H}^*(10)$ в поле UKPN по данным поверки [6].
 $\bar{E}_{>0,4\text{эВ}}$ – средняя энергия спектра надкадмиевых нейтронов, $\dot{\Phi}_{>0,4\text{эВ}}$ – плотность потока надкадмиевых нейтронов, $\dot{\Phi}_{<0,4\text{эВ}}$ – плотность потока тепловых нейтронов.

№	Поле	Начальный спектр	$\bar{E}_{>0,4\text{эВ}}$, МэВ	$\dot{H}^*(10)$, мкЗв/ч	$\dot{H}_P(10)$, мкЗв/ч	$\dot{\Phi}_{>0,4\text{эВ}}$, см ⁻² с ⁻¹	$\dot{\Phi}_{<0,4\text{эВ}}$, см ⁻² с ⁻¹
1	Pu-Be	Парам-я	3,39 ± 0,69	129,6 ± 11,1		98,6 ± 7,2	9,5 ± 1,6
		Расчет	3,47 ± 0,28	129,6 ± 8,9		100,2 ± 5,6	9,5 ± 1,3
2	UKPN	Парам-я	3,25 ± 0,68	132,6 ± 11,2	139 ± 12	101,4 ± 7,4	3,34 ± 0,62
		Расчет	3,36 ± 0,28	132,6 ± 9,1	139,0 ± 9,6	102,9 ± 5,8	3,45 ± 0,50
3	CH ₂	Парам-я	2,19 ± 0,50	37,4 ± 2,8		34,4 ± 2,2	14,6 ± 2,4
		Расчет	2,46 ± 0,26	37,9 ± 2,7		35,2 ± 1,8	14,6 ± 2,0
4	UKPN_T	Парам-я	1,52 ± 0,39	60,5 ± 3,8	63,0 ± 4,1	60,1 ± 3,7	34,6 ± 5,7
		Расчет	1,75 ± 0,22	60,7 ± 4,4	63,3 ± 4,6	61,3 ± 2,9	34,5 ± 4,8
5	CONE	Парам-я	1,34 ± 0,37	18,5 ± 1,1		23,1 ± 1,3	9,5 ± 1,6
		Расчет	0,99 ± 0,14	18,0 ± 1,4		22,6 ± 1,0	9,5 ± 1,3

Заключение

Выполнены измерения нейтронных спектров и интегральных характеристик опорных полей ОП-2017 на основе радионуклидного источника $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ ИБН-25 № 050. В измерениях использовался спектрометр Боннера СБ-PCY-01, градуированный

по мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов в поле УКРН. Диапазон средних энергий надкадмиевых нейтронов измеренных спектров составляет от 1 до 3,5 МэВ, а вклад тепловых нейтронов в полную плотность потока – от 3,2% до 36%. Кроме того, различается угловое распределение нейтронов – от направленного (УКРН и УКРН_Т) до квазиизотропного рассеянного излучения (CONE). Сравнение двух методов восстановления нейтронных спектров, несмотря на близость результатов, свидетельствует в пользу применения расчетных спектров в качестве начальных приближений в итерационной процедуре восстановления спектров.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Соглашения о предоставлении субсидии от «26» сентября 2017 г. № 14.607.21.0193, идентификатор Соглашения RFMEFI60717X0193.

Список литературы

- [1] Г.И. Бритвич, В.С. Волков, Ю.И. Колеватов и др. *Спектры и интегральные характеристики опорных полей нейтронов на базе радионуклидных источников нейтронного излучения*. Препринт ИФВЭ 90-48, Протвино, 1990.
- [2] <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
- [3] А.Г. Музоверов, Е.Н. Савицкая, А.В. Санников. *Характеристики опорных полей нейтронов ИФВЭ с источниками $^{239}\text{Pu-Be}$ № 050 и ^{252}Cf № 190 на 31.01.2017 г., рассчитанные на основе данных поверки 23.12.2016 г.* Отчет ИФВЭ ОРИ, Протвино, 2017.
- [4] А.В. Санников, В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая и др. *Многошаровой спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01*. АНРИ № 1 (56), 2009, с. 62-69; препринт ИФВЭ 2007-21, Протвино, 2007.
- [5] A.V. Sannikov. *BON95, a universal user-independent unfolding code for low informative neutron spectrometers*. GSF report, Munich, 1995.
- [6] Свидетельство о поверке № 4.410-3002-16 «Установка поверочная нейтронного излучения УКПН-1М». ФГУП ВНИИФТРИ. 23.12.2016 г.

- [7] С.Н. Балахничев, М.Ф. Юдин, А.П. Яновский. *Создание и исследование установки УКПН-1 для поверки и градуировки нейтронных приборов в коллимированном пучке*. Труды метрологических институтов СССР, вып. 124 (184). Ленинградское отделение изд-ва «Энергия», 1970, с. 107-129.
- [8] С.Н. Балахничев, С.И. Слепышков, М.Ф. Юдин, А.П. Яновский. *Исследование потока тепловых нейтронов установки УКПН-1*. Труды метрологических институтов СССР, вып. 124 (184). Ленинградское отделение изд-ва «Энергия», 1970, с. 137-146.
- [9] 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.
- [10] М.З. Тараско. *Об одном методе решения линейных задач со стохастическими матрицами*. Препринт ФЭИ-156, Обнинск, 1969.
- [11] А.В. Санников. *Развитие методов спектрометрии нейтронного излучения на больших протонных ускорителях*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Протвино, 2006.
- [12] E.N. Savitskaya and A.V. Sannikov. *FAN15 Software Code for Calculating Low-Energy Photon and Neutron Transfer in Arbitrary Media*. Atomic Energy **122**, 51-57 (2017).
- [13] M.E. Anderson and R.A. Neff. *Neutron Energy Spectra of Different Size $^{239}\text{Pu-Be}(\alpha,n)$ Sources*. Nuclear Instruments and Methods **99**, 231-235 (1972).

Рукопись поступила 24 октября 2018 г.

В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая, А.В. Санников, М.М. Сухарев, А.Г. Музоверов

Опорные поля нейтронов на основе радионуклидного источника $^{239}\text{Pu-Be}$.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 25.10.2018. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 1,2. Уч.–изд.л. 1,6. Тираж 80. Заказ 13. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2018-11,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2018
