

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА ФОТОНЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский, М. В. Мордовской,
В. Н. Пономарев, Г. В. Солодухов, А. А. Афонин*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Исследованы характеристики выведенного пучка тепловых нейтронов фотонейтронного источника ИН-ЛУЭ. Для вывода нейтронов из источника использован коллиматор с диаметром поперечного сечения 30 мм, расположенный под углом 67° относительно направления электронного пучка. Получены значения плотности потока нейтронов в зависимости от расстояния до центра источника и распределение плотности потока от расстояния до оси коллиматора (профиль пучка).

The characteristics of the extracted thermal neutron beam of the IN-LUE photoneutron source are investigated. A collimator with a cross-section diameter of 30 mm, located at an angle of 67° relative to the direction of the electron beam, was used to extract neutrons from the source. The values of the neutron flux density as a function of the distance from the source center and the distribution of the flux density on the distance from the axis of the collimator are obtained.

PACS: 29.25.Dz; 29.27.Fh

ВВЕДЕНИЕ

В ИЯИ РАН создан фотонейтронный W–Be-источник нейтронов [1] на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5. В течение нескольких лет источник интенсивно используется для облучения различных образцов небольшого размера во внутренней полости источника с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов $10^7–10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Однако для ряда задач необходимо облучение объектов больших размеров (нейтронография) или исследование вторичного излучения с детекторами около облучаемого образца.

*E-mail: konobeev@inr.ru

Для этого предусмотрен выведенный пучок нейтронов, проходящих через коллиматор. Целью настоящей работы является исследование параметров этого пучка.

W-Be-ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ИЯИ РАН

Схема фотонейтронного источника показана на рис. 1. Электроны ускорителя ЛУЭ-8-5 с максимальной энергией 8,5–9 МэВ попадают на вольфрамовый конвертер 1 и образуют в нем поток тормозных фотонов с максимальной энергией 8,5–9 МэВ. Тормозные гамма-кванты, падая на бериллиевую мишень 2, состоящую, как показано на рис. 1, из двух блоков $10 \times 10 \times 10$ см, рождают быстрые нейтроны в реакции ${}^9\text{Be}(\gamma, n)$. Нейтроны в полиэтиленовом блоке-замедлителе 3 замедляются до тепловой энергии, при этом максимальная плотность потока тепловых нейтронов достигается в полости 5 объемом $10 \times 10 \times 10$ см, расположенной между блоками бериллиевой мишени. Эта внутренняя область обычно используется для облучения образцов небольшого размера тепловыми нейтронами. Слой защиты из борированного полиэтилена 4 замедляют вышедшие из замедлителя быстрые нейтроны и поглощают медленные и тепловые нейтроны.

Для облучения внешних объектов в конструкции источника предусмотрен канал вывода нейтронов в виде коллиматора 6 с диаметром поперечного

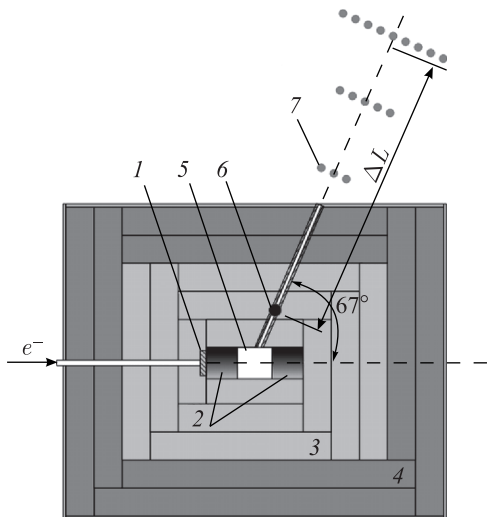


Рис. 1. Схема фотонейтронного источника: 1 — W-тормозная мишень-конвертер; 2 — Be-нейтронообразующая мишень; 3 — полиэтиленовый замедлитель; 4 — защита из борированного полиэтилена; 5 — полость для внутреннего облучения мишеней; 6 — коллиматор выведенного пучка нейтронов; 7 — активационные образцы ${}^{55}\text{Mn}$

сечения 3 см, расположенный под углом 67° относительно направления электронного пучка и выходящий из центра области 5 с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ

Плотность потока нейтронов измерялась [1] с применением активационного метода и известных сечений (n, γ) -реакций. В качестве монитора плотности потока нейтронов в измерениях были использованы образцы ^{55}Mn . Экспериментально измеренная плотность потока тепловых нейтронов во внутренней области (между бериллиевыми блоками) составляет $\sim 10^7 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ при среднем токе электронов 40 мкА.

В задачу данной работы входило исследование плотности потока выведенного пучка тепловых нейтронов в зависимости от расстояния до центра источника и распределение плотности потока в зависимости от расстояния до оси коллиматора. В качестве мониторов потока использовались образцы ^{55}Mn (KMnO_4), которые в результате активации тепловыми нейтронами в реакции $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ приводят к образованию β -активного изотопа ^{56}Mn с периодом полураспада 2,58 ч.

Измерение активности облученных образцов проводилось в низкофоновой камере с использованием гамма-спектрометра из сверхчистого германия (HPGe) и системы регистрации, сбора и обработки информации с детекторов [2]. Текущий вариант защиты обеспечивает скорость счета фона менее 3 импульсов/с в диапазоне значений энергии регистрации гамма-квантов 100–2500 кэВ.

Для определения плотности потока нейтронов используется метод нейтронно-активационного анализа (НАА) [3]. В рамках НАА площадь пика в гамма-спектре активированного нейтронами образца представляется в виде

$$S_i = \frac{mgN_{Apa}}{M\lambda} \Phi \sigma E(t_1, t_2, t_3), \quad (1)$$

где S — площадь пика в спектре; σ — сечение активации; Φ — плотность потока тепловых нейтронов; $E(t_1, t_2, t_3) = (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})$ — фактор, учитывающий наработку и распад радиоактивного изотопа за время облучения (t_1), задержки (t_2) и измерения (t_3); λ — постоянная радиоактивного распада; m — масса образца; g — содержание изотопа в естественной смеси изотопов; p — выход гамма-квантов на один распад образовавшегося радиоактивного изотопа; M — атомная масса элемента; a — коэффициент, учитывающий экспериментальные условия. Если известны сечение активации изотопа тепловыми нейтронами и все параметры облучения и измерения, то из уравнения (1) можно получить искомое значение плотности потока в определенной точке.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА НЕЙТРОНОВ

Измерения проводились при среднем токе электронов 40 мкА. Образцы ^{55}Mn (KMnO_4) массой ~ 3 г устанавливались по линии, перпендикулярной оси коллиматора, на расстояниях 60, 81, 127 и 160 см от центра источника. Для контроля один образец Mn массой 0,1 г облучался во внутренней камере источника при плотности потока $\sim 10^7 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Количество образцов на выведенном пучке варьировалось от 3 до 9 в зависимости от расстояния до образцов. Время облучения также варьировалось от 30 до 120 мин. После облучения образцы перемещались в низкофоновую камеру и активационные γ -спектры образцов измерялись с помощью HPGe-спектрометра. Типичный энергетический спектр, полученный для образца Mn, показан на рис. 2.

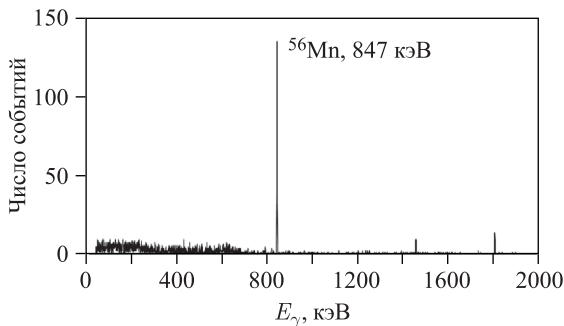


Рис. 2. Спектр гамма-квантов активированного образца ^{56}Mn , используемого в качестве монитора плотности потока

Спектры для каждого облученного образца записывались в компьютер и обрабатывались с помощью программы SpectraLineGP [4]. В результате обработки вычислялась площадь пика с энергией 847 кэВ, соответствующего образованию изотопа ^{56}Mn . Далее по формуле (1) с использованием известного сечения реакции $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$, времен облучения, выдержки и измерения и других известных параметров (эффективности детектора, времени распада и др.) вычислялась плотность потока нейтронов в точках расположения детекторов.

На рис. 3 представлены экспериментальные значения плотности потока нейтронов на оси коллиматора для различных расстояний от центра источника. Приведена также расчетная кривая для плотности потока точечного источника:

$$\Phi = \frac{\Phi_0}{R_{\text{eff}}^2}. \quad (2)$$

При этом совпадение с экспериментальными данными получается в предположении, что центр точечного источника смещен наружу от геометриче-

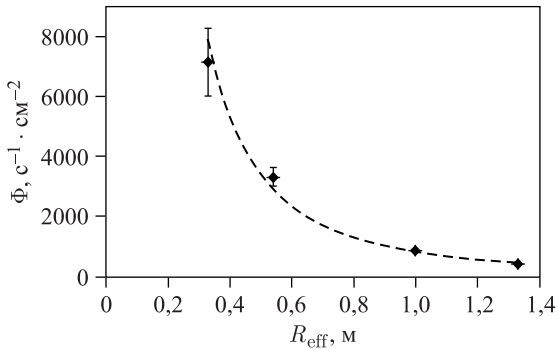


Рис. 3. Зависимость плотности потока нейтронов от эффективного расстояния. Кривая — аппроксимация по формуле (2) с $\Phi_0 = 824 \text{ c}^{-1}$

ского центра на 0,27 м. На рис. 3 представлена зависимость плотности потока от расстояния $R_{\text{eff}} = R - 0,27$, где R — расстояние от геометрического центра источника до точки измерения.

На рис. 4 показана зависимость плотности потока нейтронов от смещения от оси коллиматора (ΔL) на расстоянии 1,6 м от центра источника. В данном измерении использовались 9 образцов ^{55}Mn , расположенных со смещением 5 см по линии, перпендикулярной оси коллиматора, на расстоянии 1,6 м от геометрического центра источника (центр внутренней полости 5 на рис. 1). Центральный детектор располагался на оси коллиматора ($\Delta L = 0$). На рис. 4 показана также аппроксимационная кривая, рассчитанная как сумма гаусси-

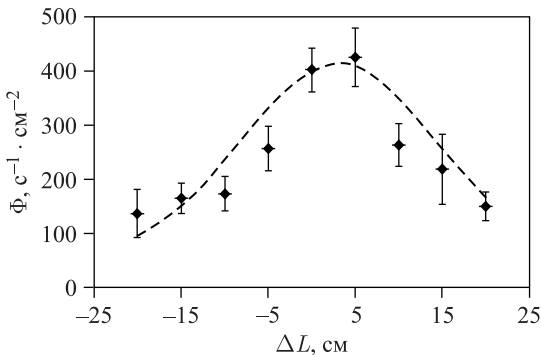


Рис. 4. Зависимость плотности потока нейтронов от смещения от оси коллиматора на расстоянии 1,6 м от центра источника. Кривая — аппроксимация по формуле (3) с параметрами подгонки $\Phi_1 = 360 \text{ c}^{-1} \cdot \text{ см}^{-2}$, $\Phi_2 = 55 \text{ c}^{-1} \cdot \text{ см}^{-2}$ и шириной распределения $\text{FWHM} = 26 \text{ см}$

ана и постоянного члена:

$$\Phi = \Phi_1 \exp\left(-\frac{(L - L_0)^2}{2\sigma^2}\right) + \Phi_2. \quad (3)$$

На этом расстоянии ширина распределения FWHM = 26 см. Аналогично были получены данные о поперечном распределении плотности тока на других расстояниях от центра источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы характеристики выведенного пучка тепловых нейтронов фотонейтронного источника ИН-ЛУЭ. Для вывода нейтронов из источника использован коллиматор с диаметром поперечного сечения 3 см, расположенный под углом 67° относительно направления электронного пучка. Полученные значения плотности потока нейтронов в зависимости от расстояния до центра источника и распределение плотности потока в зависимости от расстояния до оси коллиматора (профиль пучка) приведены в таблице.

Параметры выведенного пучка нейтронов

Расстояние от точки эффективного центра источника, см	Плотность потока, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$	Ширина распределения (FWHM) плотности потока, см
33	7144	Не измерялась
54	3320	5
100	859	12
133	425	26

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А. В., Бурмистров Ю. М., Зуев С. В., Конобеевский Е. С., Мордовской М. В., Недорезов В. Г. Возможности определения микропримесей в материалах на измерительно-активационном комплексе на базе фотонейтронного источника // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. С. 824–827.
2. Андреев А. В., Бурмистров Ю. М., Зуев С. В., Конобеевский Е. С., Мордовской М. В., Фирсов В. И. Низкофоновый гамма-спектрометр с защитой на антисовпадениях от космического излучения // ЯФ и инжиниринг. 2016. Т. 4. С. 879–882.
3. Гутько В. И. Активационный анализ. Минск: МГЭУ, 2008. 74 с.
4. SpectraLineGP. http://lsrcm.ru/products/detail.php?ELEMENT_CODE=SpectraLineGP.