

Моделирование фильтра для формирования моноэнергетических пучков нейтронов на реакторе ИРТ МИФИ

С.В. Ивахин¹, Г.В. Тихомиров¹, А.И. Болоздыня¹, Д.Ю. Акимов², В.Н. Стеханов²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Тел. +7905-720-90-97, Факс: E-mail: sergey.ivakhin@gmail.com

²ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Аликханова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ: Рассматривается задача формирования пучков моноэнергетических нейтронов на выходе из канала исследовательского реактора для различных приложений. Задача имеет несколько этапов:

1. Полномасштабная расчетная модель реактора ИРТ МИФИ для оценки спектра и пространственного распределения нейтронов, падающих в область экспериментального канала.
2. Моделирование фильтров в канале для выделения спектра с необходимой моноэнергетической линией нейтронов.
3. Оценка характеристик пучка на выходе из канала с фильтром и эффективности радиационной защиты канала и детектора.

Проведен выбор материалов для различных фильтров. Расчеты проводились с помощью прецизионной программы на основе метода Монте-Карло – MCNP. В результате разработана модель фильтра по формированию моноэнергетического пучка нейтронов с энергией 24 кэВ для проекта российского эмиссионного детектора на жидком благородном газе для наблюдения редких процессов рассеяния нейтрино и гипотетических частиц темной материи на атомном ядре.

Ключевые слова: нейтронный фильтр, MCNP, Монте-Карло, фон, защита

I. ВВЕДЕНИЕ

В работе приводится методика решения задачи по получению квазимонохроматических пучков нейтронов для эксперимента по наблюдению редкого процесса когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на тяжелом атомном ядре, когда должны регистрироваться ядра отдачи с энергиями на уровне нескольких сотен эВ, и экспериментов для поиска Темной Материи с помощью детекторов на сжиженных благородных газах. Предполагается использовать Эмиссионный двухфазный детектор на благородном газе с электролюминесцентным усилением ионизационного сигнала, который позволяет регистрировать предельно малую величину ионизации – вплоть до одного электрона [1]. Такой детектор можно использовать для регистрации когерентного рассеяния реакторных антинейтрино с сечениями, в десятки раз превосходящими сечения обратного бета-распада, чаще всего используемого для регистрации нейтрино [2, 3], однако планирование такого эксперимента невозможно без знания ионизационного и сцинтилляционного выхода с треков ядер отдачи ксенона в области энергий менее 1 кэВ. В планируемом эксперименте будет исследоваться отклик жидкоксенонового эмиссионного детектора в области суб-кэВных энергий отдачи ядер ксенона при упругом рассеянии пучка квазимонохроматических нейтронов, выделенных из непрерывного спектра реакторных нейтронов при помощи композитных интерференционных фильтров.

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРА

В настоящее время экспериментальная установка устанавливается на горизонтальном экспериментальном канале ГЭК-10 исследовательского реактора ИРТ МИФИ тепловой мощностью 2,5 МВт (Рис.1). Пучки квазимонохроматических нейтронов будут формироваться с помощью композитных интерференционных фильтров, составленных из пар элементов, в которых один изотоп имеет глубокий интерференционный минимум в полном сечении, а другие изотопы позволяют эффективно подавить пропускание в других областях энергий нейтронов. Так, например, фильтр, составленный из 30 см ⁵⁶Fe и 100 см ²⁷Al, позволит вырезать из квазинепрерывного спектра нейтронов пик с максимумом 24 кэВ и шириной 2,5 кэВ. Подбором толщин пар поглотителей Si-Ti и Mn-V-S можно сформировать пики с энергиями 54 ± 1.5 кэВ, 149 ± 7 кэВ и 275 ± 12 кэВ [4, 5].

Перенос нейтронов из активной зоны реактора ИРТ через ГЭК-10 в область фильтра моделируется с помощью программы MCNP-A [6]. В связи с большим ослаблением потока нейтронов расчеты проводятся в два этапа. На первом этапе моделируется спектр и угловое распределение нейтронов, попадающих из активной зоны на ГЭК-10. На втором этапе проводятся расчеты прохождения потока нейтронов через ГЭК-10 и фильтры. Нормировка результатов расчетов на реальную тепловую мощность реактора позволит оценить абсолютные значения потока монохроматических нейтронов. Эти

данные будут использованы также для оптимизации пассивной защиты детектора.

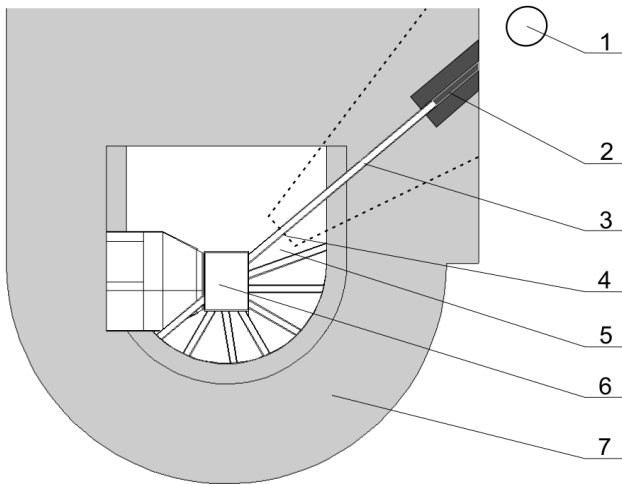


Рис. 1. Схема установки детектора на реакторе ИРТ МИФИ:

1 – детектор; 2 – интерференционный фильтр; 3 – горизонтальный канал ГЭК-10; 4 – поверхность записи источника нейтронов; 5 – вода, окружающая активную зону реактора; 6 – активная зона реактора; 7 – железобетонная защита реактора (толщина по радиусу – 1,5 м).

1. Спектр и угловое распределение нейтронов

Для моделирования реального спектра нейтронов и углового распределения нейтронов в канале была разработана полномасштабная модель реактора ИРТ МИФИ. На этой модели был проведен KCODE расчет с целью набора функционалов для детального описания поверхностного источника нейтронов в экспериментальном канале ГЭК-10. Полученный поверхностный источник использовался для расчетов модельных задач по выбору оптимального фильтра и расчета канала с детально описанным окружением и защитой.

2. Выбор материалов

Широкий набор природных элементов и высокоочищенных изотопов используются как компоненты нейтронных фильтров. Такие элементы как Si, Al, V, Sc, S, Mn, Fe, Ti, Mg, Co, Ce, Cr, Rh, Cu, B, Cd, LiF и изотопы ^{52}Cr (99.3%), ^{54}Fe (99.92%), ^{56}Fe (99.5%), ^{57}Fe (99.1%), ^{58}Ni (99.3%), ^{60}Ni (92.8-99.8%), ^{62}Ni (98.0%), ^{80}Se (99.2%), ^{10}B (85%), ^7Li (90%). Использование этих материалов позволяет варьировать параметры фильтра: чистоту, интенсивность, ширину и т.д. [4].

Материалы можно разделить на следующие группы:

- легкие - бор (B), литий (Li^6), фтор (F) являются поглотителями нейтронов по каналам (n, α) и (n, T) реакций.
- Средние – кремний (Si), алюминий (Al), ванадий (V), скандий (Sc), сера (S), марганец (Mn),

железо (Fe^{56}), титан (Ti), марганец (Mg), кобальт (Co) – материалы с резонансами в сечениях в области энергий $10\text{-}10^3$ кэВ, определенный подбор которых в конструкции фильтра позволяет выделить интересующую линию нейтронов из спектра.

- Тяжелые – кадмий (Cd), церий (Ce), рутений (Ru) – поглотители нейтронов, преимущественно по каналу (n, γ) реакции, имеют резонансы в сечениях в тепловой области.

Для планируемого эксперимента в качестве основной компоненты фильтра было выбрано железо, имеющее интерференционный минимум в полном сечении взаимодействий в узком диапазоне при энергии 24 кэВ. Дополнительным материалом использован алюминий, имеющий резонансные максимумы в сечении при энергиях выше 24 кэВ, позволяющий «вырезать» из спектра нейтроны, прошедшие через менее глубокие интерференционные минимумы железа. Полные сечения материалов представлены на рис.2.

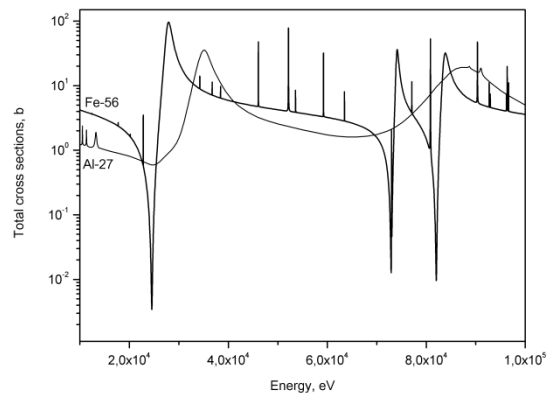


Рис. 2. Полные сечения взаимодействия Fe-56 и Al-27

Использование вместо изотопа железа 56 стали марки Ст 3 приводит к уменьшению коэффициента прохождения квази моноэнергетического пучка нейтронов на выходе из фильтра и ухудшению отношения «сигнал/шум».

3. Расчет характеристик фильтра

Мощность реактора ИРТ МИФИ составляет 2.5 МВт. Как известно, в результате реакции деления выделяется около 200 МэВ энергии, что составляет $3.2 \cdot 10^{-11}$ Дж/дел. Определяя количество делений в секунду как мощность, деленную на энергетический выход реакции деления, получаем $7.8 \cdot 10^{16}$ Дел/с. Учитывая, что среднее число вторичных нейтронов деления $\nu=2.5$, определяем полное число нейтронов в единицу времени $2.0 \cdot 10^{17}$ н/с.

Из результатов расчета полномасштабной модели ИРТ МИФИ ток всех нейтронов с энергией от 0 до 15 МэВ внутри канала через поверхность, на которой формируется источник нейтронов для расчетов фильтров, составляет 10^{14} н/с. ток нейтронов вдоль оси канала, в телесном угле 1 град через рассматриваемую

поверхность – $3.7 \cdot 10^{10}$ н/с.

На выходе горизонтального канала ГЭК-10 без фильтра ток нейтронов с энергией от 20 до 25 кэВ, в телесном угле 1 град – $2.2 \cdot 10^7$ н/с.

Анализ коэффициента пропускания нейтронов и отношения «сигнал/шум» позволил выбрать фильтр на основе 100 см Al и 30 см стали 3. В таком фильтре ток нейтронов на выходе будет составлять $7 \cdot 10^4$ н/с, а отношение «сигнал/шум» будет равно около 40. Если вместо стали 3 можно было бы поставить изотоп Fe - 56, то на выходе ток нейтронов будет составлять $3.15 \cdot 10^5$ н/с, а отношение «сигнал/шум» будет равно около 44.

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛА С РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТОЙ ЕГО ОКРУЖЕНИЯ И ЗАЩИТОЙ ДЕТЕКТОРА

Фоновое излучение нейтронов и гамма оказывает сильное влияние на возможность проведения качественного эксперимента. Следует защитить детектор от его воздействия. Проанализированы несколько вариантов возможной защиты как экспериментального канала ГЭК – 10 на выходе шибера, так и непосредственно окружной защиты детектора. Модель экспериментального канала с защитой канала представлена на рис. 3.

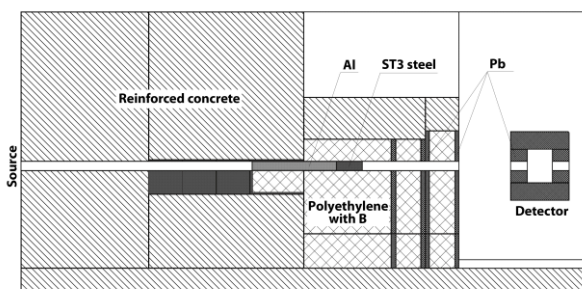


Рис. 3. Экспериментальный канал с радиационной защитой

Защита канала представлена в виде стакана шибера, заполненного пластинами из борированного полиэтилена толщиной 5 см, и подвижной конструкции, состоящей из пластин борированного полиэтилена и свинца.

Проведены ряд расчетов на моделях канала ГЭК-10 с реальной геометрией окружения: без защиты, с защитой только канала и защитой канала и детектора. Результаты расчетов отношения «сигнал/шум» представлены в таблице 1.

Таблица 1. Отношения «сигнал-шум»

Модель канала ГЭК-10 с реальным окружением канала	Отношение «сигнал-шум»
без радиационной защиты	0.01
с радиационной защитой только канала	39.10
с радиационной защитой канала и детектора	34.10

Защита детектора представляет собой цилиндрический свинцовый цилиндрический слой свинца с отверстием для пучка, закрытый сверху и снизу.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данной работой подтвердили возможность получения квазимонохроматических пучков нейтронов на выходе экспериментальных каналов исследовательских реакторов. Смоделировали фильтр с защитой, позволяющий получить на выходе канала ГЭК – 10 реактора ИРТ МИФИ квазимонохроматический пучок нейтронов с энергией 24 кэВ, шириной 2,5 кэВ и отношением «сигнал/шум» равным 34.

Для дальнейшей оптимизации конструкции защиты и уточнения характеристик пучка, попадающего в детектор, требуются данные о фоне на работающем реакторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Буренков, Д.Ю. Акимов, Ю.Л. Гришкин и др. Регистрация одиночного электрона ионизации в электролюминесцентных детекторах на основе ксенона. *Ядерная физика* 72: 693-701, 2009, *Phys. Atom. Nucl.* 72: 653-661 (2009).
2. C. Hagmann and A. Bernstein, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* 51, 2151 (2004).
3. D.Akimov, A.Bondar, A.Burenkov, A. Buzulutskov, *JINST* 4, P06010 (2009)
4. O.O. Gritzay, V.V. Kolotyi, O.I. Kaltchenko. Neutron filters at Kyiv research reactor. Preprint KINR-01-6. Kyiv 2001
5. O. Gritzay, V. Kolotyi, N. Klimova et al., Reactor Neutron Filtered Beams for Precision Neutron Cross Section Measurements. Talk at "The 3rd International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv2010)", 7 -12 June, 2010, Kyiv, Ukraine
6. Judith A.Briesmeister, Ed., "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B", Los Alamos National Laboratory report LA-12625-M, Version 4B (March 1997).