

ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ДОЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ НЕЙТРОНОВ ЗА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТОЙ ИСТОЧНИКА ИРЕН ПРИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ 60 МэВ

Т. Р. Якубов¹, Г. Н. Тимошенко, Л. Г. Бескровная, В. Н. Швецов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Описаны результаты измерения спектров нейтронов в двух точках за биологической защитой на источнике резонансных нейтронов (ИРЕН) Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. Для получения мощных потоков нейтронов в этом источнике используется электронная пушка и толстая вольфрамовая мишень, в которой нейтроны генерируются за счет тормозного гамма-излучения электронов в мишени. Вольфрамовая мишень помещена в цилиндрический объем, заполненный водой. Спектры нейтронов получены с помощью многосферного спектрометра Боннера, измерения с которым проводились в двух точках за биологической защитой. По полученным спектрам определялись эффективные мощности дозы нейтронов в точках измерения, что важно как для оценки радиационной обстановки на ИРЕН, так и для сравнения с показаниями нейтронных дозиметров автоматизированной системы радиационного контроля.

The results of neutron spectra measurements at two points at the intense resonance neutron source (IREN) of the JINR Laboratory of Neutron Physics are described. To obtain powerful neutron fluxes, this source uses an electron accelerator and the thick tungsten target, in which neutrons are produced from the bremsstrahlung gammas of electrons in the target. Based on the obtained spectra, the effective neutron dose rates at the measurement points behind biological shielding were determined, which is important both for assessing the radiation situation at IREN and for comparison with the readings of neutron dosimeters of the automated radiation monitoring system.

PACS: 29.90.+r; 87.53.Bn

ВВЕДЕНИЕ

История импульсных источников нейтронов в Объединенном институте ядерных исследований начинается с момента его основания в марте 1956 г. Сразу же после образования в ОИЯИ Лаборатории нейтронной физики начались работы по созданию импульсного реактора на быстрых нейтронах (ИБР), принцип работы которого был предложен Д. И. Блохинцевым за год до этого на семинаре в ФЭИ (Обнинск). В июне 1960 г. реактор ИБР впервые достиг импульсной критичности [1, 2]. Средняя проектная мощность реактора составляла всего лишь 1 кВт, но уже через два года после

¹E-mail: yakubov@jinr.ru

начала работы благодаря модернизации системы охлаждения она была повышена до 6 кВт. При работе реактора на мощности 3 кВт и частоте импульсов 5 Гц мгновенная мощность реактора равнялась 15 МВт, а длительность импульса была около 50 мкс [3].

Последовательное развитие первого импульсного реактора привело к существенному сокращению длительности импульса за счет работы в бустерном режиме с ускорителем электронов в качестве инжектора [4] и к увеличению средней мощности за счет создания новой активной зоны. Эта установка с линейным электронным ускорителем ЛУЭ-40 и активной зоной мощностью 30 кВт получила название ИБР-30 [5]. В настоящее время в ОИЯИ создан новый источник резонансных нейтронов на базе электронного ускорителя ЛУЭ-200 с неразмножающей нейтронопроизводящей мишенью из вольфрама — ИРЕН [6]. Первоначальный проект источника ИРЕН предполагал использование линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200 с энергией 200 МэВ и мощностью пучка около 10 кВт в качестве драйвера подкритической размножающей нейтронопроизводящей мишени из металлического плутония. Выход нейтронов в такой бустерной схеме ожидался на уровне 10^{15} с^{-1} при длительности импульса 600 нс и частоте повторения 150 Гц. Реализована первая стадия проекта, в которой энергия электронов доведена до 110 МэВ, импульсный ток электронов на мишени около 2 А, частота повторения 50 Гц, длительность импульса быстрых нейтронов 120 нс, полный выход нейтронов порядка $2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Эти параметры позволяют успешно проводить эксперименты по спектроскопии нейтронных резонансов в диапазоне энергий от тепловых до нескольких кэВ, нейтронному и гамма-активационному анализу и физике деления.

В первоначальном проекте подкритическая плутониевая мишень ИРЕН должна была быть размещена в бетонном каньоне толщиной тяжелого бетона около 3 м, в котором размещались каналы нейтроноводов и шибберные устройства. В настоящее время нейтронопроизводящая вольфрамовая мишень без подкритической плутониевой зоны ИРЕН находится в центре мишенного зала, в котором отсутствует 3-м бетонный каньон, биологической защитой служат стены и перекрытие мишенного зала, выполненные из тяжелого бетона толщиной 2,5 м. При этом энергия электронов уже превышает 100 МэВ при мощности пучка порядка 2 кВт [7, 8]. В связи с этим возникает необходимость контроля полей нейтронов за пределами стен мишенного зала ИРЕН, особенно в помещениях, где постоянно размещается персонал установки. Именно решению этой задачи и посвящена данная работа.

1. МНОГОСФЕРНЫЙ СПЕКТРОМЕТР НЕЙТРОНОВ

Наибольшие трудности возникают при исследовании характеристик рассеянных полей нейтронов в полях ядерно-физических установок из-за их необычайно широкого энергетического диапазона. Причем физика процессов взаимодействия нейтронов разных энергий с веществом различается значительно и сечение их взаимодействия с веществом сильно зависит от энергии.

Используемый в данной работе многосферный спектрометр нейтронов (другое его название — спектрометр Боннера) представляет собой детектор тепловых нейтронов малого размера, который последовательно помещается внутрь сферических полиэтиленовых замедлителей различного диаметра. Сферическая форма замедлителей вы-

брана с тем, чтобы спектрометр был нечувствителен к направлению движения падающих на него нейтронов. Замедлители служат для термализации нейтронов высоких энергий, которые затем эффективно регистрируются детектором медленных нейтронов. Поскольку длина замедления нейтронов в полиэтилене зависит от их энергии, то использование замедлителей с разными размерами приводит к тому, что спектрометр становится чувствительным к нейтронам в широком диапазоне энергий, и в зависимости от размера замедлителя чувствительность его будет разная к разным энергетическим группам нейтронов [9].

В качестве детекторов медленных нейтронов в многосферных спектрометрах применяются как активные детекторы — малогабаритные пропорциональные ^3He -счетчики или небольшие сцинтилляционные кристаллы $^6\text{LiI}(\text{Eu})$, так и пассивные детекторы (например, активационные детекторы из золота, индия или термолюминесцентные детекторы). Спектрометр с активными детекторами обладает неплохой чувствительностью и может работать в слабых полях излучения. Для измерения спектров нейтронов в интенсивных или импульсных полях лучше подходят модификации спектрометра с пассивными детекторами.

1.1. Состав и конструкция многосферного спектрометра ОИЯИ. Измерение спектров нейтронов в данной работе проводилось с использованием многосферного спектрометра ОИЯИ. В ЛРБ ОИЯИ был создан портативный и автономный многосферный спектрометр Боннера с монитором нейтронного поля [10]. Для подключения датчика к многоканальному анализатору используется спектрометрический АЦП с инкрементным запоминающим устройством большой емкости, выполненный в виде внешнего устройства, подключаемого к USB-порту. Память АЦП была поделена на две части с двумя независимыми входами, что позволило иметь фактически два отдельных АЦП — для спектрометра и монитора. В качестве монитора нейтронного поля использован пропорциональный ^3He -счетчик нейтронов типа RS-P4-0810-204 длиной 10 дюймов, диаметром 1 дюйм с давлением 10 атм в цилиндрическом полиэтиленовом замедлителе, который имеет длину 40 см и толщину стенки 5 см. Чувствительность монитормного счетчика к нейтронам широкого спектра энергий намного превышает чувствительность спектрометра со сферой 5 дюймов, что обеспечивает набор хорошей статистики даже при работе в слабых полях излучения. Еще одно внешнее устройство с питанием от шины USB включает в себя два источника высокого напряжения для ФЭУ датчика спектрометра (-820 В) и для ^3He -счетчика монитора ($+1700$ В).

Конструкция и внешний вид спектрометра с монитором показаны схематически на рис. 1. Детектор $\text{LiI}(\text{Eu})$ соединен оптически со световодом из оргстекла, который, в свою очередь, контактирует с фотокатодом фотоумножителя ФЭУ-85. Световод с детектором помещены в трубку из нержавеющей стали диаметром 16 мм, на которую при измерениях поочередно надеваются сферические замедлители. При этом детектор позиционируется в их центре.

Импульсы с анода фотоумножителя формируются на нагрузочном сопротивлении и подаются на вход преобразователя амплитуда–цифра (АЦП-кодировщик) для измерения амплитудного спектра многоканальным анализатором импульсов.

Используемый в качестве детектора спектрометра ОИЯИ сцинтиллятор $\text{LiI}(\text{Eu})$ имеет диаметр 4,3 мм, высоту 4 мм и обогащен ^6Li . При захвате теплового нейтрона

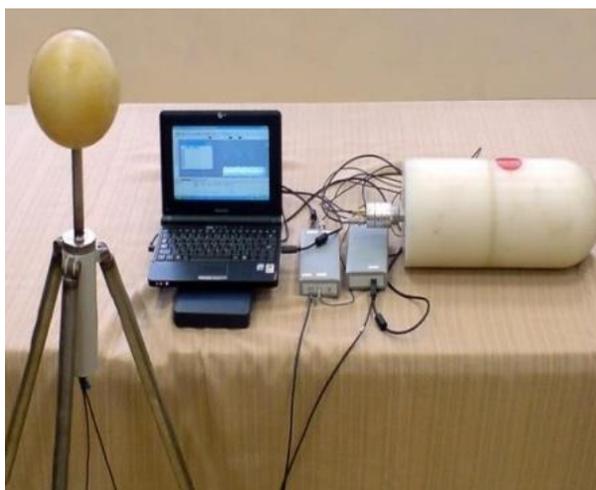
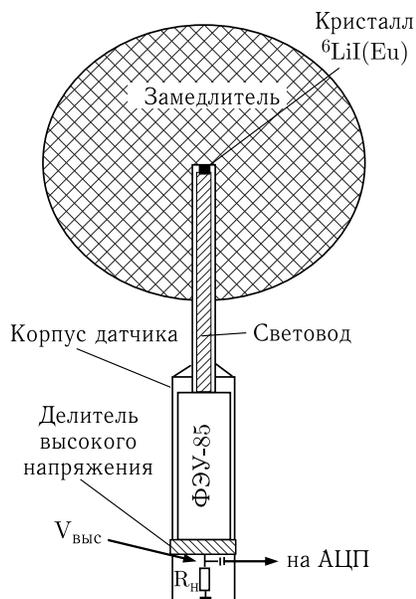


Рис. 1. Слева: конструкция многосферного спектрометра нейтронов ОИЯИ. R_n — сопротивление нагрузки; АЦП — амплитудно-цифровой преобразователь. Справа: внешний вид спектрометра и монитора

ядром ${}^6\text{Li}$ в сцинтилляторе происходит реакция $n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4,78 \text{ МэВ}$, имеющая сечение 940 б для тепловых нейтронов.

Именно тепловые нейтроны с наибольшей вероятностью регистрируются сцинтиллятором $\text{LiI}(\text{Eu})$, что приводит к инвариантности функции отклика многосферного спектрометра нейтронов по отношению к энергии нейтронов и направлению их движения, являющейся его главным отличием от других методов измерения энергии нейтронов.

При этом многосферный спектрометр не имеет такого классического параметра, как энергетическое разрешение, и плохо работает со спектрами, имеющими резкие особенности (например, узкие пики). Он предназначен для работы со сравнительно гладкими спектрами, формы которых характерны для спектров нейтронов утечки из защит ядерно-физических установок или в окружающей среде.

Показаниями такого спектрометра в некоторой точке поля являются скорости счета детектора медленных нейтронов при различных замедлителях за вычетом фона гамма-квантов. Процесс измерений с последовательной заменой замедлителей требует длительных измерений, особенно в слабых полях излучений, поэтому исследуемое поле нейтронов должно слабо меняться со временем. Если все же мощность поля меняется, то необходимо нормировать показания спектрометра с разными сферами на показания монитора, в качестве которого служит стационарный счетчик нейтронов, расположенный неподалеку от точки измерений.

В составе спектрометра ОИЯИ имеется набор сфер. Использование набора замедлителей с максимальным диаметром до 12 дюймов включительно позволяет восста-

навливать спектры нейтронов в диапазоне от тепловых до ~ 20 МэВ. Для измерения более жестких спектров нейтронов на ускорителях заряженных частиц в состав спектрометра включается дополнительная гетерогенная сфера диаметром 10 дюймов со сферической свинцовой вставкой диаметром 8 см, очувствленная к нейтронам высоких энергий.

В портативном спектрометре ОИЯИ используется набор гомогенных полиэтиленовых сфер диаметром 50,9; 76,3; 127,2; 178,4; 204,3; 254,1, 254,1 со сферической свинцовой вставкой и 305,5 мм (примерно 2; 3; 5; 7; 8; 10, 10 со сферической свинцовой вставкой и 12 дюймов). Плотность полиэтилена равна $0,932 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Также используется «голый» детектор в кадмиевом чехле (толщиной Cd 0,5 мм) и без чехла, с помощью которых проведенные измерения позволяют определить плотность потока подкадмиевых нейтронов, т.е. нейтронов с энергией менее $\sim 0,5$ эВ, и проводить нормирование спектров нейтронов в тепловой области энергий.

1.2. Методика восстановления спектров нейтронов. Функции чувствительности ($\Phi\text{Ч}$) детекторов (комбинаций сцинтиллятора LiI(Eu) со сферами разного диаметра и чехлом из Cd) многосферного спектрометра ОИЯИ приведены на рис. 2. В расчетах функции чувствительности спектрометра принималось, что содержание изотопа ${}^6\text{Li}$ в детекторе тепловых нейтронов составляло 100%, поэтому на практике функции чувствительности должны быть нормированы на результаты градуировки спектрометра с источником нейтронов с известным выходом.

Скорость счета i -го детектора N_i [с^{-1}] связана с плотностью потока нейтронов $\Phi(E)$ [$\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1}$] вырожденным интегральным уравнением Фредгольма I рода:

$$N_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Phi(E) R_i(E) dE, \quad i = 1, \dots, m. \quad (1)$$

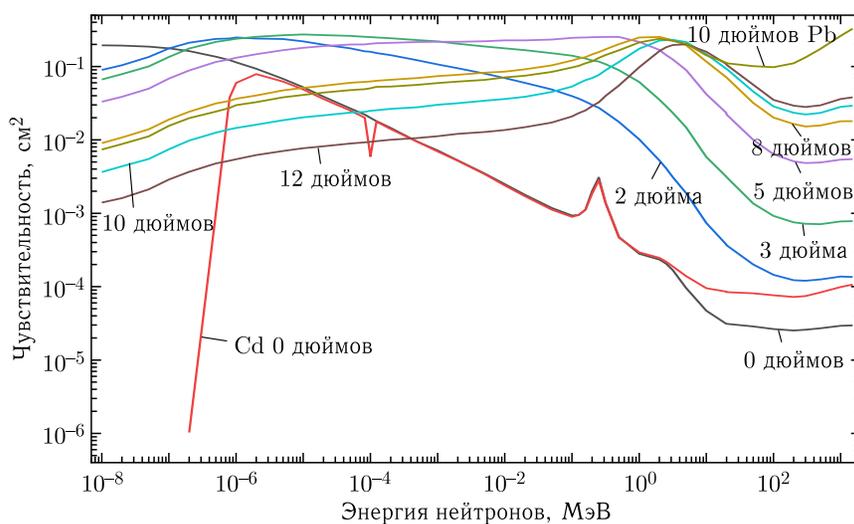


Рис. 2. Функции чувствительности детекторов, входящих в состав многосферного спектрометра

Здесь E_{\max} , E_{\min} — границы энергетического спектра; $R_i(E)$ [см²] — функция чувствительности i -го детектора. Измерения сводятся к получению набора значений N_i со всеми детекторами в точке измерения спектра. Таким образом, в результате измерений получается система уравнений (1) с числом уравнений, равным числу детекторов. В нашем случае $m \leq 9$.

Задача восстановления спектра нейтронов сводится к решению системы уравнений (1) относительно функции $\Phi(E)$, т.е. относится к классу обратных задач. В общем случае система m уравнений не имеет единственного решения, поскольку ограниченное число измерений m не может определить непрерывную функцию $\Phi(E)$. Поэтому спектр нейтронов представляется в виде ряда, где Φ_j есть средняя плотность потока нейтронов энергетической группы j (от E_j до E_{j+1}), а связь между скоростью счета детектора N_i и Φ_j определяется как

$$N_i = \sum_{j=1}^n R_{i,j} \Phi_j, \quad j = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где n есть число разбиений энергетического интервала, а $R_{i,j}$ представляет собой $R_i(E)$, усредненную по энергетической группе j . Уравнение (2) является приближением уравнения (1), причем степень приближения определяется числом n . Если $n \leq m$, то единственное решение относительно Φ_j существует и может быть найдено. На практике число m не может быть значительно увеличено, а спектр нейтронов желательно получить достаточно детальный (с большим числом разбиений n). Поэтому для нахождения спектра при $n > m$ применяются специальные математические методы решения некорректных обратных задач.

Восстановление спектров нейтронов на основе набора показаний многосферного спектрометра ОИЯИ с различными замедлителями осуществляется с помощью программы RECONST, реализующей метод статистической регуляризации для решения обратной задачи [11].

Неустойчивость решения обратной задачи связана с недостатком информации и ее качеством. Чтобы повысить устойчивость решения системы уравнений, ее стараются доопределить, применяя различные регуляризующие алгоритмы с добавлением той или иной (качественной и количественной) априорной информации об искомом спектре. Способы задания априорной информации о спектре нейтронов могут быть различными. Во многих случаях известна верхняя граница спектра нейтронов, определяемая либо формой спектра деления на реакторах, либо энергией ускоренных частиц на ускорителях. Иногда мы можем знать флюенс нейтронов в определенных энергетических границах и заложить эту величину как априорную информацию о спектре. Например, как априорную информацию о спектре нейтронов можно использовать, помимо замедляющих сфер разного диаметра, измерения с «голым» детектором (без замедлителя), покрытым кадмиевым чехлом и без такого чехла. Это дает нормировку спектра медленных нейтронов в докадмиевой области (до $\sim 0,5$ эВ — кадмиевой отсечки).

Функции чувствительности спектрометра ОИЯИ до энергии нейтронов 20 МэВ были рассчитаны в работе [12] с учетом конструктивных особенностей спектрометра ОИЯИ с помощью универсальной программы MCNP 4C транспорта нейтронов в веществе методом Монте-Карло. Для расчета ФЧ в области высоких энергий

использовалась версия программы MCNPX. Расчеты $R_i(E)$ были выполнены для всех замедлителей в геометриях передне-заднего (ПЗ) и изотропного направлений излучения (ИЗО) для набора значений энергий нейтронов от тепловых до 1,5 ГэВ.

В силу ряда причин, основной из которых является неточное знание степени облучения кристалла LiI(Eu) изотопом ${}^6\text{Li}$, реальные и расчетные функции чувствительности спектрометра могут систематически отличаться. Поэтому ФЧ нормируются на результаты градуировки замедлителей в поле нейтронного источника с хорошо известным спектром. Таким источником является ${}^{252}\text{Cf}$, спектр нейтронов которого представляет собой спектр деления. Градуировка заключается в измерении счета N_i спектрометра с i -м замедлителем на заданном расстоянии от источника и сопоставлении данного счета с результатом свертки энергетического спектра нейтронов источника на том же расстоянии с функцией чувствительности $R_i(E)$. При проведении градуировки всегда присутствует фон многократно рассеянных в окружающей среде нейтронов низких энергий. Для устранения вклада в счет спектрометра от этих рассеянных нейтронов производятся разностные измерения N_i с поглощающим конусом, устанавливаемым между источником и спектрометром.

По результатам градуировки спектрометра вне помещения в открытой геометрии было установлено, что расчетные значения соответствующих ФЧ завышены по отношению к экспериментальным в среднем в 1,67 раза. Этот градуировочный коэффициент использовался при обработке экспериментальных данных.

2. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ В ПОМЕЩЕНИЯХ УСТАНОВКИ ИРЕН

Спектры нейтронов измерялись 4 и 5 февраля 2020 г. в двух точках на первом этаже здания № 43, в котором расположена установка ИРЕН, вблизи от мишенного зала. Частота импульсов была равна 50 Гц, ширина на полувысоте электронного импульса — 80 нс, ток на мишени — 2,1 А, энергия электронов — 60 МэВ. Экспликация помещений первого этажа здания с точками измерений показана на рис. 3.

Точка 1 находилась в помещении вентиляционной комнаты напротив двери в мишенный зал ИРЕН. Монитор нейтронного поля располагался слева на расстоянии 2 м от спектрометра.

Измерение амплитудного спектра мониторного ${}^3\text{He}$ -счетчика в замедлителе производилось одновременно с набором амплитудного спектра спектрометром. Время измерений с разными конфигурациями замедлителей и «голового» счетчика в кадмиевом чехле и без него выбиралось таким образом, чтобы количество зарегистрированных спектрометром нейтронов составляло несколько тысяч, при этом количество нейтронов, зарегистрированных мониторным счетчиком, составляло несколько сотен тысяч. Характерное время измерения с одной конфигурацией спектрометра — 15–20 мин.

При восстановлении спектров нейтронов в качестве дополнительного условия задавалось ограничение на часть спектра с энергией нейтронов больше 60 МэВ. Это условие используется для того, чтобы «подавить» высокоэнергетичную часть спектра, исходя из того, что нейтронов с энергией больше 60 МэВ в нем должно быть очень мало. Для этого вводился дополнительный фиктивный детектор со счетом, равным $10^{-5}N_{12}$. Последняя энергетическая точка при восстановлении спектра нейтронов

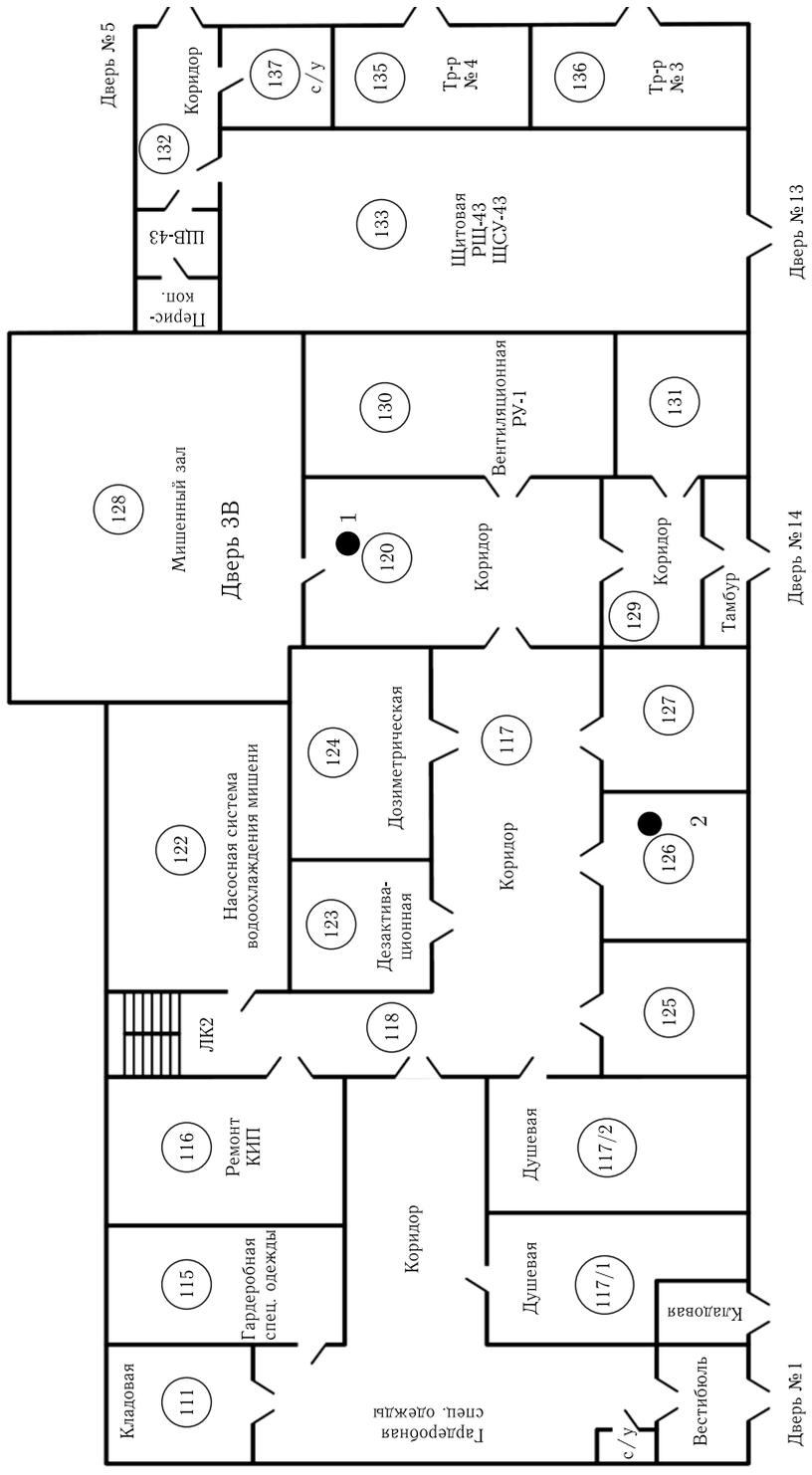


Рис. 3. План 1-го этажа здания № 43 и точки измерений спектров нейтронов

задавалась равной 159 МэВ с запасом, чтобы могло сработать дополнительное априорное условие об ограничении верхней границы энергии в спектре. Счета задавались с ошибкой 5 %.

Показания гетерогенной сферы диаметром 10 дюймов со свинцовой вставкой внутри, предназначенной для измерений «жестких» спектров нейтронов, не использовались при восстановлении спектров на ИРЕН, так как энергия нейтронов не превышала 60 МэВ.

Счета детектора спектрометра, вычисленные по восстановленному спектру нейтронов, различаются от экспериментально полученных значений максимум на 14 % (сфера 3 дюйма и голый детектор в кадмиевом чехле), а по другим сферам расхождение менее 10 %, что является вполне удовлетворительным результатом.

Поскольку функции чувствительности спектрометра рассчитаны для 100%-го обогащения сцинтиллятора LiI(Eu) изотопом ^6Li , а в реальном детекторе степень обогащения ^6Li меньше, то нужно было нормировать расчетные функции чувствительности на реальные с помощью градуировочного коэффициента.

Такой коэффициент был получен при градуировке спектрометра с эталонным источником нейтронов ^{252}Cf II разряда в открытой геометрии. Источник ^{252}Cf наиболее пригоден для градуировки, поскольку его энергетический спектр хорошо известен. Выход нейтронов из источника на момент его аттестации известен с точностью 8 %. Открытая геометрия означает, что градуировка была выполнена на открытом воздухе вне помещения для минимизации фона рассеянных в окружающей среде нейтронов. Для той же цели сферы спектрометра и источник были подняты над поверхностью земли на 2,5 м. При градуировке производится разностное измерение скорости счета детектора с различными сферами при фиксированном расстоянии от источника. Под разностными измерениями подразумевается, что для каждой сферы из скорости счета детектора вычтена скорость фонового счета за тенью конусом, размещаемым между сферой и источником и предназначенным для поглощения прямых нейтронов из источника, попадающих на сферу. Теневой конус гетерогенный: сталь плюс полиэтилен в кадмиевом чехле (рис. 4).

Для градуировки рассчитывались теоретические скорости счета спектрометра с каждой сферой путем свертки спектра нейтронов источника ^{252}Cf и известным вы-

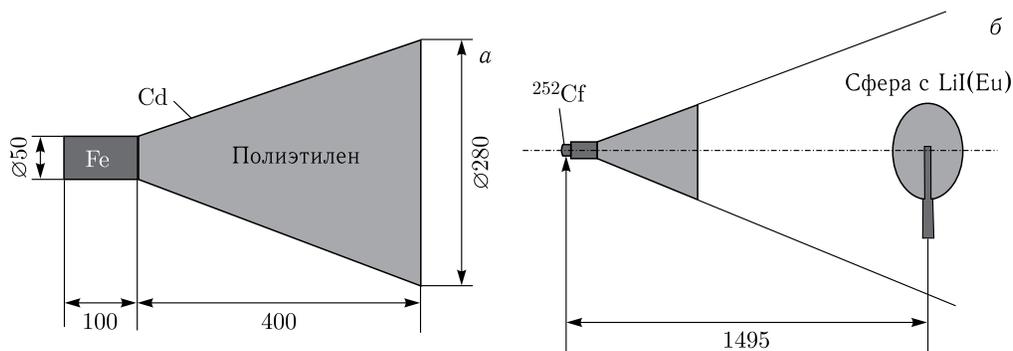


Рис. 4. а) Конструкция поглощающего конуса. б) Геометрия при измерении спектрометром Боннера фона рассеянных нейтронов (размеры в мм)

ходом с теоретическими функциями чувствительности. Градуировочный коэффициент равен усредненному по нескольким сферам отношению экспериментальной скорости счета к теоретической (расчетной) скорости счета детектора. По результатам градуировки этот коэффициент равен $1,67 \pm 0,11$. Восстановленные спектры приведены в единицах летаргии, как это принято для представления спектров, спадающих с энергией на много порядков, и показаны на рис. 5 и 6.

Измерения проводились в полях в основном рассеянного излучения. Тем не менее нужно учитывать, что в точке 1 также присутствует вклад прямого излучения из биологической защиты мишенного зала. В спектре, измеренном в точке 1, помимо тепловых и резонансных нейтронов, отчетливо проявляется накопление быстрых

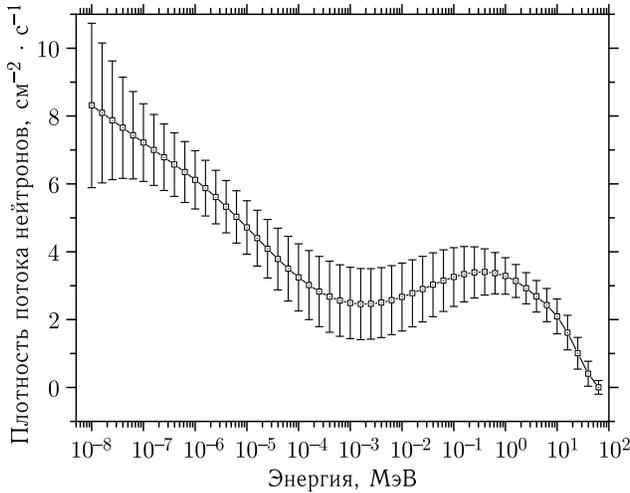


Рис. 5. Спектр нейтронов в точке 1

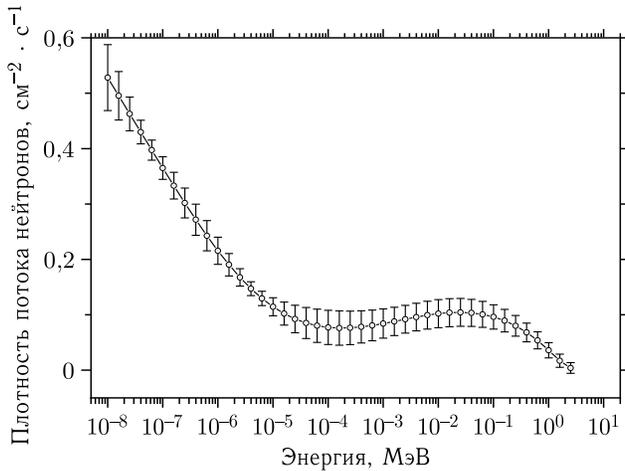


Рис. 6. Спектр нейтронов в точке 2

испарительных нейтронов с энергией до нескольких МэВ. Данный спектр формируется в условиях, когда нейтронопроизводящую мишень ИРЕН от спектрометра отделяют железная дверь с наполнителем из полиэтилена и бетонная стена толщиной 2 м.

Точка 2 располагалась в коридоре нижнего этажа, за несколькими бетонными стенами, т.е. в ней реализовывалась геометрия лабиринта. По этой причине плотность потока нейтронов в точке 2 при равных условиях была намного меньше, чем в точке 1. Спектр в точке 2 существенно «мягче», чем спектр в точке 1. Накопление быстрых нейтронов выражено слабее и их средняя энергия на порядок ниже, чем в спектре в точке 1. Зато вклад тепловых нейтронов в спектр заметно увеличился, что согласуется с представлением об условиях формирования этого спектра.

3. ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА НЕЙТРОНОВ В ТОЧКАХ 1 И 2 В ПОМЕЩЕНИЯХ УСТАНОВКИ ИРЕН

На основе измеренных энергетических спектров плотности потока нейтронов может быть рассчитана эффективная доза путем свертки спектров с коэффициентами конверсии флюенса нейтронов Φ в эффективную дозу e (E/Φ). Такие коэффициенты конверсии для некоторых элементарных частиц и ядер приведены в ICRP Publication 116 [13] для различных вариантов облучения человека. В частности, для нейтронов эти коэффициенты приведены в диапазоне энергий от 10^{-9} МэВ до 10 ГэВ. Национальные нормы радиационной безопасности [14] также декларируют значения коэффициентов конверсии, но до энергии нейтронов 20 МэВ. Поскольку энергия нейтронов в восстановленных спектрах простирается до ~ 60 МэВ, при расчете эффективной дозы нейтронов с энергиями более 20 МэВ по показаниям многосферного спектрометра использовались коэффициенты конверсии из работы ICRP Publication 116.

Для анализа полученных данных и определения радиационной обстановки на установке ИРЕН были выполнены вычисления мощности эффективной дозы для ИЗО и ПЗ геометрий облучения человека.

Использованная в расчетах энергетическая зависимость коэффициентов конверсии флюенса нейтронов в эффективную дозу в ПЗ и ИЗО геометрии облучения человека показана на рис. 7.

Мощность эффективной дозы нейтронного излучения в точках 1 и 2 была получена сверткой восстановленных спектров с коэффициентами конверсии для двух геометрий облучения и приведена в таблице.

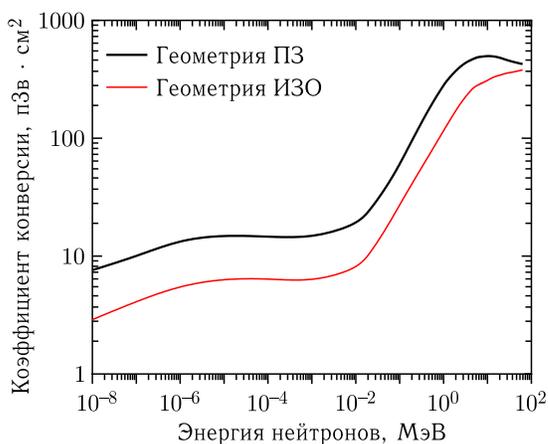


Рис. 7. Энергетическая зависимость коэффициентов конверсии флюенса нейтронов в эффективную дозу в ПЗ и ИЗО геометриях

Значение эффективной дозы нейтронов в точках 1 и 2 для разных геометрий облучения

Номер точки	Геометрия облучения	
	ПЗ, мкЗв/ч	ИЗО, мкЗв/ч
1	43,2	23,6
2	0,58	0,23

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены измерения спектров нейтронов в двух точках на первом этаже установки ИРЕН Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ при выводе на вольфрамовую мишень пучка электронов с энергией ~ 60 МэВ и средним током 5,4 мкА.

На основе восстановленных спектров получены значения мощности эффективных доз нейтронов в точках 1 и 2 на установке ИРЕН.

На основе полученных результатов эксперимента оценена радиационная обстановка на установке ИРЕН.

Ко времени публикации параметры ускорителя источника ИРЕН существенно изменились, энергия электронов выросла до 110 МэВ, частота импульсов увеличилась до 50 Гц. Работы по измерению спектров нейтронов за биологической защитой нейтропроизводящей мишени ИРЕН будут продолжены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блохин Г. Е., Блохинцев Д. И., Блюмкина Ю. А. и др. // АЭ. 1961. Т. 10. С. 437.
2. Франк И. М. Препринт ОИЯИ Р-674. Дубна, 1961.
3. Франк И. М. // ЭЧАЯ. 1972. Т. 2, вып. 4. С. 807.
4. Ананьев В. Д. и др. Препринт ОИЯИ 2372. Дубна, 1965.
5. Ананьев В. Д. и др. Препринт ОИЯИ 13-4395. Дубна, 1969.
6. Belikov O. V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2010. V. 205. P. 012053.
7. Shvetsov V. // Quant. Beam Sci. 2017. V. 1, No. 1. P. 6.
8. Sumbaev A., Kobets V., Shvetsov V., Dikansky N., Logatchov P. (IREN Collab.) // J. Instrum. 2020. V. 15. P. T11006.
9. Thomas D. J., Alevra A. V. Bonner Sphere Spectrometers — a Critical Review // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 476, No. 1. P. 12–20.
10. Котельников С. Г., Парайпан М., Тимошенко Г. Н., Трофимов А. С. Портативный и автономный вариант многошарового спектрометра нейтронов с мониторным датчиком для измерений в полевых условиях // ПТЭ. 2012. № 4. С. 104–105.
11. Турчин В. Ф., Козлов В. Л., Малкевич М. С. Использование методов математической статистики для решения некорректных задач // УФН. 1970. Т. 102. С. 3.
12. Тимошенко Г. Н., Мартинкович Й. Расчет функций чувствительности многошарового спектрометра нейтронов в области энергий до 20 МэВ. Препринт ОИЯИ Р16-2005-105. Дубна, 2005.
13. ICRP Publication 116. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures // Ann. ICRP. 2010. V. 40, No. 2–5. P. 1–257.
14. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2009.

Получено 26 февраля 2024 г.