

На правах рукописи

МАКАРОВ Александр Николаевич

**ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА ЭПИТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ
УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА
ВРЕМЯПРОЛЕТНЫМ МЕТОДОМ**

01.04.01 Приборы и методы
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ТАСКАЕВ – кандидат физико-математических наук,
Сергей Юрьевич Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КУТЕЕВ – доктор физико-математических наук,
Борис Васильевич профессор, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва, заместитель руководителя Отделения токамаков Курчатовского ядерно-технологического комплекса.

СКАЛЫГА – кандидат физико-математических наук,
Вадим Александрович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, заведующий лабораторией № 122 (лаборатория ионных источников).

ВЕДУЩАЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2015 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время в качестве одной из перспективных методик лечения злокачественных опухолей рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ). БНЗТ представляет собой одну из форм бинарной радиотерапии, использующей селективное накопление нерадиоактивных ядер бор-10 в опухолевых клетках и их высокую способность поглощать тепловой нейтрон. Поглощение нейтрона ядром ^{10}B приводит к экзотермической ядерной реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. Продукты реакции имеют малые длины пробега (несколько микрон, порядка размера клетки) в биологической ткани, поэтому большая часть энергии ядерной реакции выделяется в той клетке, которая содержала бор-10. Таким образом, селективное накопление бора и последующее облучение нейтронами должны приводить к разрушению клеток опухоли с относительно малыми повреждениями окружающих нормальных клеток.

Для отработки методики БНЗТ и внедрения ее в клиническую практику требуются источники эпитепловых нейтронов на основе ускорителей заряженных частиц. На данный момент в мире существует около десятка проектов ускорительных источников для БНЗТ (из них большинство находится в разработке и ни один ещё не готов к клиническим испытаниям). В ИЯФ СО РАН разработан источник нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишенью для генерации нейтронов с помощью реакции $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$. В постоянном режиме получен протонный пучок с энергией 2 МэВ и током 1,6 мА, осуществлена генерация нейтронов и проведены *in vitro* исследования с использованием клеток опухолей человека.

Методика БНЗТ предъявляет определенные требования к величине и спектру потока нейтронов. А именно, требуется не только высокая плотность потока нейтронов – $10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, но и оптимальная для БНЗТ энергия нейтронов в диапазоне от 1 кэВ до 30 кэВ. Присутствие быстрых нейтронов, медленных нейтронов и γ -квантов, приводящих к дополнительной нелокализованной дозе облучения, не желательно. Высокие требования к точности определения поглощенной дозы при проведении БНЗТ делают задачу определения энергетического спектра нейтронов чрезвычайно актуальной.

Для измерения спектра нейтронов на созданном ускорителе-тандеме нами предложено использовать времяпролетный метод, когда специальным образом генерируются короткие вспышки нейтронного излучения, которые затем регистрируются с помощью удаленного детектора. По времени запаздывания нейтронов определяется скорость и восстанавливается энергетический спектр. Для формирования необходимых коротких вспышек

нейтронов нами впервые предложено использовать пороговый характер генерации нейтронов в реакции протонов с литиевой мишенью ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, модулируя энергию протонов.

Цель работы

Целью работы является измерение спектра нейтронов, генерируемых на ускорительном источнике эпитепловых нейтронов в ИЯФ СО РАН. Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать модулятор для генерации всплеск нейтронов и выбрать адекватную геометрию измерений.
2. Разработать и испытать спектрометр для выбранного метода измерений.
3. Измерить энергетический спектр генерируемых нейтронов.
4. Провести анализ полученных результатов и сравнить их с расчетными данными.
5. Выработать предложения по улучшению предложенного метода измерения спектра нейтронов.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. При определяющем участии автора разработан и изготовлен генератор импульсов высокого напряжения, собран и откалиброван детектор нейтронов. Автором лично определены и решены специфические проблемы измерения спектра нейтронов предложенным способом. Автором лично получены и проанализированы экспериментальные результаты и восстановлен энергетический спектр нейтронов, генерируемых на ускорительном источнике эпитепловых нейтронов.

Научная новизна работы

Предложена и впервые экспериментально осуществлена генерация коротких импульсов нейтронного излучения в пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ за счет быстрой модуляции энергии протонного пучка при подаче импульсов высокого напряжения на электрически изолированную мишень.

На основе нового способа генерации коротких импульсов нейтронного излучения разработан времяпролетный спектрометр. С помощью созданного спектрометра измерен спектр нейтронов на ускорителе-тандеме для БНЗТ.

Предложен и реализован способ определения соотношения сигнал/шум при проведении измерений спектра нейтронов. Предложенный способ позволяет в реальном режиме времени отслеживать изменение соотношения сигнал/шум в эксперименте и при необходимости корректировать положение

и энергию протонного пучка на нейтроногенерирующей мишени. Способ зарегистрирован в качестве объекта интеллектуальной собственности «ноу-хау».

Научная и практическая ценность работы

Основная теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что в источнике нейтронов на основе ускорителя-гандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишенью предложен и реализован новый метод измерения энергетического спектра нейтронов. Практическая значимость заключается в том, что благодаря применению этого метода с высокой точностью измерен спектр генерируемых нейтронов и экспериментально продемонстрировано его соответствие требованиям БНЗТ.

Предложенный новый принцип создания коротких импульсов излучения может быть использован в пороговых реакциях на ускорителях как для реализации времяпролетного метода измерения спектров частиц, так и для других приложений. Результаты работы могут быть использованы также при расчете поглощенной дозы в *in vitro* экспериментах с использованием клеток опухолей человека и в *in vivo* экспериментах с лабораторными животными.

Основные положения, выносимые на защиту:

Разработка нового метода измерения энергетического спектра нейтронов путем генерации вспышек нейтронного излучения в припороговом режиме на стационарном пучке заряженных частиц.

Разработка и испытания времяпролетной диагностики для измерения спектра эпитепловых нейтронов.

Измерение энергетического спектра нейтронов, генерируемых в результате реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ при энергии протонов 1915 ± 5 кэВ.

Апробация диссертации

Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН. Материалы диссертации были представлены автором на международных конференциях: 3-й Международной конференции по текущим проблемам ядерной физики и атомной энергии (Киев, Украина, 2010), XIV и XVI Международных конгрессах по нейтронозахватной терапии (Буэнос-Айрес, Аргентина, 2010; Хельсинки, Финляндия, 2014), 6-ой и 7-ой Школе молодых исследователей в области нейтронозахватной терапии (Синьчжу, Тайвань, 2011; Гранада, Испания, 2013).

На проведение исследований по теме диссертации была получена поддержка со стороны Министерства образования и науки РФ в рамках программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» в 2010-2011 гг. (Госконтракт № П21 от 25 марта 2010 г.).

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 4 – в рекомендованных ВАК рецензируемых научных журналах, 5 – в трудах международных научных конференций, а также 1 в виде «ноу-хау».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, изложена на 109 страницах, включая 57 иллюстраций, и содержит 76 наименований библиографии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится краткое описание методики нейтронозахватной терапии, перечислены требования, предъявляемые к пучку нейтронов, обоснована актуальность разработки и создания диагностики для измерения спектра нейтронов, определена цель, сформулированы задачи, отмечена научная новизна темы диссертации, практическая значимость и уникальные особенности предложенного метода измерения энергетического спектра нейтронов.

В первой главе приводится обзор известных методов измерения спектра нейтронов и анализ их применимости на ускорителе для БНЗТ. Рассмотрены механический монохроматор, механический селектор, импульсный ускоритель, кристаллический монохроматор, магнитная нейтронография, измерение энергии образующихся ядер отдачи, детекторы на основе ядерных реакций, полупроводниковые детекторы, активационные фольги, сферы Боннера и пузырьковые детекторы. Показано, что для детального измерения спектра нейтронов эпитеплового диапазона энергий подходит только активационный метод, который не отличается высокой точностью, и метод импульсного ускорителя. Отмечено, что для ускорителя, рассчитанного на постоянный ток, метод импульсного ускорителя необходимо модифицировать.

Во второй главе приводится идея нового метода измерения энергетического спектра нейтронов и детальное описание созданного на этой основе времяпролетного спектрометра. Глава начинается с описания источника эпитепловых нейтронов на базе ускорителя-гандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишенью. Ускоритель предназначен для получения стационарного протонного пучка с энергией до 2 МэВ с монохроматичностью по энергии 0,1 % и током до 1,6 мА со стабильностью 0,5 %. Генерация нейтронов осуществляется в результате реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ при сбросе протонного пучка на интенсивно охлаждаемую мишень с напыленным литиевым слоем.

В § 2.2 описывается идея нового метода измерения спектра нейтронов. Она состоит в генерации коротких импульсов нейтронного излучения для пороговых реакций при стационарном пучке заряженных частиц и в измерении времени пролета удаленным детектором. Для генерации короткого импульса нейтронного излучения предложено использовать особенность реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ – резкий рост сечения рождения нейтронов вблизи порога реакции (Рис. 1).

Если использовать стационарный протонный пучок с энергией ниже порога генерации нейтронов (1,882 МэВ), то, подав на электрически изолированную литиевую мишень короткий импульс отрицательного напряжения, можно увеличить энергию протонов до величины выше порога и осуществить короткий импульс нейтронного излучения.

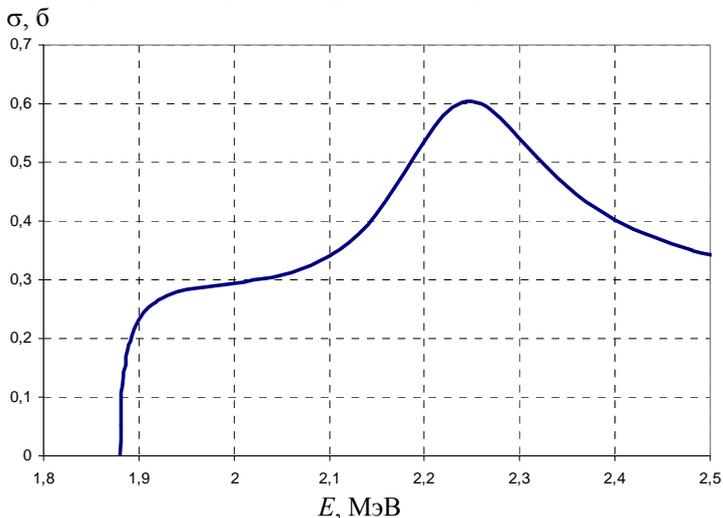


Рис. 1. Сечение реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ из базы данных ENDF/B-VII.1.

В § 2.3 представлены и описаны основные узлы созданного времяпролетного спектрометра: нейтронный детектор, блок измерения времени пролета, блок генерации высоковольтных импульсов и система изоляции мишени; а также описана их настройка и калибровка.

Для регистрации нейтронов использован детектор на основе активированного церием литийсодержащего сцинтиллятора GS20 диаметром 18 мм, толщиной 4 мм. Регистрация нейтронов осуществляется по реакции $n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} + \alpha + 4,78 \text{ МэВ}$. Продукты реакции – α -частицы – вызывают в стекле импульсы сцинтилляции, регистрируемые фотозлектронным умножителем. Использование литийсодержащего стекла GS20 позволяет продлить область эффективной регистрации нейтронов вплоть до 500 кэВ в условиях сопутствующего γ -излучения.

Блок измерения времени пролёта включает в себя одноканальный мультистоповый время-цифровой преобразователь ВЦП-1, осуществляющий оцифровку интервалов времени между сигналами СТАРТ и СТОП в интервале до 100 мс с дискретностью 100 нс. После сигнала СТАРТ блок ВЦП-1 способен воспринять до восьми сигналов СТОП, что позволяет за импульс зарегистрировать до 8 нейтронов. Для проведения времяпролетного эксперимента была написана программа, осуществляющая взаимодействие ВЦП и генератора импульсов, вывод данных в режиме реального времени, а также их фильтрацию.

Схема генерации высоковольтных импульсов упрощенно изображена на Рис. 2. Прямоугольные импульсы высокого напряжения создаются следующим образом. Сначала с помощью генератора постоянного напряжения (установка выпрямительная УВ-50-50) подается 20 кВ на схему импульсного питания, которая осуществляет зарядку двойной формирующей линии (ДФЛ) и удвоение напряжения на ней до 40 кВ. После срабатывания тиратрона ТПИ1-10 к/50, работающего в качестве ключа, ДФЛ создает отрицательный короткий 200 нс импульс прямоугольной формы амплитудой 40 кВ на согласованной нагрузке $R_c = 150 \text{ Ом}$, подключенной к электрически изолированной нейтроногенерирующей мишени.

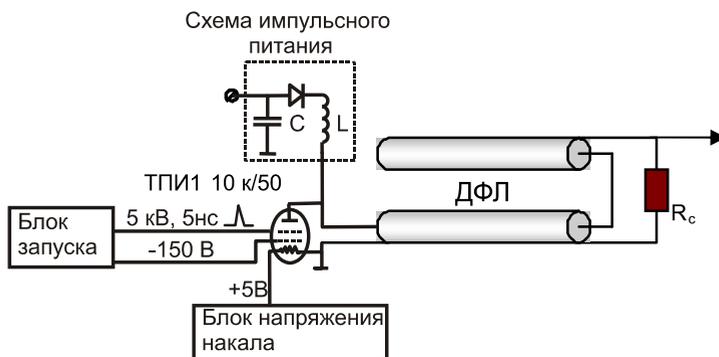


Рис. 2. Схема генерации высоковольтных импульсов.

Для обеспечения электрической изоляции от корпуса установки нейтроногенерирующая мишень была подсоединена к установке через керамический изолятор (вакуумноплотная керамика 22ХС на основе оксида алюминия и марганца) с вакуумными фланцами и подвешена на четырех стержнях из оргстекла. Проведенные испытания показали отсутствие пробоев по изолятору при подаче статического и импульсного напряжения с амплитудой до 50 кВ.

В § 2.4 описаны проведенные предварительные и вспомогательные эксперименты. Методом Монте-Карло с помощью программы ПРИЗМА

проведено численное моделирование переноса протонов, нейтронов и γ -квантов в нейтронообразующей мишени и ее окружении. Приведены расчётные спектры для полной (Рис. 3) и упрощённой геометрии мишени. С помощью пузырьковых детекторов BDT и BD100R произведена предварительная оценка получаемого спектра. За время генерации нейтронов в детекторе BDT образовалось в 15 – 20 раз больше пузырьков, чем в детекторе BD100R, что соответствует расчетному спектру на Рис. 3.

$Z, 10^6 / \text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{ед. летаргии}$

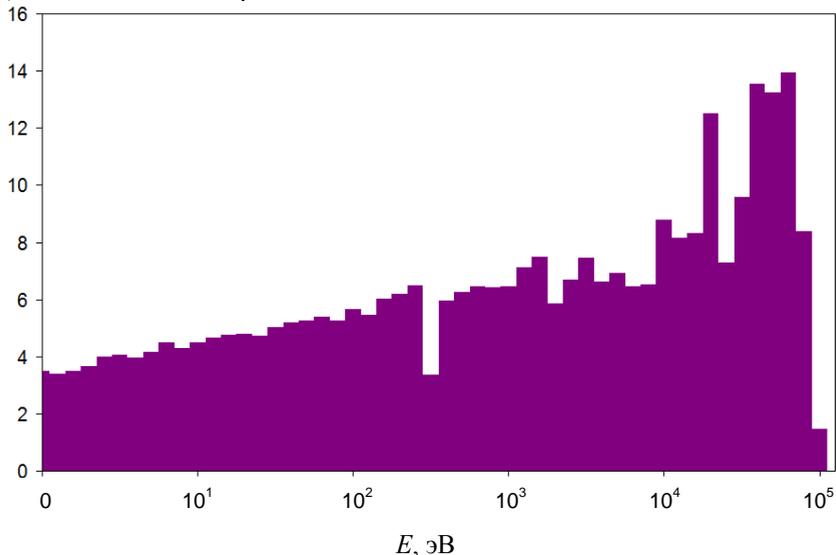


Рис. 3. Расчетный спектр нейтронов для полной геометрии мишени.

Проведенная оценка времени набора статистики для измерения спектра показала, что при токе протонов 1 мА и энергии 1,915 МэВ для набора 1000 событий потребуется время порядка 1 часа, что вполне разумно.

Энергия протонов равна сумме удвоенного потенциала высоковольтного электрода ускорителя и энергии инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов (21 кэВ) за вычетом потерь энергии ионов в обдирочной мишени 0,6 кэВ. Потенциал высоковольтного электрода измеряется омическим делителем, сопротивление которого может меняться в зависимости от температуры в помещении и от продолжительности работы. Поэтому для точного определения энергии протонов осуществлена калибровка напряжения ускорителя по порогу генерации нейтронов 1,882 МэВ. Напряжение высоковольтного электрода ускорителя поднимали с 860 до 960 кВ линейно со скоростью 1 кВ/с, одновременно при этом измеряли скорость счета нейтронного детектора. Порог рождения нейтронов оказался равен 910 ± 2 кВ. Таким образом, выставляя напряжение 910 кВ на

ускорителе, мы получаем, что энергия протонов становится равной 1,882 МэВ.

Возможность доускорения протонов путем приложения высокого напряжения к нейтроногенерирующей мишени была проверена следующим образом. Напряжение на ускорителе устанавливалось равным 910 кВ, т.е. в соответствии с проведенной калибровкой энергия протонного пучка при попадании его на мишень оказывалась ниже порога генерации нейтронов. С помощью нейтронного детектора фиксировалось отсутствие нейтронов. Затем при неизменном напряжении на ускорителе при помощи высоковольтного генератора Spellman STR150N на электрически изолированную нейтроногенерирующую мишень подавалось постоянное отрицательное напряжение амплитудой до 40 кВ и измерялся получаемый из мишени поток нейтронов. Показано, что при подаче статического напряжения на мишень, выход нейтронов возрастает пропорционально поданному напряжению.

Третья глава посвящена измерению спектра нейтронов. В начале главы приводится постановка времяпролетного эксперимента: прямоугольные импульсы с амплитудой 40 кВ, длительностью 200 нс и частотой 100 Гц подаются на электрически изолированную литиевую мишень; предварительно откалиброванный по энергии ускоритель сбрасывает одновременно на литиевую мишень стационарный поток протонов с энергией 1875 ± 5 кэВ; удаленный детектор регистрирует полученные пачки нейтронов; синхронизированная с высоковольтными импульсами схема измерения времени считывает нейтронные импульсы с детектора и отправляет полученные времена пролёта в файл; далее из полученных данных восстанавливается спектр генерируемых нейтронов.

Значительная часть главы отведена описанию предложенных и реализованных процедур по подавлению шумов, мешающих измерению. Часть из этих шумов общая почти для всех методов нейтронной спектроскопии: шум от сопутствующих γ -квантов и шум от отраженных нейтронов. А другая часть – специфическая для предложенного метода: шум от высокочастотных электромагнитных наводок, шум от паразитных нейтронов, шум из-за нестабильности напряжения ускорителя.

Уменьшение влияния сопутствующих γ -квантов достигнуто применением для нейтронного детектора амплитудного дискриминатора и свинцовой защиты толщиной 7 см. Влияние отраженных нейтронов оценено с помощью активационных фольг ^{115}In и уменьшено путём удаления нейтронного детектора от стен и пола, что привело к сокращению пролётной базы до 78 см.

Подавление электромагнитных наводок, вызванных подачей высоковольтных импульсов на изолированную мишень, осуществлялось комплексом стандартных для таких случаев мер: установка высокочастотных

фильтров питания, ферритовых колец, двойная экранировка проводов, помещение всей аппаратуры внутрь заземленных экранов.

Выяснена причина появления паразитных нейтронов: генерация нейтронов происходит при попадании «гало» протонного пучка на стенки вакуумного тракта в результате реакции $^{55}\text{Mn}(p,n)^{55}\text{Fe}$, поскольку марганец содержится в качестве 2% примеси в нержавеющей стали. Хотя сечение взаимодействия протонов с марганцем составляет всего несколько миллибарн и доля попадающего на стенки пучка минимальна, однако в эксперименте приходится учитывать, что получающиеся в результате этой реакции нейтроны генерируются постоянно, а не только во время 200 нс вспышки полезных нейтронов. Так же генерация паразитных нейтронов возможна в результате взаимодействием α -частиц, генерируемых протонами в литии в ходе реакции $^7\text{Li}(p,\alpha)\alpha$, с конструкционными материалами мишенного узла, преимущественно медью в результате реакций $^{63}\text{Cu}(\alpha,n)^{66}\text{Ga}$ и $^{65}\text{Cu}(\alpha,n)^{67}\text{Ga}$. Для решения данной проблемы проведено облучение различных конструкционных материалов протонным пучком: измерены мощность дозы и спектр возникающего гамма-излучения, мощность дозы нейтронного излучения и измерена активация образцов. В результате проведенных исследований в качестве защиты тракта от протонного пучка выбрана и установлена молибденовая фольга, которая не активируется, не генерирует нейтроны и создает минимальный поток сопутствующих γ -квантов. В качестве замены медной подложки мишени предложен тантал.

Еще одна сложность связана с нестабильным напряжением на ускорителе. Электростатический ускоритель-тандем обеспечивает высокую стабильность энергии протонного пучка – 10 кэВ, но для времяпролетного способа измерения спектра нейтронов такая стабильность критична, поскольку при превышении порога энергии протонов 1,882 МэВ генерируется большой поток шумовых нейтронов. Каждая вспышка нейтронов, вызванная скачком энергии протонов, может дать до 1000 и более шумовых событий на измеряемом в этот момент спектре, уничтожив несколько часов набора статистики. Для исключения шумовых нейтронных вспышек была использована программная фильтрация, которая в реальном режиме времени отслеживала напряжение на ускорителе и набирала статистику по спектру нейтронов. В том случае, когда напряжение на ускорителе выходило за установленные границы, набор статистики прекращался, а при восстановлении напряжения – автоматически возобновлялся. Благодаря работе программы удалось ближе подойти к порогу рождения нейтронов (до 1875 ± 5 кэВ) и отсеять фоновые выбросы. Таким образом, спектр нейтронов измерялся при энергии протонов 1915 ± 5 кэВ.

Также помимо импульсного характера нестабильности напряжения на ускорителе наблюдалось дополнительное медленное изменение напряжения (единицы киловольт в час), которое регистрировалось с помощью

дополнительного АЦП по высоте шумовых нейтронных выбросов и приводило к уходу протонного пучка с мишени. Поскольку подача высоковольтных импульсов на мишень не совместима с имеющимися диагностиками пучка на мишени, то смещение пучка не представлялось возможным откорректировать. Поэтому в качестве дополнительной диагностики было предложено использовать следующий метод. Интервал, в котором происходит регистрация нейтронов с помощью ВЦП-1, составляет 100 мкс, причем в первые 50 мкс при расположении нейтронного детектора на удалении 78 см измеряются энергии нейтронов в диапазоне от 2 эВ до 200 кэВ, а в последующие 50 мкс – более медленные. Отказавшись от регистрации медленных нейтронов, возможно измерять уровень шума от случайных событий. Для этого достаточно запустить регистрацию нейтронных событий на ВЦП-1 не одновременно с высоковольтным импульсом, вызывающим вспышку нейтронов, а на 50 мкс раньше. Пока не произошла нейтронная вспышка, нейтронный детектор регистрирует только шумовой сигнал, после импульса – и полезный сигнал тоже. Пример, демонстрирующий работу этого метода в процессе набора статистики по спектру нейтронов, представлен на Рис. 4. Таким образом, в любой момент времени можно отслеживать реальное соотношение сигнал/шум. Если это соотношение начинает ухудшаться – значит необходима ручная коррекция положения и/или энергии пучка для более точного попадания в мишень. Детально этот метод определения соотношения сигнал/шум в реальном режиме времени описан автором в ноу-хау.

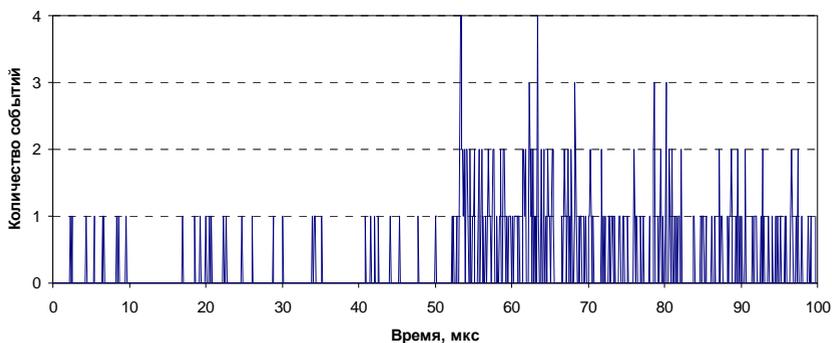


Рис. 4. Процесс набора статистики во время эксперимента. Первые 50 мкс показывают только шумовые сигналы. Следующие 50 мкс отображают значение «сигнал + шум».

В конце главы приводится обсуждение полученных результатов, оценка погрешностей и сравнение измеренного спектра с расчетом. На Рис. 5 представлены результаты измерения спектра нейтронов, суммированные за пять дней набора статистики.

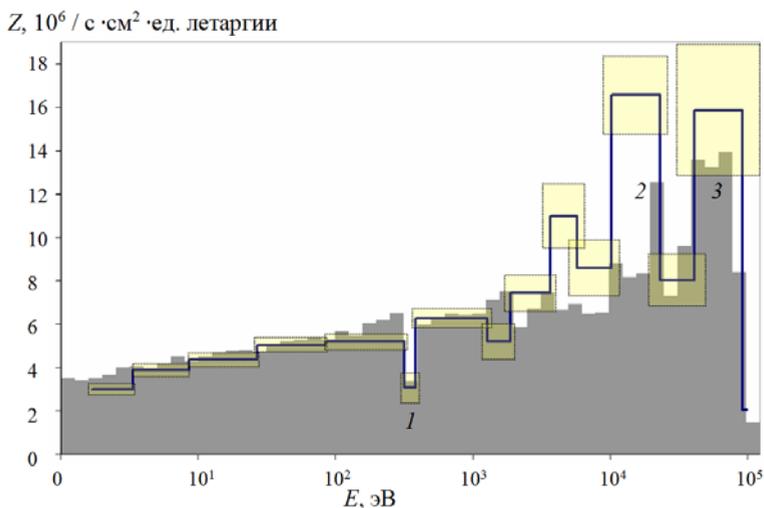


Рис. 5. Результат измерения спектра нейтронов (линия), наложенный на расчет (столбцы). Прямоугольные области отображают погрешности. Цифрами отмечены характерные особенности спектра.

Общее время работы времяпролетной диагностики составило около 15 часов, за это время на спектре было набрано 1100 событий. На Рис. 5 наблюдается ярко выраженный провал 1 в потоке нейтронов в области 300-400 эВ как в расчетном спектре, так и в измеренном. Этот провал связан с рассеянием нейтронов на ядрах ^{55}Mn , присутствующих в составе нержавеющей стали в количестве 2 %. В этой области энергий сечение рассеяния нейтронов на ^{55}Mn имеет достаточно широкий пик с максимумом в 3232 б при 340 эВ. Цифрами 2 и 3 отмечены пики в потоке нейтронов, которые обусловлены их свободным пролетом сквозь железо, поскольку при энергиях 24,5, 72,9 и 82,0 кэВ сечение рассеяния нейтронов на ядрах ^{56}Fe имеет величину на 3 порядка меньше характерных сечений рассеяния в области энергий от 1 до 100 кэВ.

В заключении представлены основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена, разработана и впервые реализована импульсная генерация нейтронов со стационарным протонным пучком путем подачи коротких импульсов отрицательного напряжения на электрически изолированную нейтроногенерирующую мишень при использовании пороговой реакции генерации нейтронов. Импульсная генерация нейтронов позволяет применить времяпролетный метод для измерения спектра нейтронов.

2. Разработан, изготовлен и применен времяпролетный спектрометр, включающий в себя детектор нейтронов с высокой эффективностью регистрации в области эпитепловых энергий, генератор 200 нс 100 Гц 40 кВ импульсов напряжения прямоугольной формы, время-цифровой преобразователь и специально написанное программное обеспечение.

3. С высокой степенью детализации измерен спектр нейтронов, генерируемых в результате реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ на ускорительном источнике эпитепловых нейтронов ИЯФ СО РАН при энергии протонов 1915 ± 5 кэВ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.С. Кузнецов, Г.Н. Малышкин, А.Н. Макаров, И.Н. Сорокин, Ю.С. Суляев, С.Ю. Таскаев. Первые эксперименты по регистрации нейтронов на ускорительном источнике для бор-нейтронозахватной терапии. - Письма в ЖТФ, 35, вып. 8, 2009. - с. 1-6.
2. V. Aleynik, B. Bayanov, A. Burdakov, A. Kuznetsov, A. Makarov, S. Sinitskii, S. Taskaev. The time-of-flight technique for the neutron spectrum measurement on VITA-facility. - Proceedings of the 3rd Intern. Conf. on Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv 2010), June 7-12, 2010, Kyiv, Ukraine. - 559-562.
3. B. Bayanov, A. Burdakov, A. Kuznetsov, A. Makarov, S. Sinitskii, Yu. Sulyaev, S. Taskaev. Dosimetry and spectrometry at accelerator based neutron source for boron neutron capture therapy. - Radiation Measurements, 45, 2010. - 1462-1464.
4. V. Aleinik, B. Bayanov, A. Burdakov, A. Makarov, S. Sinitskiy and S. Taskaev. New technical solution for use the time-of-flight technique to measure neutron spectra. - Proceedings of 14th International Congress on Neutron Capture Therapy, October 25-29, 2010, Buenos Aires, Argentina. - 511-514.
5. V. Aleynik, B. Bayanov, A. Burdakov, A. Makarov, S. Sinitskiy, S. Taskaev. New technical solution for using the time-of-flight technique to measure neutron spectra. - Applied Radiation and Isotopes, 69, 2011. - 1639-1641.
6. V. Aleynik, B. Bayanov, A. Burdakov, D. Kasatov, A. Makarov, S. Sinitskiy, I. Shudlo and S. Taskaev. New technical solution for using the time-of-flight technique to measure neutron spectra. - The Front Edge of BNCT Develop-ment. Proceedings of the 6th Young Researchers Boron Neutron Capture Therapy Meeting, December 4-8, 2011, Hsinchu, Taiwan (R.O.C). - 152-157.
7. V. Aleynik, D. Kasatov, A. Kuznetsov, A. Makarov, S. Sinitskiy, S. Taskaev, I. Shchudlo. Neutron spectrum measurement on the tandem accelerator for BNCT using a new time-of-flight method. - Book of abstracts of the 7th Young Researchers Boron Neutron Capture Therapy Meeting, September 22-26, 2013, Granada, Spain. - 53.
8. А. Н. Макаров и С. Ю. Таскаев. Способ определения соотношения сигнал/шум во время измерения энергетического спектра нейтронов времяпролетным методом. – Ноу-хау (НГУ), № 19 от 16.12.2013.
9. В.И. Алейник, Д.А. Касатов, А.Н. Макаров, С.Ю. Таскаев. Измерение спектра нейтронов ускорительного источника времяпролетным методом. - Приборы и техника эксперимента, 4, 2014. – с. 9-13.
10. A. Makarov, D. Kasatov, A. Kuznetsov, S. Taskaev. Problems of neutron spectrum measurements with TOF technique and their solutions. - Book of abstracts of the 16th International Congress on Neutron Capture Therapy, June 14-19, 2014, Helsinki, Finland. - 198-199.

МАКАРОВ Александр Николаевич

**Измерение спектра эпитепловых нейтронов
ускорительного источника
временпролетным методом**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 20.10. 2015 г.

Подписано в печать 21.10. 2015 г.

Формат 60x90 1/16. Объем 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 19

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11