

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ФГБУН Институт сильноточной
электроники СО РАН
чл.-кор. РАН



Н. А. Ратахин

Н. А. Ратахин
26 ноября 2015 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Макарова Александра Николаевича «Измерение спектра эпитепловых нейтронов ускорительного источника времяпролетным методом», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертационная работа Макарова А.Н. посвящена решению задачи измерения спектра эпитепловых нейтронов, генерируемых на ускорительном источнике для использования в бор-нейтронзахватной терапии (БНЗТ) при лечении злокачественных опухолей. Для достижения поставленной цели диссертации в работе решается ряд конкретных задач: разработка модулятора для генерации вспышек нейтронов; выбор методики измерения, разработка и испытание спектрометра; измерение энергетического спектра нейтронов; анализ полученных результатов и выработка рекомендаций по улучшению предложенного метода измерений.

Тематика диссертации относится к развитию приборов и методов экспериментальной физики, а именно получению прецизионных данных о спектрах нейтронов для использования в различных приложениях. Тематика работы является актуальной; она соответствует следующему направлению в разделе «II. Физические науки» Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013—2020 годы, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. № 2237-р: II.15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине. Результаты данной работы соответствуют Перечню критических технологий Российской Федерации утвержденных Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года №899: п.22 Технологии снижения потерь от социально значимых заболеваний.

Актуальность решаемой в диссертации задачи определяется потребностью в развитии перспективных методов клинической онкологии – использовании для радиотерапии плотноионизирующих частиц, в частности нейтронов. Нейтронная терапия обладает более высокой эффективностью поражения раковых клеток по сравнению с традиционной лучевой терапией электронами, рентгеновским и γ -излучением. Одним из наиболее перспективных методов является бор-нейтронзахватная терапия (БНЗТ). В настоящее время БНЗТ является скорее альтернативным и экспериментальным методом терапии. Требуется дальнейших усилий физиков, химиков, медиков для внедрения этого метода в повседневную практику лечения онкологических заболеваний. МАГАТЭ выработаны рекомендации для терапевтических пучков эпитепловых нейтронов, в

которых заданы соотношения потоков тепловых, эпитепловых и быстрых нейтронов. Таким образом, задача определения спектра нейтронов действующих и разрабатываемых установок для проведения БНЗТ является актуальной.

Диссертационная работа Макарова А.Н. представлена на 109 страницах, содержит 57 иллюстраций и список литературы из 76 наименований. Работа включает введение, три главы и заключение.

Во введении дано описание методики БНЗТ и обосновывается актуальность исследований, определены цель и задачи диссертационной работы, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена выбору метода измерения спектра эпитепловых нейтронов. В главе дан обзор существующих методов измерения спектров нейтронов. Проводится анализ возможности использования этих методов для решения поставленной в диссертации задачи. Сделан вывод о возможности использования времяпролетной методики и модифицированного метода импульсного ускорителя.

Во второй главе описывается времяпролетный метод измерения спектра нейтронов. В первом разделе представлен источник нейтронов на базе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишенью. Описываются принципы работы установки и ее специфические особенности. Во втором разделе главы рассматриваются схема и особенности реализации времяпролетного метода на ускорителе-тандеме. Автором предложено использовать особенности порогового характера и резкого роста сечения реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ для генерации импульсов нейтронов на стационарном протонном пучке за счет дополнительного ускорения протонов до энергии выше пороговой с помощью импульсов отрицательного напряжения, подаваемых на литиевую мишень. В третьем разделе обсуждаются составные элементы времяпролетного спектрометра (нейтронный детектор, блок измерения времени пролета, блок генерации высоковольтных импульсов) и вопросы электрической изоляции нейтроногенерирующей мишени. В четвертом разделе приведены результаты предварительных расчетов и вспомогательных экспериментов, проводится оценка энергетического разрешения диагностики и необходимого времени набора статистики.

Третья глава посвящена экспериментам по регистрации спектра эпитепловых нейтронов. В первом разделе описывается схема эксперимента. Второй раздел главы посвящен подавлению шумов: электромагнитные наводки, шумовые нейтроны, шумовые γ -кванты. Предложено решение по фильтрации импульсов шумовых нейтронов, связанных с нестабильностью энергии протонного пучка. Предложен метод контроля положения протонного пучка, основанный на отслеживании в реальном времени соотношения сигнал/шум в процессе набора данных. В третьем разделе представлены результаты эксперимента и проводится их обсуждение. Представлен спектр нейтронов в диапазоне от 2 эВ до 100 кэВ. Проведено сравнение полученного экспериментального спектра с расчетным. Сделана оценка погрешности полученного спектра нейтронов. Даны рекомендации по дальнейшему улучшению экспериментального метода.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

По материалам диссертационной работы опубликовано 10 работ: 4 - в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК; 5 - в материалах конференций; зарегистрирован 1 объект интеллектуальной собственности в виде "ноу-хау". Материалы диссертации апробированы на научных семинарах ИЯФ СО РАН и представлены на 5 международных конференциях. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

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.

Достоверность и обоснованность научных результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается использованием известных экспериментальных методик, имеющимся соответствием между результатами предварительных численных расчетов и результатами эксперимента.

Материалы диссертационной работы Макарова А.Н. рассмотрены на открытом научном семинаре отдела высоких плотностей энергии ИСЭ СО РАН 26 ноября 2015 года. В семинаре приняли участие 26 сотрудников института, в том числе 1 член-корреспондент РАН, 5 докторов и 6 кандидатов наук.

Рассмотрев и обсудив диссертацию Макарова А.Н., участники семинара пришли к следующему заключению:

Представленная диссертация представляет собой законченное исследование. В работе содержится решение актуальной научной задачи, имеющей значение для развития экспериментальных методов ядерной физики. Работа выполнена на высоком научном уровне и ее тематика соответствует специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Личный вклад автора в получении представленных научных результатов является определяющим. При реализации времяпролетной методики автором разработан и изготовлен генератор импульсов высокого напряжения, собран и откалиброван детектор нейтронов. При проведении экспериментов по регистрации спектра нейтронов автором решены специфические проблемы, вносящие погрешности в проводимые измерения. Автор лично проводил анализ полученных экспериментальных данных и восстановление спектра нейтронов.

Научная новизна работы состоит в том, что автором предложен и реализован новый метод генерации импульсов нейтронов на стационарном пучке протонов, что позволило использовать времяпролетный метод для определения спектра нейтронов. Практическая ценность данной работы заключается в том, что был детально измерен спектр нейтронов на установке ускорительного типа. Подтверждена возможность использования таких установок для проведения БНЗТ. Предложенный метод измерения спектра нейтронов может и должен быть использован при разработке установок ускорительного типа для БНЗТ, а также в процессе их дальнейшей эксплуатации в медицинских учреждениях для контроля качества нейтронного пучка. Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), ФЭИ (г. Обнинск), ОИЯИ (г. Дубна), ВНИИТФ (г. Снежинск), НИИЭФА (г. Санкт-Петербург).

По материалу представленной диссертационной работы необходимо сделать несколько замечаний:

1. В диссертации недостаточно четко сформулированы требования к методике по определению спектра эпитепловых нейтронов. Работа имеет явную практическую

направленность, изначально предполагается, что результаты работы будут использованы при разработке и эксплуатации установок для бор-нейтронзахватной терапии. В связи с этим, требования к методике должны включать не только физические параметры (диапазон измерений, энергетическое разрешение), но и такие критерии, как простота реализации метода, его стоимость, надежность аппаратуры, возможность автоматизации измерений и т.д. Наличие таких требований, позволило бы лучше структурировать те части диссертационной работы, в которых проводится сравнение и анализ различных методов для измерения спектров нейтронов, а также раздела, в котором даются рекомендации по улучшению предложенного метода.

2. Вызывает сомнение достоверность предварительной оценки спектра эпитепальных нейтронов с помощью пузырьковых детекторов. Для этих целей были использованы пузырьковый детекторы BDT и BD100R, предназначенные для проведения измерений в другом диапазоне энергий. Производитель не предоставляет информации об эффективности регистрации нейтронов этими детекторами в интересующем автора работы диапазоне энергий нейтронов. В диссертации не упоминается о калибровке пузырьковых детекторов в лаборатории. Таким образом, полученное соотношение пузырьков в детекторах BDT и BD100R, в принципе может быть результатом их различной чувствительности к нейтронам в данном диапазоне энергий.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Диссертационная работа Макарова А. Н. "Измерение спектра эпитепальных нейтронов ускорительного источника времяпролетным методом" отвечает требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Макаров Александр Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).
Ведомственная принадлежность: ФАНО России.
ОГРН 1027000871666, ИНН 7021001375, КПП 701701001, ОКПО 05160369, ОКОГУ 15066, ОКАТО 69401000000, ОКВЭД 73.10, ОКФС 12, ОКОПФ 72, ОКТМО 69701000.
Адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, д. 2/3.
Тел. (3822)49-15-44, факс (3822)49-24-10, адрес эл. почты: contact@hcei.tsc.ru.
Официальный сайт: <http://www.hcei.tsc.ru>.

Отзыв составил:

старший научный сотрудник
отдела высоких плотностей энергии,
кандидат физ.-мат. наук



А. В. Шишлов