

ОТЗЫВ

официального оппонента 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.

Диссертация А.Н. Макарова посвящена важной задаче разработки и экспериментальной апробации нового метода измерения энергетического спектра нейтронов, генерируемых литиевой мишенью в припороговом режиме при ее бомбардировке протонным пучком. Метод основан на времяпролетном анализе коротких импульсов нейтронного излучения, получаемых за счет быстрой модуляции энергии протонного пучка. Сама задача измерения спектра в таких условиях с точки зрения ядерной физики является достаточно **новой и актуальной**, так как наиболее важным является эпитепловый диапазон энергий, что нетипично для большинства исследований. Особенно хочется отметить актуальность выполненных работ, связанную с перспективами использования изученного режима генерации нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) онкологических заболеваний. БНЗТ – метод лучевой терапии злокачественных новообразований, характеризующийся чрезвычайно высокой биологической эффективностью за счет направленного ионизирующего действия непосредственно на уровне опухолевых клеток. Энергетический спектр нейтронов, требуемый для БНЗТ, лежит в диапазоне от 1 до 30 кэВ, что очень близко к характеристикам исследуемого в диссертации ускорительного источника нейтронов. Задача создания достаточного мощного нейтронного источника с требуемым спектром является наиболее важной на пути развития этого перспективного метода терапии.

Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения и списка литературы. Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, определена его научная новизна, практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе автор описывает основные существующие методики измерения энергетических спектров нейтронов и приводит подробный анализ возможности их применения в источнике нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишенью, созданного в ИЯФ СО РАН.

Во второй главе описан нейтронный источник на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и оригинальная методика измерения энергетического спектра нейтронов в режиме припороговой генерации, предложенная автором. В разделе подробно обсуждается методика, схема разработанного времяпролетного спектрометра, приводятся оценки точности и необходимого времени накопления статистики. Также представлены результаты расчетов ожидаемых спектров и предварительных оценочных экспериментальных измерений спектров с помощью пузырьковых детекторов.

В третьей главе представлены основные экспериментальные результаты измерений спектров нейтронов разработанным методом. Подробно рассмотрена проблема подавления шумов различной природы. Полученные экспериментальные данные сравниваются с результатами теоретических расчетов, описанных в главе 2. Автором приводится оценка точности разработанного метода и обсуждаются возможности его улучшения.

В Заключение приведены основные результаты работы.

Диссертация производит очень хорошее впечатление своим высоким уровнем и объемом выполненных измерений, а разработанный А.Н. Макаровым способ измерения энергетического спектра нейтронов в припороговом режиме генерации источника на основе ускорителя можно считать законченной и апробированной методикой, которая, несомненно, будет активно применяться в будущем.

Следует отметить несколько незначительных недостатков диссертации А.Н. Макарова:

1. В первой обзорной главе подробно обсуждается целый ряд диагностических методик измерения энергетического спектра нейтронов и возможность их применения в условиях поставленной задачи, однако в разделе 1.1.5 на стр. 19 о методе магнитной нейтронографии приведены лишь общие слова, плохо раскрывающие его суть. Для единообразия работы было бы выгодно уделить данному пункту больше внимания.
2. В разделе 1.1.7 на стр. 22 сделано утверждение: *«Точность измерения борным счетчиком энергии нейтрона не превышает нескольких процентов и определяется процентом нейтронов, вызвавших реакцию»*, которое в общем случае не является верным, так как сам по себе борный счетчик не дает информации об энергии зарегистрированного нейтрона. Видимо, в тексте опущено важное дополнение.
3. На стр. 24 предложение: *«Аналогичные сцинтилляторы с борным пластиком используются для БНЗТ например в [31].»*, было бы уместно переформулировать, например, так: *«Аналогичные сцинтилляторы с борным пластиком используются для диагностики на установках БНЗТ, например, в [31].»*.

4. В разделе 2.4.1. расчет спектра нейтронов выполнен для тока ионного пучка 10 мА, а экспериментальные исследования выполнены с существенно меньшим током. Понятно, что форма спектра не зависит от тока пучка, однако такое расхождение может вызвать ненужные вопросы у неспециалистов в данной области.
5. На стр. 61 при обсуждении результатов измерений пузырьковыми детекторами делается слишком общее утверждение: *«Такое соотношение количества пузырьков соответствует тому количеству, которое получается при спектре нейтронов, приведенном на Рис. 34.»*. Следовало бы сделать оговорку, что процедура восстановления спектра основана на некоторой заранее предполагаемой его форме.

Сделанные замечания отнюдь не снижают высокой оценки диссертационной работы, которую, безусловно, следует отнести к высокоинформативным, целенаправленным исследованиям, выполненным на высоком уровне. Полученные результаты могут представлять значительный интерес для ИПФ РАН, МФТИ, ОИЯИ (г. Дубна), ИСЭ СО РАН и целого ряда зарубежных лабораторий. Результаты диссертации опубликованы в российских и зарубежных научных журналах, включая 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации научно **обоснованы**. В основе положений, выводов и рекомендаций лежат экспериментальные результаты и численные расчеты. Результаты диссертационной работы А.Н. Макарова широко известны научной общественности, докладывались на семинарах и международных научных конференциях; их **достоверность и новизна** не вызывает сомнений. Значительный объем экспериментальных данных, а также соответствие предварительных численных расчетов и полученных результатов подтверждают достоверность последних. В работе применен новый подход к измерению спектра нейтронов времяпролетным методом, когда вспышки нейтронного излучения формируются с помощью быстрой модуляции энергии протонного пучка. В результате работы получены новые экспериментальные данные о спектре нейтронов на ускорительном источнике для БНЗТ. В работе содержится решение актуальной научной задачи измерения спектра нейтронов эпитеплового диапазона, имеющей значение для бор-нейтронозахватной терапии и для развития методов спектрометрии нейтронных потоков в прикладной ядерной физике

Диссертационная работа Макарова А.Н. удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной

физики. Автор диссертации, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

Кандидат физ.-мат наук,

Заведующий Лабораторией ионных источников

Федерального государственного бюджетного научного учреждения

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики

Российской академии наук» (ИПФ РАН),

почтовый адрес: 603950 Россия, Нижний Новгород,

ул. Ульянова, д. 46.

Телефон служебный +7 831 4164704,

мобильный +7 915 9492711,

электронная почта: skalyga@ipfran.ru

Скалыга В.А.

Подпись к.ф.-м.н., В.А. Скалыги заверяю,

Ученый секретарь

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики Российской

академии наук» (ИПФ РАН)

Кандидат физ.-мат наук



Корюкин И.В.