

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Болоздыни Александра Ивановича

на диссертацию **ГРИШНЯЕВА Евгения Сергеевича**

**«Генератор быстрых нейтронов для калибровки детекторов
слабовзаимодействующих частиц»,**

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника и 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики
в диссертационный совет Д 003.016.03 на базе

ФБГУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Актуальность избранной темы

Диссертационная работа Е.С. Гришняева посвящена разработке отпаянной газонаполненной дейтериевой нейтронной трубки ускорительного генератора нейтронов для исследования методов калибровки криогенных детекторов слабовзаимодействующих частиц по рассеянию DD-нейтронов на ядрах атомов сжиженных благородных газов. Генераторы нейтронов широко применяются в экспериментах, ставящих целью поиск тёмной материи по прямым взаимодействиям гипотетических массивных слабовзаимодействующих частиц тёмной материи (WIMP) с ядрами барионной материи, для калибровки отклика детекторов на ядра отдачи в чувствительных объёмах детекторов. Следует отметить, что использование рассеяния моноэнергетических нейтронов на определённый угол является естественным способом калибровки шкалы энергий ядер отдачи в детекторах слабовзаимодействующих частиц. Однако высоковольтная система большинства коммерческих генераторов нейтронов часто создаёт наводки, значительно затрудняющие выделение полезных событий, по которым можно провести калибровку энергетической шкалы в области достаточно низких энергий. В связи с этим задача разработки генератора нейтронов, лишённого этих недостатков, представляется, несомненно, актуальной.

Другое важное практическое применение генераторов нейтронов на отпаянных газонаполненных трубках – это импульсный нейтронный каротаж скважин при геологоразведочных работах, который предъявляет жёсткие требования на форму нейтронных всплесков. В диссертации представлены результаты разработки конструкции нейтронной трубки с улучшенными временными характеристиками нейтронных импульсов за счёт применения источника ионов с накаливаемым катодом.

В ходе работ по усовершенствованию нейтронных трубок разработки ИЯФ СО РАН известный метод итерационного моделирования источников заряженных частиц с фиксированной эмиттирующей поверхностью был обобщён автором на случай источников с пространственным зарядом частиц нескольких видов и объёмной ионизацией. Это достижение является актуальным для развития методов математической физики в целом и расширения сферы применения компьютерного моделирования при разработке электроракумных устройств в частности.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации научно обоснованы. В основе положений, выводов и рекомендаций лежат экспериментальные результаты и численные расчёты. Научная общественность достаточно широко осведомлена о результатах диссертационной работы Е.С. Гришняева, благодаря обсуждению на научных семинарах в ИЯФ СО РАН и докладам на международных научных конференциях.

Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность полученных автором результатов не вызывает сомнений, поскольку она основана на использовании целого комплекса современных методов исследований, среди которых основополагающую роль играют тщательно проведённые эксперименты. В них применялись как традиционные, так и новые методы измерений, которые представляются достаточно надёжными и адекватными поставленным задачам. Полученные данные внутренне непротиворечивы и согласуются с результатами других исследователей.

В диссертации представлен ряд новых результатов.

Известный метод стационарного итерационного моделирования вакуумных электростатических ускоряющих систем с пространственным зарядом и фиксированной эмиттирующей поверхностью впервые обобщён на газонаполненные электростатические ускоряющие системы с объёмной ионизацией.

Впервые в России реализована новаторская концепция нейтронной трубки с накаливаемым катодом. Впервые эта концепция была сформулирована исследователями компании Schlumberger в 1991 году, однако это не снижает новизну работы Е.С. Гришняева, поскольку разработки Schlumberger составляют коммерческую тайну и их детали никогда не публиковались в научной периодике.

Достигнутые длительности переднего и заднего фронтов нейтронных вспышек 110 и 100 нс соответственно являются лучшими в мире среди известных генераторов нейтронов на отпаянных газонаполненных нейтронных трубках.

Предложен новый метод калибровки криогенных детекторов на жидком аргоне на энергию ядер отдачи 8.2 кэВ по неупругому рассеянию DD-нейтронов. Показано, что в ряде случаев этот метод позволяет достигать скоростей счёта, больших, чем при традиционной калибровке на энергию 8.2 кэВ по упругому рассеянию.

Генератор нейтронов на разработанной Е.С. Гришняевым нейтронной трубке успешно применён для первого в мире измерения ионизационного выхода ядер отдачи жидкого аргона.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Ценность полученных результатов, их научная и практическая значимость состоит в широком наборе рекомендаций по конструированию нейтронных трубок с накаливаемым катодом, сформулированных и обоснованных автором.

Основное применение отпаянных газонаполненных нейтронных трубок – это импульсный нейтронный каротаж скважин, для которого важны короткие фронты нейтронных вспышек. Традиционная конфигурация отпаянных газонаполненных нейтронных трубок как российского, так и зарубежного производства, применяемых в инструментах каротажа, содержит в себе источник ионов Пеннинга. Как показывает опыт мирового научного сообщества, в таких трубках не удаётся получить длительность заднего фронта нейтронной вспышки меньше 1 мкс. На компьютерной модели трубки и в эксперименте демонстрируется, что применение источника ионов с накаливаемым катодом при определённых условиях позволяет получить длительность заднего фронта около 100 нс. Будучи реализованным в инструментах геофизических исследований скважин, это техническое решение позволит повысить скорость каротажа.

Практическую ценность представляет разработанный Е.С. Гришняевым код Scattronix, поскольку является удобным инструментом планирования калибровки криогенных детекторов.

Предложенный Е.С. Гришняевым метод калибровки криогенных детекторов на аргоне по неупругому рассеянию DD-нейтронов представляет ценность как с точки зрения ускорения калибровки на энергию ядер отдачи 8.2 кэВ, так и с точки зрения увеличения надёжности результатов калибровки.

Оценка содержания диссертации, её завершённость

Объём диссертации составляет 128 страниц, включая список литературы из 108 научных работ, 7 таблиц и 67 рисунков. Диссертация структурирована следующим образом: введение, шесть глав, из которых первая включает обзор классификации малогабаритных генераторов быстрых нейтронов, заключение, список цитируемых публикаций.

Введение посвящено обоснованию и формулировке целей, задач исследований, их актуальности. Изложены защищаемые научные положения, научная и практическая значимость работы, научная новизна полученных результатов.

Первая глава начинается с подробного обзора научной литературы по теме разработки и исследований генераторов нейтронов различных типов. Вторая часть главы посвящена общему описанию технологии производства отпаянных газонаполненных нейтронных трубок в ИЯФ СО РАН, обоснованию выбора номинального режима работы трубки, а также результатам, полученным на первых прототипах трубок.

Вторая глава посвящена разработке метода моделирования источника ионов с накаливаемым катодом. Сформулированы ограничения применимости метода, анализ которых позволил предложить оригинальную конфигурацию нейтронной трубки, которая была оптимизирована и впоследствии реализована. Достоверность результатов моделирования подтверждена сравнением результатов моделирования сферически-симметричной электростатической системы с расчётом методом одномерной прогонки.

Третья глава посвящена исследованию характеристик разработанной нейтронной трубки. На конечноэлементной модели трубки, описанной в предыдущей главе, продемонстрирован принцип достижения сверхмалых длительностей фронтов нейтронных вспышек (110 нс – передний фронт, 100 нс – задний фронт). Теоретическое предсказание подтверждено в эксперименте по временной спектроскопии импульсного нейтронного выхода.

Особое внимание уделено проблеме низкого нейтронного выхода (10^5 с^{-1} против 10^6 с^{-1} у коммерческих генераторов на отпаянных газонаполненных трубках при том же ускоряющем напряжении и токе пучка). В серии экспериментов автором убедительно продемонстрировано, что причина заниженного выхода нейтронов заключается в неспособности титанового слоя мишени удерживать дейтерий со стехиометрией 1.7.

Анализ данных временной спектроскопии импульсного потока рентгеновских квантов от генератора нейтронов демонстрирует эффективность электростатического запирающего вторичных электронов, выбиваемых ионным пучком из мишени.

Четвёртая глава раскрывает подробности стандартной методики калибровки криогенных детекторов слабовазаимодействующих частиц по упругому рассеянию DD-нейтронов. Вторая часть главы описывает математический формализм, заложенный в основу Монте-Карло-кода Scattronix. Корректность результатов моделирования спектров ядер отдачи при калибровке криогенных детекторов подтверждена согласием с аналитической оценкой ширины спектральных линий.

Пятая глава посвящена обоснованию метода калибровки криогенных аргонных детекторов слабовазаимодействующих частиц на энергию ядер отдачи 8.2 кэВ по неупругому рассеянию DD-нейтронов на малые углы. Показано, что паразитное энерговыделение, обусловленное комптон-эффектом от гамма-квантов неупругого рассеяния DD-нейтронов на аргоне, не оказывает существенного влияния на погрешность определения отклика детектора на ядра отдачи энергией 8.2 кэВ. Показано, что метод позволяет добиваться скоростей счёта, превосходящих таковые при калибровке на ту же энергию по упругому рассеянию DD-нейтронов и повышать надёжность результатов калибровки.

Шестая глава описывает эксперимент, в котором впервые в мире был измерен ионизационный выход ядер отдачи жидкого аргона. В эксперименте применялся

генератор нейтронов на трубке, разработанной Е.С. Гришнёвым, а в анализе результатов применялось моделирование с помощью авторского программного продукта Scattronix.

В заключении представлены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В целом диссертация представляет собой внутренне согласованный и завершённый труд. Текст написан ясным и профессиональным языком.

Личный вклад Е.С. Гришнёва в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Диссертация Е.С. Гришнёва представляет собой хорошо структурированный научный труд, имеющий несомненную ценность для научного сообщества и перспективу применения полученных результатов для развития высоких технологий. Тем не менее, имеются замечания по тексту диссертации.

1. Во введении (стр.7 текста диссертации) утверждается, что «Российская группа разработчиков детектора когерентного рассеяния нейтрино (RED) применила для калибровки генератор на вакуумной нейтронной трубке» со ссылкой на доклад Д.Ю.Акимова, сделанный в 2006 году. Следует ответить, что коллаборация РЭД была создана в 2011 году, поэтому указанная информация не совсем корректна и относится к другим коллаборациям. Однако, как правильно далее отмечено в том же абзаце, коллаборация РЭД предпринимала попытку организовать калибровку жидкоксенонового детектора РЭД-1 с помощью нейтронов, используя в качестве источника исследовательский реактор ИРТ МИФИ в 2012 году.
2. В диссертационной работе предложен и физически обоснован метод калибровки в области энергий ядер отдачи 8.2 кэВ с помощью неупругого рассеяния нейтронов на ядрах ^{40}Ar . Вызывает сожаление, что это предложение не было проверено на эксперименте.

В целом отмеченные недостатки, не снижают высокой оценки диссертационной работы.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК и в достаточной степени отражает содержание диссертации.

Заключение

Представляемая работа прошла серьёзную апробацию, её результаты докладывались на международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ (из них 10 статей в рекомендованных ВАК журналах, 2 патента на изобретение и 1 свидетельство о регистрации компьютерной программы).

Представленная диссертационная работа Е.С. Гришнёва является законченным научным исследованием, в котором содержится решение задачи создания отпаянной газонаполненной нейтронной трубки с накаливаемым катодом и калибровки криогенного лавинного детектора слабозаимодействующих частиц на сжиженном аргоне.

Работа полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК к кандидатским диссертациям по специальностям 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника и 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, установленным в п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №

842, а автор диссертационной работы, Гришняев Евгений Сергеевич, несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент: Болоздыня Александр Иванович, доктор физико-математических наук 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

115409, Москва, Каширское шоссе, 31,

Т. +7 495 788 5699 *9015

Электронный адрес: AIBolozdynya@mephi.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», профессор кафедры экспериментальной ядерной физики и космофизики, заместитель заведующего межкафедральной лаборатории экспериментальной ядерной физики

 А.И. Болоздыня А.И.
(подпись) (инициалы, фамилия)

Подпись А.И. Болоздыни заверяю
Учёный секретарь

Электронный адрес: VGTsuganov@mephi.ru



 В.Г. Цыганов,
кандидат технических наук

15 ноября 2016 г.