

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИСЭ СО РАН, чл.-корр. РАН



Н.А.Ратахин

«18» ноября 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Гришняка Евгения Сергеевича "Генератор быстрых нейтронов для калибровки детекторов слабовазаимодействующих 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

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Гришняка Е.С. посвящена разработке отпаянной газонаполненной дейтериевой нейтронной трубки для малогабаритного генератора быстрых нейтронов и планированию калибровки криогенного лавинного детектора слабовазаимодействующих частиц на жидком аргоне.

Актуальность работы определяется потребностью экспериментальных групп, занимающихся поиском тёмной материи, в генераторах нейтронов, совместимых с инфраструктурой криогенных детекторов с точки зрения допустимого уровня наводок, а также в способах повышения надёжности и скорости калибровки. На современном этапе развития технологий криогенных детекторов слабовазаимодействующих частиц имеется тенденция к переходу с традиционного рабочего газа ксенона на аргон. Зависимости ионизационного и сцинтилляционного выхода ядер отдачи ксенона от энергии подробнейшим образом изучены, а аналогичные исследования для аргона являются, безусловно, актуальной задачей.

Помимо этого, реализация концепции отпаянной газонаполненной нейтронной трубки с накаливаемым катодом уже сама по себе является актуальным научно-техническим достижением. В технологии импульсного нейтронного каротажа скважин, для которой в основном и применяются такие трубки, имеет существенное значение длительность заднего фронта нейтронного импульса. С момента регистрации патента на трубку Minitron компании Schlumberger в 1991 году стало известно, что использование в трубке источника ионов с накаливаемым катодом позволяет получать хорошо воспроизводимые прямоугольные нейтронные импульсы с более резкими фронтами, чем у трубок с традиционным источником Пеннинга. Подробные исследования физики работы нейтронных трубок с накаливаемым катодом никогда не публиковались. Работа

Е.С. Гришняева является первым открытым исследованием нейтронных трубок с накаливаемым катодом вообще и физических механизмов, определяющих рекордно короткие фронты нейтронных вспышек, в частности.

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

Выдвинутые автором научные положения, выводы и рекомендации чётко сформулированы и надёжно обоснованы в тексте диссертации. Полученные результаты хорошо известны научной общественности, опубликованы в солидных журналах, докладывались на международных конференциях.

Оценка достоверности результатов исследований

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

Оценка новизны и научной ценности результатов исследований

В диссертации представлен целый спектр новых результатов.

В диссертации развит подход, позволяющий свести процесс разработки источника ионов и ионно-оптической системы нейтронной трубки к компьютерному моделированию, отказавшись от поддерживающих экспериментов. Впервые в мире получены длительности фронтов нейтронных вспышек не более 110 нс. Предложенный автором метод калибровки криогенных детекторов на сжиженном аргоне по неупругому рассеянию DD-нейтронов является новым.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Основной результат в области технологии генераторов нейтронов, полученный Е.С.Гришняевым, - это рекордно короткие фронты нейтронных вспышек (около 0.1 мкс). Несмотря на то, что все результаты получены на DD-генераторе, они могут быть обобщены и на аналогичный DT-генератор. Инструмент С/О-каротажа, работающий с таким генератором нейтронов, может использовать более широкое временное окно для набора раннего гамма-спектра радиационного захвата, чем инструмент, работающий с генератором на стандартной трубке с пеннинговским источником ионов, причём расширение временного окна достигается за счёт интервала времени с максимальной скоростью счёта гамма-квантов. Аналогичное преимущество имеет инструмент измерения водородного индекса формации, работающий с генератором нейтронов, способным генерировать импульсы с длительностью фронтов около 0.1 мкс. Простая оценка увеличения скорости счёта надтепловых нейтронов по сравнению с инструментом на стандартном генераторе с длительностью фронта импульса 1 мкс даёт увеличение на 40% при работе в высокопористой водонасыщенной формации.

Основной результат в области калибровки криогенных детекторов слабозаимодействующих частиц – это применение генератора нейтронов на трубке, разработанной Е.С. Гришняевым, в первом в мире измерении ионизационного выхода ядер отдачи жидкого аргона. Также научную ценность представляет и использовавшийся в измерении ионизационного выхода код Scattronix, разработанный Е.С. Гришняевым. Наилучший вариант его использования – совместно со стандартными кодами (MCNP, GEANT4, Призма). В этом случае узкая специализация кода на учёте только геометрических факторов калибровки позволит более детально разбираться со всеми подробностями формирования спектров полезных событий при калибровке криогенных детекторов.

Оценка содержания диссертации, её завершенность

Диссертационная работа Е.С. Гришняева представлена на 128 страницах, содержит 67 иллюстраций и список литературы из 108 наименований. Работа включает введение, 6 глав и заключение.

Во введении приводится обзор опыта мирового научного сообщества в области калибровки криогенных детекторов при помощи генераторов нейтронов на отпаянных нейтронных трубках 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 обзору классификации малогабаритных генераторов нейтронов и областей их применения, а также обзору продукции мировых производителей малогабаритных генераторов нейтронов различных видов. Во втором разделе описана технология производства нейтронных трубок в ИЯФ СО РАН. В разделе 3 описана методика оценки предельного нейтронного выхода мишени трубки. В разделе 4 описаны результаты испытаний нейтронных трубок исходной конфигурации.

Во второй главе описывается подход к проектированию осесимметричных нейтронных трубок с накаливаемым катодом, основанный на конечноэлементном моделировании электростатического поля трубки и итерационном вычислении самосогласованного распределения плотности пространственного заряда ионов и электронов. Автором предложено обобщить метод итерационного вычисления плотности пространственного заряда пучков, ранее применявшийся только для электронных пучков с фиксированной эмиттирующей поверхностью, на системы с объёмной ионизацией фоновых газа. Предложенная схема итераций по электронному и ионному заряду, имеющая вид двух вложенных циклов (внутренний – по заряду ионов, внешний – по заряду электронов) позволяет добиться сходимости итераций. Сформулированы границы применимости метода. Для получения широкого профиля пучка на мишени трубки автором предложено внести в конструкцию коническую сетку в апертуре экстрактора. Исследовано влияние потенциала экстрактора на сходимость вычислений. Корректность получаемых результатов проверена на сферически-симметричной системе, для которой проведено сравнение решения методом автора и методом прогонки по радиусу. Получено хорошее согласие результатов моделирования двумя методами.

Третья глава посвящена экспериментальным результатам, полученным на нейтронной трубке, конструкция которой была разработана автором в результате оптимизации конечноэлементной модели. Второй раздел главы посвящён

вычислительному приёму, позволившему смоделировать форму фронтов нейтронных вспышек, не прибегая к явному моделированию во временной области. Третий раздел описывает технику стробоскопического измерения формы нейтронных вспышек. Показано, что эксперимент хорошо воспроизводит результаты моделирования. В разделе 4 описан подход к измерению полного абсолютного выхода нейтронов, который оказывается в 10 раз ниже целевого значения. Приведён ряд свидетельств в пользу того, что причина низкого выхода нейтронов кроется в недостаточной чистоте титана мишени. На конечноэлементной модели трубки показано, что явление перезарядки ионов в ускоряющем промежутке может уменьшить выход нейтронов лишь на 8% при номинальном давлении дейтерия. В эксперименте с внешним напуском дейтерия продемонстрировано, что причиной низкого выхода не может быть разбавление дейтерия протием при растворении в геттере. В разделе 5 измерена зависимость выхода нейтронов от тока и напряжения при монотонно возрастающей мощности пучка и продемонстрировано, что гипотеза о снижении выхода нейтронов из-за уменьшения стехиометрии дейтерия в титане, спровоцированного локальным перегревом, не верна. В разделе 6 при помощи стробоскопической временной спектрометрии на сцинтилляционном детекторе с n - γ -разделением продемонстрирована эффективность электростатического подавления вторичных электронов, выбиваемых пучком из мишени.

Четвёртая глава посвящена планированию калибровки криогенных детекторов слабовзаимодействующих частиц. В разделе 1 описано современное положение дел в области детектирования тёмной материи и высказано предположение, что противоречивые результаты разных исследовательских групп могут быть вызваны неправильной калибровкой отклика детекторов. В разделе 2 описана стандартная техника калибровки детекторов слабовзаимодействующих частиц. В разделе 3 обоснована целесообразность разработки быстродействующего кода, узко специализированного для моделирования калибровки криогенных детекторов. Большой раздел 4 посвящён подробному описанию внутренней логики и математического аппарата кода Scattronix, разработанного автором и реализующего метод Монте-Карло для моделирования формы спектров ядер отдачи, обусловленной ошибкой определения угла рассеяния в полезном событии при калибровке по стандартной методике. В разделе 5 результаты моделирования проверены через аналитическую оценку ширины спектральных линий ядер отдачи

Пятая глава посвящена методу калибровки криогенных детекторов на аргоне на энергию ядер отдачи 8.2 кэВ по неупругому рассеянию DD-нейтронов. В разделе 1 подробно изложены физические основы этого метода. Показано, что энергия ядер отдачи неупругого рассеяния стремится к отличному от нуля значению при малых углах, тогда как производная энергии по углу стремится к нулю, что позволяет поднимать скорость счета полезных событий в линии неупругого рассеяния за счёт увеличения ошибки определения угла рассеяния при слабом ухудшении точности определения энергии. При неупругом рассеянии нейтрона на аргоне рождается гамма-квант энергией 1.46 МэВ. Такие кванты могут испытывать комптон-эффект на электронах атомов аргона и вносить ошибку определения энергии ядер отдачи неупругого рассеяния. В разделе 2 описан способ внесения соответствующих поправок на гамма-излучение неупругого рассеяния в результаты моделирования в Scattronix. В разделе 3 проведено сравнение результатов моделирования в Scattronix двух систем с одинаковой погрешностью определения энергии ядер отдачи: 1) по упругому рассеянию на 22 градуса и 2) по неупругому на 0 градусов. Показано, что в некоторых случаях при калибровке по неупругому рассеянию удаётся получить скорость счёта в 15 раз выше, чем при калибровке по упругому рассеянию.

Шестая глава описывает эксперимент, в котором с использованием генератора нейтронов на трубке, разработанной автором, и кода Scattronix впервые в мире был измерен ионизационный выход ядер отдачи жидкого аргона. Измерение проделано для энергий 80 и 233 кэВ. В первом разделе описан прототип детектора слабовазимодействующих частиц лаборатории космологии и элементарных частиц НГУ. Во втором разделе описан способ обработки спектров событий в детекторе, накапливаемых при облучении нейтронами.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Таким образом, работа состоит из двух логически связанных частей, соответствующих двум разным специальностям: разработка нейтронной трубки (главы 1-3, специальность 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника) и исследование вопросов калибровки криогенного детектора слабовазимодействующих частиц (главы 4-6, специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики). В целом диссертация представляет собой внутренне согласованный и завершённый труд.

Автореферат диссертации в полной мере отражает её содержание.

Личный вклад соискателя в получении результатов исследования является определяющим. Автором лично разработан метод проектирования нейтронной трубки с накаливаемым катодом, собрана и активирована нейтронная трубка, собран генератор нейтронов, использовавшийся для измерения ионизационного выхода ядер отдачи аргона. Автором лично разработано приложение Scattronix и предложен метод калибровки криогенных детекторов на аргоне по неупругому рассеянию DD-нейтронов на малый угол.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты Е.С. Гришняка, полученные при разработке нейтронной трубки, могут быть использованы на предприятиях, занимающихся промышленным производством нейтронных трубок: ВНИИА им. Н.Л. Духова, ФГУП "Комбинат Электрохимприбор", а также в отечественных и зарубежных технологических и нефтесервисных компаниях.

Генератор нейтронов и код Scattronix успешно используются в ИЯФ СО РАН в работах с прототипом криогенного лавинного детектора слабовазимодействующих частиц. Подходы, описанные в диссертации Е.С. Гришняка, могут быть использованы другими группами, занимающимися разработкой криогенных детекторов на жидком аргоне (DEAP/CLEAN и Dark Side).

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах: 10 статей в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК, 1 статья в материалах международной конференции, зарегистрировано 2 патента на изобретения. Код Scattronix получил свидетельство о государственной регистрации. Материалы диссертации апробированы на научных семинарах ИЯФ СО РАН и представлены на 2 международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

1. Автор рассматривает разработанный им метод моделирования нейтронных трубок в качестве инструмента оперативной проверки технических решений, касающихся компоновки электродов. При этом он совершенно справедливо заявляет, что не следует ожидать точного воспроизведения смоделированного профиля плотности тока ионов в профиль эрозии мишени, потому что вероятность перезарядки ионов D_2^+ достаточно велика. Если так, то необходимо сделать оговорку, что целью моделирования трубки является не предсказание профиля плотности тока на мишени, а исследование возможностей усиления влияния на ионный пучок тех факторов, которые работают на формирование как можно более размытого профиля плотности тока. Необходимость такой оговорки усиливается ещё и тем, что время работы нейтронных трубок производства ИЯФ пока не позволяет провести сравнение результатов моделирования профиля плотности тока ионов на мишени с реальным профилем эрозии.

2. На стр. 54 автор пишет: "Эффективность извлечения ионов также снижается из-за малой напряженности электрического поля внутри сетки...." непонятно, что такое напряженность электрического поля внутри сетки.

3. В тексте диссертации имеются опечатки, например: стр. 30 "...дейтрон из иона D^{2+} ..."; стр. 46 – пропущена буква "н" в слове "напряжения"; стр. 113 – первая ссылка на рис. 66 должна на самом деле указывать на рис. 65 и др.

Высказанные замечания принципиально не влияют на общую положительную характеристику диссертационной работы.

Заключение

В целом работа выполнена на высоком научном и профессиональном уровне, является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные и проверенные на практике технические разработки, обеспечивающие решение важной прикладной задачи создания отпаянной газонаполненной нейтронной трубки с накаливаемым катодом и научной задачи калибровки криогенных детекторов слабовзаимодействующих частиц.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утверждённого постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Евгений Сергеевич Гришняев, заслуживает присуждения ученой 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.

Диссертационная работа Гришняева Е.С. и материалы по данной работе рассмотрены на расширенном научном заседании отдела высоких плотностей энергии ИСЭ СО РАН, протокол № 5 от 18 ноября 2016 года.

Отзыв подготовили:

д.ф.-м.н.,

в.н.с. отдела высоких плотностей энергии ИСЭ СО РАН



Орешкин В.И.

к.ф.-м.н.,

с.н.с. отдела высоких плотностей энергии ИСЭ СО РАН



Русских А.Г.

Подписи Орешкина В.И. и Русских А.Г. удостоверяю.

Ученый секретарь ИСЭ СО РАН, д.ф.-м.н.



Пегель И.В.

Орешкин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела высоких плотностей энергии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники СО РАН

Адрес: 634055, г. Томск, проспект Академический, д.2/3

Тел. (3822) 49-29-88, факс (3822) 49-16-77

Адрес эл. почты: oreshkin@ovpe.hcei.tsc.ru

Русских Александр Геннадиевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела высоких плотностей энергии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники СО РАН

Адрес: 634055, г. Томск, проспект Академический, д.2/3

Тел. (3822) 49-13-48, факс (3822) 49-16-77

Адрес эл. почты: russ@ovpe2.hcei.tsc.ru