

*На правах рукописи*

ГРИШНЯЕВ Евгений Сергеевич

ГЕНЕРАТОР БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ  
ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ДЕТЕКТОРОВ  
СЛАБОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЧАСТИЦ

- 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника  
01.04.01 – приборы и методы  
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2016



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Малогобаритные генераторы быстрых нейтронов на отпаянных газонаполненных трубках находят применение в ряде коммерческих технологий, сводящихся к получению информации о физических характеристиках облучаемого вещества. В их число входят применения в нефтегазовой геофизике, в атомной промышленности, в урановой промышленности, в металлургии, в горнорудной промышленности, в цементной промышленности, в экологическом мониторинге. Промышленные применения находят главным образом ускорительные генераторы на реакции DT-синтеза ( $d(T,n)^4\text{He}$ ), потому что энергии нейтронов, рождающихся в этой реакции (14.1 МэВ), достаточно для генерации характеристических высокоэнергетических  $\gamma$ -квантов (больше 3 МэВ) при неупругом рассеянии (например, линии  $\gamma$ -излучения неупругого рассеяния нейтрона на кислороде 6.12 МэВ и углероде 4.44 МэВ). На аналогичных DD-генераторах (то есть, на реакции  $d(D,n)^3\text{He}$ ) можно отрабатывать новые технические решения, которые могут быть в дальнейшем применены для улучшения операционных характеристик коммерческих DT-генераторов. Кроме того, такие DD генераторы находят применение в научных исследованиях. В данной работе разрабатывался генератор DD-нейтронов для калибровки криогенного лавинного детектора слабовзаимодействующих частиц.

Одна из характеристик импульсного ускорительного генератора нейтронов – это длительность фронтов нейтронного импульса. Она имеет критическое значение для точности определения фильтрационно-емкостных свойств нефтенесущих коллекторов. В данной работе описан подход, позволяющий достичь длительности фронтов нейтронных импульсов около 110 нс. Такой результат достигается в новой конфигурации источника ионов, впервые предложенной в рамках данной работы. За основу новой конфигурации ионного источника взята разработка компании Schlumberger 1991 года – нейтронная трубка Minitron, в источнике ионов которой применён накаливаемый катод. Детальное изучение предложенной конфигурации показало, что в силу простоты элементарных процессов, протекающих в таком источнике ионов, разработка может быть основана на конечноэлементном моделировании, что ускоряет и удешевляет её по сравнению с разработкой нейтронной трубки на основе источника Пеннинга.

Применение нового подхода к разработке нейтронной трубки потребовало создания специализированных и быстродействующих средств моделирования элементарных процессов в трубке. Разработан метод, в котором в качестве структурных единиц выступают высокоуровневые инструменты коммерческих программных пакетов МКЭ-моделирования (в частности, Comsol Multiphysics). Это способствует снижению трудозатрат и

ускорению разработки как самого метода, так и нейтронной трубки. Сам метод является обобщением стандартного итерационного метода с последовательной релаксацией на случай систем с объёмной ионизацией, поэтому данная работа даёт вклад и в области вычислительных методов.

Генератор нейтронов разрабатывался для калибровки криогенного лавинного детектора (КЛД) тёмной материи и когерентного рассеяния нейтрино. В рамках работ по планированию калибровки КЛД был разработан удобный в использовании и быстродействующий код Scattronix для моделирования спектров ядер отдачи при калибровке КЛД на  $^{40}\text{Ar}$  и изотопах Хе. Моделирование калибровки КЛД на  $^{40}\text{Ar}$  генератором DD-нейтронов позволило обосновать новый метод калибровки таких детекторов на энергии ядер отдачи 8.2 кэВ по неупругому рассеянию DD-нейтронов через уровень 1.62 МэВ. Метод позволяет достичь 15-кратного увеличения скорости счёта по сравнению с аналогичной калибровкой по упругому рассеянию, если речь идёт о КЛД с низким пространственным разрешением, однако его использование в КЛД с высоким разрешением параллельно с калибровкой по упругому рассеянию позволит увеличить надёжность результатов калибровки.

Генератор нейтронов на отпаянной нейтронной трубке, описанной в данной работе, был успешно применён для измерения ионизационного выхода ядер отдачи жидкого  $^{40}\text{Ar}$  в КЛД.

В связи с вышеизложенным следует отметить, что данная работа даёт вклад в прогресс сразу в трёх отраслях науки, поэтому является актуальной.

**Цель работы** состоит в разработке генератора нейтронов на отпаянной газонаполненной дейтериевой нейтронной трубке и теоретическом обосновании возможности калибровки КЛД на жидком  $^{40}\text{Ar}$  по неупругому рассеянию нейтронов с начальной энергией 2.45 МэВ.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать средства компьютерного моделирования нейтронной трубки.
2. На основе результатов моделирования разработать конструкцию нейтронной трубки.
3. Отработать технологические процедуры активации и отпайки нейтронной трубки.
4. Измерить нейтронный выход генератора и форму нейтронной вспышки в импульсном режиме работы генератора.
5. Разработать приложение, моделирующее спектры ядер отдачи аргона при калибровке КЛД по стандартной методике.
6. Смоделировать спектры ядер отдачи аргона при калибровке по рассеянию DD-нейтронов на малый угол и на основе результатов моделирования обосновать возможность (или принципиальную

невозможность) калибровки КЛД на  $^{40}\text{Ag}$  по неупругому рассеянию DD и DT нейтронов.

7. Провести измерение ионизационного выхода ядер отдачи жидкого  $^{40}\text{Ag}$ .

### **Личный вклад автора**

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автором лично разработан численный метод моделирования элементарных процессов в нейтронных трубках, сформулированы ограничения применимости метода, а также предложена и детально проработана концепция бесплазменной нейтронной трубки. Автором лично разработаны конструктивные решения источника ионов. При определяющем участии автора разработан комплекс технологических мероприятий по сборке, активации и отпайке нейтронных трубок. При определяющем участии автора получены экспериментальные результаты, свидетельствующие в пользу истинности представлений о работе бесплазменной нейтронной трубки. Автором лично разработано приложение Scattonix для статистического моделирования спектров ядер отдачи при калибровке КЛД монохроматическими нейтронами. При определяющем участии автора сформулирован и обоснован метод калибровки КЛД на  $^{40}\text{Ag}$  по неупругому рассеянию DD-нейтронов на малый угол.

### **Научная новизна**

1. Разработан новый стационарный итерационный метод моделирования электростатических систем с пространственным зарядом и объёмной ионизацией.

2. Впервые в России разработана нейтронная трубка с накаливаемым катодом и низким анодным напряжением.

3. Впервые в мире получена длительность фронтов нейтронных импульсов газонаполненной трубки не более 110 нс.

4. Предложен новый метод калибровки КЛД на  $^{40}\text{Ag}$  на энергию ядер отдачи 8.2 кэВ по неупругому рассеянию нейтронов энергией 2.45 МэВ на малый угол.

5. С помощью разработанного генератора нейтронов впервые в мире измерен ионизационный выход ядер отдачи жидкого  $^{40}\text{Ag}$ .

### **Научная и практическая ценность**

Применение предложенного полиномиального представления зависимости парциального нейтронного выхода от энергии и стехиометрии в разработке нейтронных трубок позволяет сократить затраты труда, связанные с выбором номинального напряжения и тока ионов нейтронной трубки.

Разработанный численный метод позволяет перевести полностью в виртуальную среду разработку и улучшение нейтронной трубки с

накаливаемым катодом, а экспериментальную деятельность свести к проверке согласия результатов моделирования и измерения операционных характеристик трубки.

Сформулирована и обоснована теоретическая концепция бесплазменной нейтронной трубки. Этот класс нейтронных трубок наилучшим образом подходит для моделирования вышеупомянутым методом.

Достижение наилучших временных характеристики нейтронных импульсов разработанного генератора создаёт научный задел для дальнейшего совершенствования нейтронной трубки до возможности использования генератора нейтронов на её основе в инструментах нейтронного каротажа.

Существующий генератор нейтронов уже был успешно применён в Лаборатории Космологии и Элементарных Частиц НГУ для калибровки КЛД на  $^{40}\text{Ag}$ .

Разработан удобный инструмент планирования экспериментов по калибровке КЛД на инертных газах – Монте-Карло-код Scattronix.

Предложен и теоретически обоснован новый метод калибровки КЛД на  $^{40}\text{Ag}$  на энергии ядер отдачи 8.2 кэВ по неупругому рассеянию нейтронов энергией 2.45 МэВ на малый угол. Использование этого метода параллельно с калибровкой по упругому рассеянию позволит повысить надёжность результатов калибровки.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

Стационарный итерационный метод моделирования электростатических систем с пространственным зарядом и объёмной ионизацией.

Нейтронная трубка с накаливаемым катодом со следующими номинальными характеристиками: выход нейтронов  $10^5 \text{ c}^{-1}$ , напряжение экстрактора 100 В, напряжение анода 200 В, ускоряющее напряжение 80 кВ, ионный ток 50 мкА, времена нарастания и спада нейтронного импульса 110 и 100 нс соответственно.

Метод калибровки КЛД на  $^{40}\text{Ag}$  на энергию ядер отдачи 8.2 кэВ по неупругому рассеянию нейтронов энергией 2.45 МэВ на малый угол.

Применение генератора нейтронов и кода Scattronix для измерения ионизационного выхода ядер отдачи  $^{40}\text{Ag}$  высоких энергий.

### **Апробация диссертации**

Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН. Материалы диссертации были представлены автором на международной конференции «4-й Азиатский форум по ускорителям и детекторам AFAD-2013» (Новосибирск).

По результатам диссертации опубликовано 10 работ в периодических изданиях, из них 10 входящих в рекомендуемый перечень ВАК [3-7, 10-14].

## Структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, изложена на 128 страницах, включая 67 иллюстраций, и содержит 108 наименований библиографии.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** проведён обзор опыта мирового научного сообщества в области калибровки детекторов слабозаимодействующих частиц и на его основе сформулировано решение о разработке генератора нейтронов на отпаянной газонаполненной дейтериевой трубки. Также определена цель работы, сформулированы задачи, отмечена научная новизна темы диссертации, практическая значимость и личный вклад автора.

**Первая глава** начинается с обзора существующих на сегодняшний день концепций нейтронных генераторов и областей их применения (поскольку разработка проводилась ещё и с целью дальнейшего расширения области применения нейтронной трубки). Второй раздел главы посвящён технологии производства нейтронных трубок в ИЯФ СО РАН. Дана общая информация о конструкции нейтронной трубки и этапах её активации. В третьем разделе обоснована методика вычисления нейтронного выхода, которая в итоге сведена для удобства дальнейшего применения в полиномиальное представление зависимости парциального (т.е. на единицу тока) нейтронного выхода от энергии и стехиометрии изотопов водорода в титановой мишени. На основе этой зависимости задан номинальный планируемый режим работы нейтронной трубки ( $10^6$  н/с предельно достижимый нейтронный выход при ускоряющем напряжении 80 кВ и ионном токе 50 мкА). Далее приведена методика разработки нейтронной трубки исходной конфигурации и на основе результатов испытаний трубки показано, что исходные допущения, с которых начиналась разработка исходной конфигурации, неверны. Также показано, что уже в исходной конфигурации достигаются короткие фронты нейтронных импульсов (нарастание/спад 200/750 нс).

**Вторая глава** посвящена подробностям разработки ионного источника с накаливаемым катодом для нейтронной трубки.

Для разработки, основанной на компьютерном моделировании, предложено развить собственный стационарный итерационный метод моделирования электростатических систем с пространственным зарядом и объёмной ионизацией. Это решение продиктовано соображениями эффективности использования трудовых ресурсов и прогнозируемости трудовых затрат на всех этапах разработки.

Метод основан на возможностях программного пакета для конечноэлементного моделирования Comsol Multiphysics 3.5 и Comsol Script 1.3 и является обобщением известного метода итераций с последовательной

релаксацией на случай систем с взаимно согласованными плотностями заряда частиц трёх сортов и объёмной ионизацией.

Электростатическое поле вычисляется в области моделирования решением уравнения Пуассона методом конечных элементов. При этом используются лагранжевы квадратичные конечные элементы. При моделировании в рамках предложенного метода производятся итерации с последовательной релаксацией сначала для ионов, а когда ошибка самосогласования уменьшается до установленного порога, решатель делает одну итерацию с релаксацией по электронному заряду, после чего пересчитывает распределение скорости ионизации и вычисляет ошибку самосогласования электронного заряда. Если эта ошибка оказывается меньше соответствующего порога для электронного заряда, то решатель уменьшает значения порогов и параметров релаксации в соответствии с таблицей настроек решателя или передаёт управление пользователю Comsol Script.

Плотность заряда частиц любого сорта вычисляется распределением заряда в стационарных траекториях сначала по ячейкам, а затем по узлам сетки.

Метод учитывает генерацию ионного заряда в объёме при диссоциативной ( $H_2 + e \rightarrow H^+ + H + 2e$ ) и недиссоциативной ( $H_2 + e \rightarrow H_2^+ + 2e$ ) ионизации и при этом игнорирует присутствие а) вторичных электронов ионизации и б) рассеянных первичных электронов, в) вторичных электронов, выбиваемых из электродов ионного источника. Отсюда следуют границы применимости метода: а) чтобы низкоэнергетичные вторичные электроны ионизации не накапливались в объёме, самосогласованный потенциал не должен иметь максимумов (обобщая это на заряд ионов, уточняем ограничение до отсутствия экстремумов) – система должна быть бесплазменной; б) чтобы электронный заряд определялся только первичными электронами, необходимо, чтобы длина свободного пробега электрона была больше протяжённости траектории (т.е. имела место достаточно низкая эффективность ионизации). Поскольку метод не учитывает образование ионов  $H_3^+$ , резонансную перезарядку и поляризационное взаимодействие ионов с газом, то результаты моделирования должны проверяться на предмет допустимости игнорирования этих процессов.

На основе моделирования предложенным методом разработана нейтронная трубка с сильным извлекающим полем в источнике ионов. Эффект усиления поля достигается укорочением анода и его сдвигом ближе к экстрактору. В конструкцию внесена коническая металлическая сетка, привариваемая к экстрактору. Сетка нужна, чтобы рассеивать электроны на периферию полости анода и создавать максимально размытый профиль плотности ионного тока на мишени (Рисунок 1). Анализ профилей сходимости моделирования разных конфигураций и режимов работы источника ионов показывает, что в случае замыкания значительного



количества электронных траекторий на экстракторной сетке сходимость итераций по электронному заряду заметно ухудшается.

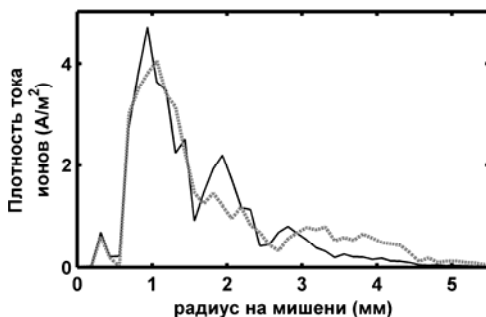


Рисунок 1. Смоделированные профили ионного тока на поверхности мишени. Непрерывная чёрная линия – 100 В на экстракторе, пунктирная серая – 20 В.

Надёжность результатов моделирования проверена на примере сферически симметричной системы с пространственным зарядом и объёмной ионизацией. Результаты моделирования сферически симметричной системы находятся в хорошем согласии с результатами расчётов одномерным методом прогонки. Также сравнение выявляет существенное отклонение от закона сохранения полной энергии частицы при моделировании её траектории инструментом particle tracing программы Comsol Multiphysics 3.5.

**В третьей главе** описан опыт работы с генератором нейтронов на бесплазменной нейтронной трубке. Целью экспериментов была проверка теоретических представлений о бесплазменной трубке, поэтому значительная часть главы посвящена вопросам моделирования.

Конструкция нейтронной трубки, выработанная в результате моделирования различных конфигураций, представлена на Рисунке 2.

Простота элементарных процессов, происходящих в бесплазменном источнике ионов, позволяет смоделировать переходные процессы при переключениях анодного напряжения (анод переключается между 0 и 200 В) с использованием только лишь средств стационарного моделирования. При этом передний фронт импульса ионного тока естественным образом извлекается из результатов работы итерационного решателя. Задний фронт импульса тока (а значит и нейтронного импульса) строится на основе результатов моделирования полёта ионов с разной энергией из ионного источника до мишени после мгновенного переключения анодного напряжения с 200 В на 0. Детальное рассмотрение процессов ускорения ионов извлекающим полем и торможения запирающим полем приводит к выводу о том, что форма переднего фронта не зависит от мелкой структуры экстракторной сетки, тогда как форма заднего фронта зависит от неё.

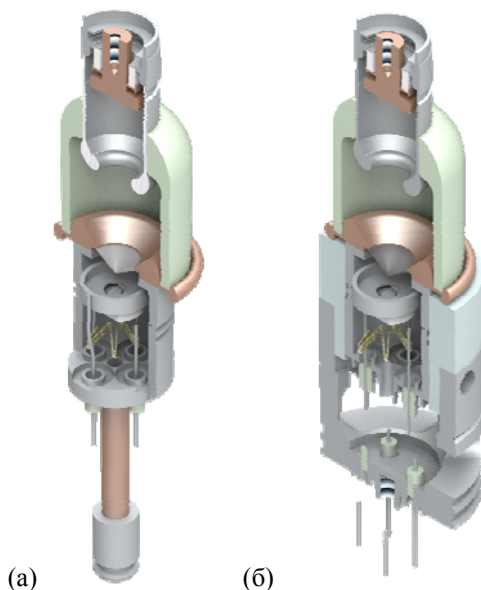


Рисунок 2. Сечение конструкции бесплазменной нейтронной трубки: а – трубка на штенгеле, б – отпаянная трубка в патроне-переходнике, готовая к монтажу внутри генератора нейтронов.

Для измерения формы нейтронного импульса использована стробоскопическая техника временной спектрометрии. Нейтроны регистрировались сцинтилляционным детектором с  $n$ - $\gamma$ -разделением по форме высвечивания. Результаты моделирования хорошо согласуются с измеренными формами фронтов нейтронных импульсов (Рисунок 3).

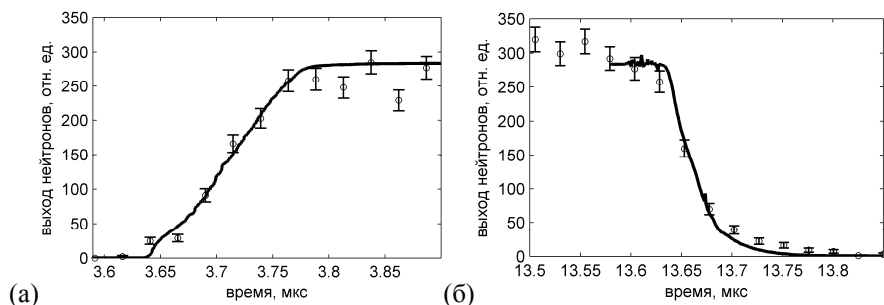


Рисунок 3. а – передний фронт нейтронного импульса, б – задний фронт нейтронного импульса. Символы «о» – измеренные фронты, сплошные линии – смоделированные фронты. Погрешности оценены как среднеквадратичные отклонения в распределении Пуассона (квадратный корень от выхода нейтронов).

Согласно результатам измерения скорости счёта нейтронов сцинтилляционным детектором, выход нейтронов в номинальном режиме (80 кВ ускоряющее напряжение, 50 мкА ионный ток) составляет  $10^5$  н/с, что на порядок ниже предельно достижимого выхода. Поскольку качество титана на мишени не контролировалось, то наиболее вероятной причиной заниженного нейтронного выхода является высокое содержание примесей в титане, уменьшающее его способность удерживать дейтерий.

Гипотеза о снижении выхода нейтронов из-за локального перегрева титанового слоя проверена в измерении зависимостей выхода нейтронов от ускоряющего напряжения  $Y(U, I=I_{const})$  и ионного тока  $Y(U=U_{const}, I)$ . В пределах погрешности форма кривой  $Y(U, I=I_{const})$  такая же, как у аналогичной теоретической кривой, рассчитанной в главе 1, что свидетельствует в пользу неизменности стехиометрии дейтерия в мишени при повышении ускоряющего напряжения. Зависимость  $Y(U=U_{const}, I)$  при напряжениях 34 кВ и 70 кВ имеет вид прямой пропорциональности, что так же свидетельствует о неизменности стехиометрии дейтерия в мишени в интервале вводимой тепловой мощности от 0.78 до 4.76 Вт. Экспериментальных фактов, однозначно подтверждающих гипотезу о локальном перегреве мишени, не обнаружено.

**Четвёртая глава** посвящена разработке кода Scattronix для статистического моделирования спектров ядер отдачи при калибровке КЛД моноэнергетическими нейтронами.

В разделе 4.1 приведён краткий обзор экспериментов по поиску тёмной материи и обоснована актуальность задачи развития систем рассеяния нейтронов для калибровки КЛД.

В разделе 4.2 изложены физические основы стандартной техники калибровки КЛД с использованием схемы совпадений, выделяющие события рассеяния нейтрона на нужный угол по совпадению срабатывания КЛД и сцинтилляционного детектора нейтронов (Рисунок 4).

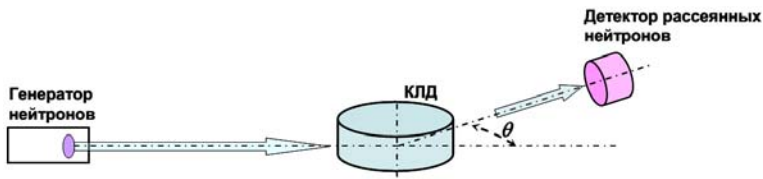


Рисунок 4. Схема калибровки криогенного лавинного детектора (КЛД) с помощью генератора нейтронов.

Из закона сохранения энергии и импульса нетрудно получить формулу для зависимости энергии ядра отдачи от угла рассеяния, энергии нейтрона и потери энергии в неупругом процессе

$$E_{rec} = \frac{m_n M}{(m_n + M)^2} \left( 2E_0 - \varepsilon - \frac{m}{M} \varepsilon \right) - \frac{2m_n M}{(m_n + M)^2} \sqrt{E_0 \left( E_0 - \varepsilon - \frac{m}{M} \varepsilon \right)} \cdot \cos \tilde{\theta}_{sc}$$

где где  $m_n$  – масса нейтрона,  $M$  – масса ядра,  $\varepsilon$  – потеря энергии на возбуждение ядра (при упругом рассеянии  $\varepsilon=0$ ),  $\tilde{\theta}_{sc}$  – угол рассеяния нейтрона в системе центра инерции (СЦИ) ядра и нейтрона. В экспериментальной практике удобно оперировать углом рассеяния нейтрона в лабораторной системе отсчёта (ЛСО)  $\theta_{sc}$ , поскольку дифференциальное сечение задано в зависимости от угла рассеяния в ЛСО. Углы  $\tilde{\theta}_{sc}$  и  $\theta_{sc}$

связаны соотношением:  $\tilde{\theta}_{sc} = \theta_{sc} + \arcsin\left(\frac{v_c}{v'_n} \sin \theta_{sc}\right)$ , где  $v_c = \frac{\sqrt{2mE_0}}{m+M}$  –

скорость центра масс ядра и нейтрона,  $v'_n = \frac{M}{m+M} \sqrt{2\left(\frac{E_0}{m} - \frac{M+m}{M} \frac{\varepsilon}{m}\right)}$  –

скорость нейтрона после рассеяния в СЦИ.

В разделе 4.3 обоснована целесообразность разработки специализированного кода для статистического моделирования калибровки КЛД на инертных газах. Сформулированы допущения, на которых основан код: 1) пренебрежение многократным рассеянием нейтронов в чувствительном объёме КЛД; 2) пренебрежение фоном от нейтронов, рассеянных на лабораторном оборудовании и инфраструктуре КЛД; 3) учёт только упругого и неупругого рассеяния нейтронов на ядрах.

Раздел 4.4 посвящён алгоритмической структуре и математическому аппарату, задействованному в моделировании.

В пользовательских настройках программы можно выбирать рабочий газ КЛД ( $^{40}\text{Ar}$  и изотопы  $\text{Xe}$  с массами 124-132, 134, 135) и энергию нейтронов (2.45 или 14.1 МэВ), задавать геометрические параметры конфигурации. Программа написана в процедурном ключе на языке программирования среды Matlab 2010. Первая по порядку исполнения часть – это инициализация параметров эксперимента, вторая – цикл с количеством проходов, равным количеству виртуально генерируемых нейтронов.

Для ускорения счёта применен подход, называемый в специализированной литературе смещением по конфигурациям (biased sampling). Суть подхода заключается в том, что реальные плотности вероятности с широкой областью определения (например, вероятность угла рассеяния с областью определения  $[0, \pi]$ ) заменяются «усечёнными» и перенормированными плотностями с «усечённой» областью определения (например, из области определения угла рассеяния вырезается участок, полностью закрывающий сферу, описанную около цилиндрического сцинтиллятора). Смещение по конфигурациям применяется в 5 местах кода: 1) первичные нейтроны из генератора направляются в телесный угол меньше  $4\pi$ ; 2) все нейтроны, попадающие в объём КЛД, рассеиваются, независимо от длины участка траектории, проходящего внутри чувствительного объёма КЛД; 3) область определения угла рассеяния уже, чем интервал  $[0, \pi]$ ; 4) область определения угла поворота (азимут плоскости рассеяния) уже, чем

[0, 2π]; 5) все нейтроны, попадающие в сцинтиллятор, дают высвечивание. Каждый акт смещения  $n$  даёт «неучтённую» вероятность  $P_n$ . Произведение «неучтённых» вероятностей даёт амплитуду, с которой событие входит в спектр (при «несмещённом» моделировании все события входят в спектр с амплитудой, равной единице).

Моделирование учитывает уширение линий неупругого рассеяния засчёт эмиссии  $\gamma$ -квантов. В каждом акте неупругого рассеяния генерируется добавка энергии ядра отдачи по формуле

$$\Delta E_{rec} = \frac{(0,033\varepsilon)^2 - 2 \cdot 0,033\varepsilon \sqrt{2ME_{rec}} \cdot (1 - 2RAND)}{2M},$$

где масса ядра отдачи выражена в а.е.м., а энергии – в кэВ.  $RAND$  – есть случайная величина, равномерно распределённая в интервале [0, 1].

В разделе 4.5 рассмотрены погрешности определения угла рассеяния, обусловленные конечными размерами детекторов и на примере наиболее интересной конфигурации калибровки (рассеяние на малый угол) продемонстрировано хорошее согласие результатов моделирования и аналитической оценки ширины спектральных линий.

**Пятая глава** посвящена калибровке КЛД на  $^{40}\text{Ag}$  по неупругому рассеянию нейтронов на малый угол. Проведено моделирование калибровки по неупругому рассеянию нейтрона через уровень 1.46 МэВ на малый угол и по упругому рассеянию на угол  $22^\circ$  (чтобы получить одну и ту же медианную энергию ядер отдачи). Смоделированную конфигурацию отличает достаточно низкое пространственное разрешение КЛД (размер чувствительной области  $\varnothing 5 \times 5$  см). Описан способ учёта влияния комптоновского рассеяния  $\gamma$ -квантов энергией 1.46 МэВ на спектр амплитуд событий. Показано, что в случае низкого пространственного разрешения КЛД калибровка DD-нейтронами по неупругому рассеянию может давать скорость счёта, в 15 раз большую, чем калибровка по упругому рассеянию при одинаковой ширине спектральных линий. Для DT-нейтронов такого эффекта нет.

Метод калибровки по неупругому рассеянию может быть применён и в детекторе с высоким пространственным разрешением. При этом использование двух альтернативных методов калибровки повысит надёжность результатов.

**В шестой главе** описан эксперимент по измерению ионизационного выхода ядер отдачи жидкого  $^{40}\text{Ar}$  и методика обработки результатов измерений. В эксперименте использовался генератор нейтронов, описанный в третьей главе (Рисунок 5).

В ходе эксперимента прототип КЛД облучается нейтронами, в результате чего в криогенном объёме возникают ядра отдачи аргона, которые производят ионизацию. Первичные электроны ионизации вытягиваются внешним электрическим полем 2.3 кВ/см в двойной газовый электронный множитель (ГЭУ). Зарядовый сигнал КЛД снимается с последнего

электрода второго ГЭУ с использованием зарядочувствительных усилителей. Сигналы оцифровываются и записываются в память осциллографа LeCroy HRO 66Z для последующей оффлайн-обработки.

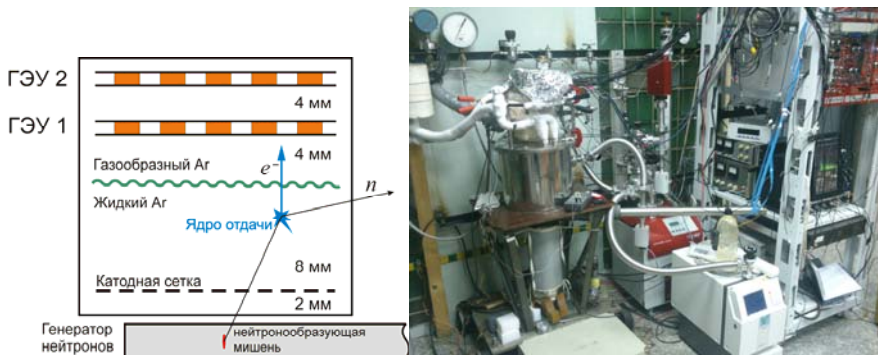
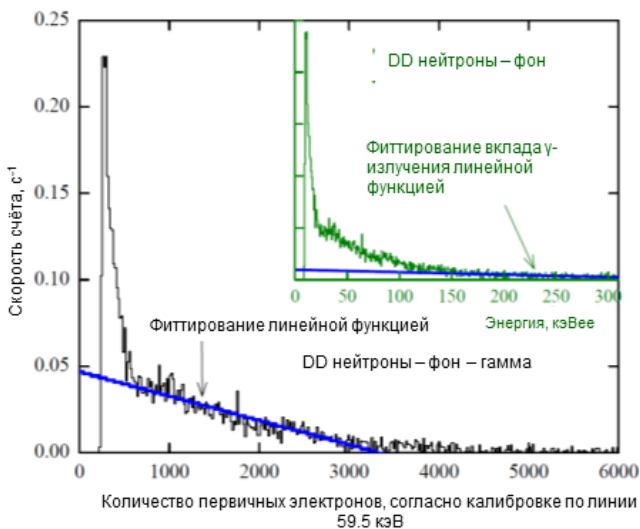


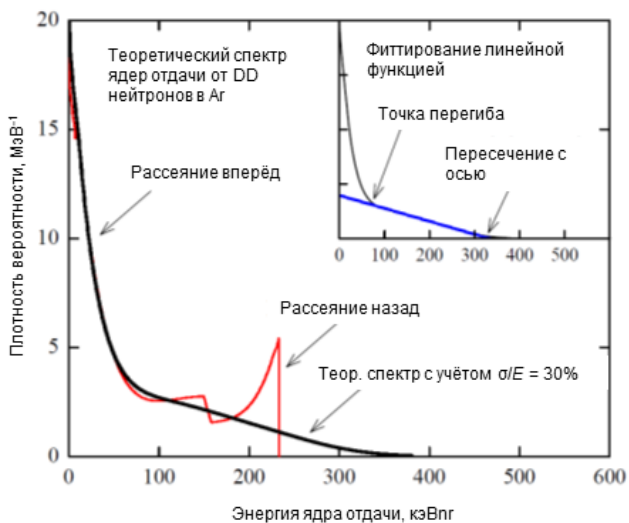
Рисунок 5. Конфигурация эксперимента по двухпозиционному измерению ионизационного выхода ядер отдачи  $^{40}\text{Ar}$ .

На этапе оффлайн-обработки спектр сигналов КЛД, полученный при облучении нейтронами, очищается от вклада фоновых событий, в том числе от вклада гамма-квантов неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов (Рисунок 6а). Полученный таким образом спектр событий необходимо сравнить с теоретическим спектром ядер отдачи, учитывающим конечное энергетическое разрешение КЛД  $\sigma/E = 30\%$  ( $\sigma$  – дисперсия,  $E$  – рассматриваемое значение энергии). Теоретический спектр ядер отдачи может быть смоделирован в Scattronix, если в спектр заносить все события рассеяния нейтронов на аргоне без ограничения угла рассеяния (Рисунок 6б).

При сравнении теоретического спектра с экспериментальным можно выбрать две точки, в окрестности которых происходит быстрое изменение наклона кривой спектра, и определить в них ионизационный выход по формуле  $Q_y = n_e/E$ . Это границы интервала, на котором справедлива линейная аппроксимация медленно спадающей части спектров. Оценка ионизационного выхода в этих точках составляет  $7.8 \pm 1.1 e^-/\text{кэВ}$  (на правой границе) и  $9.7 \pm 1.3 e^-/\text{кэВ}$  (на левой границе). Энергии ядер отдачи, которые следует поставить в соответствие этим значениям, – это  $80 \pm 2$  кэВ и 233 кэВ.



(а)



(б)

Рисунок 6. а – экспериментальный спектр событий в КЛД, б - теоретический спектр ядер отдачи  $^{40}\text{Ag}$  при облучении нейтронами 2.45МэВ, рассчитанный в Scattronix, и его свёртка с распределением Гаусса с  $\sigma/E = 30\%$ .

**В заключении** изложены основные результаты, полученные в диссертации:

- 1 Разработан стационарный итерационный метод моделирования электростатических систем с пространственным зарядом и объёмной ионизацией, который может быть реализован с использованием

- инструментов коммерческих программных пакетов для МКЭ-моделирования. Сформулированы границы применимости метода.
2. Предложена, детально проработана и реализована концепция бесплазменной нейтронной трубки. Номинальный нейтронный выход, полученный на первой трубке составил  $10^5$  н/с при ускоряющем напряжении 80 кВ и токе ионов 50 мкА.
  3. Экспериментально продемонстрировано, что длительность переднего и заднего фронтов нейтронных импульсов нейтронной трубки составляет 110 и 100 нс соответственно, что находится в хорошем согласии с результатами моделирования.
  4. Разработан специализированный код для статистического моделирования спектров ядер отдачи при калибровке КЛД.
  5. Разработан метод калибровки КЛД на  $^{40}\text{Ag}$  на энергию ядер отдачи 8.2 кэВ по неупругому рассеянию DD-нейтронов через возбуждение ядерного уровня 1.46 МэВ.
  6. Генератор нейтронов и код Scattronix успешно применены для измерения ионизационного выхода ядер отдачи жидкого аргона энергией 80 и 233 кэВ.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. Патент на изобретение № 2479878 – Полосаткин С.В., Гришняев, Е.С. Бурдаков А.В., Шульженко Г.И. Способ сепарации одноатомных ионов водорода в ионных источниках и импульсная нейтроногенерирующая трубка с сепарацией одноатомных ионов (варианты), 5 апр. 2011.
2. Yu.S. Sulyaev, E.A. Puryga, A.D. Khilchenko, E.S. Grishnyaev et al. Multi-purpose fast neutron spectrum analyzer with real-time signal processing // 2<sup>nd</sup> International Conference Frontiers in Diagnostic Technologies, Laboratori Nazionali di Frascati, 28-30 Nov. 2011.
3. Yu.S. Sulyaev, E.A. Puryga, A.D. Khilchenko, E.S. Grishnyaev et al. Multi-purpose fast neutron spectrum analyzer with real-time signal processing // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A - 2013 - 720 - pp. 23-25.
4. S.V. Polosatkin, A.V. Burdakov, E.S. Grishnyaev Erosion of copper target irradiated by ion beam // Известия Высших Учебных Заведений. Физика – 2012 - т. 55, № 12-3 - с. 36-39.
5. Гришняев Е.С. Определение выхода титановой нейтронообразующей мишени / Е.С. Гришняев, С.В. Полосаткин // Атомная энергия – 2012 - т. 113, вып. 5 – с. 267-280.
6. А. Е. Бондарь, А. Ф. Бузулуцков, А. В. Бурдаков, Е. С. Гришняев и др. Проект систем рассеяния нейтронов для калибровки детекторов тёмной материи и низкоэнергетических нейтрино // Вестник НГУ. Серия: Физика - 2013. Т. 8, вып. 3 - с. 27-38.



7. Гришняев Е.С. Программа для статистического моделирования рассеяния нейтронов в криогенном детекторе слабозаимодействующих частиц / Е.С. Гришняев, А.Д. Долгов, С.В. Полосаткин // Вестник НГУ. Серия: Физика – 2013 - Т. 8, вып. 3 - с. 39-45.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616339 – Полосаткин С.В., Гришняев Е.С. Scattronix – программа для статистического моделирования спектров ядер отдачи при калибровке криогенного детектора тёмной материи монохроматическим генератором быстрых нейтронов 3 июля 2013.
9. Патент на изобретение № 2531550 – Полосаткин С.В., Гришняев, Е.С. Способ калибровки криогенного детектора частиц на основе жидкого аргона и устройство для реализации способа, 21 мая 2013.
10. S. Polosatkin, E. Grishnyaev, A. Dolgov. On calibration of the response of liquid argon detectors to nuclear recoils using inelastic neutron scattering on  $^{40}\text{Ar}$  // Journal of Instrumentation – 2014 - Vol. 9, Iss. 10 - P10017.
11. A. Bondar, A. Buzulutskov, A. Dolgov, E. Grishnyaev et al. Measurement of the ionization yield of nuclear recoils in liquid argon at 80 and 233 keV // European Physics Journal – 2014 - Vol. 108, Iss. 1, 12001.
12. A. Bondar, A. Buzulutskov, A. Dolgov, E. Grishnyaev et al. Nuclear recoil detection in liquid argon using a two-phase CRAD and DD neutron generator // Journal of Instrumentation – 2014 - Vol. 9, Iss. 8 C08020.
13. Grishnyaev E. Modeling of deuterium ionization and extraction from an ion source driven by heated cathode / E.S. Grishnyaev and S.V. Polosatkin // IEEE Transactions on Plasma Science – 2015 - Vol. 43, Iss. 11 - pp. 3856 - 3867.
14. Grishnyaev E. The study of neutron burst shape of a neutron tube driven by dispenser cathode / E. Grishnyaev, S. Polosatkin // Nucl. Instrum. And Meth. In Phys. Res. A - 2016 - 828 - pp. 91-96.

ГРИШНЯЕВ Евгений Сергеевич

**Малогабаритный генератор  
быстрых нейтронов для калибровки  
детекторов слабозаимодействующих частиц**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 10.10.2016 г.

Подписано в печать 11.10.2016 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.1 усл. печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 17

---

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*