

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Шакиров Алексей Вячеславович

**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ПОДГОТОВКИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ
КСЕНОНОВОГО ДВУХФАЗНОГО ЭМИССИОННОГО ДЕТЕКТОРА
РЭД-100**

Специальность: 1.3.2 — приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва — 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: Сосновцев Валерий Витальевич,
кандидат физико-математических наук, доцент
отделения ядерной физики и технологий офиса
образовательных программ НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: Бузулуцков Алексей Фёдорович,
доктор физико-математических наук, главный
научный сотрудник лаб. 3-3 Института ядерной
физики им. Г.И. Будкера Сибирского
отделения РАН

Ляшук Владимир Иванович,
доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник Отдела экспериментальной
физики Института ядерных исследований РАН

Ростовцев Андрей Африканович,
доктор физико-математических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник
лаб. №5 Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
проблем передачи информации
им. А.А. Харкевича РАН

Защита состоится 17 мая 2023 г. в 15 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета МИФИ.1.05 на базе НИЯУ МИФИ по адресу:
115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте:
<https://ds.mephi.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета МИФИ.1.05,
д.ф.-м.н., профессор



Улин Сергей Евгеньевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Важной задачей, стоящей перед современной ядерной физикой и физикой элементарных частиц, является поиск и исследование таких редких электрослабых взаимодействий, как рассеяние гипотетических частиц тёмной материи — вимпов — на атомных ядрах и нуклонах, а также процессов когерентного рассеяния нейтрино на атомных ядрах.

Одним из наиболее перспективных методов, применяемых в детекторах, чувствительных к таким процессам, является метод двухфазной эмиссионной регистрации с использованием жидких инертных газов в качестве рабочего вещества. Для эффективной работы данного метода необходима высокая степень очистки применяемого инертного газа от высокомолекулярных и электроотрицательных примесей, таких как кислород, элегаз или фторуглеродные соединения, способных поглощать образующиеся в процессе искомого взаимодействия электроны ионизации. Подобные примеси могут оставаться после технологических процессов, связанных с получением и разделением инертных газов, а также появляться в процессе проведения эксперимента вследствие десорбции молекул с внутренних поверхностей детектора.

Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100, используемый в эксперименте по поиску и исследованию упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона, содержит ~200 кг жидкого ксенона в качестве рабочей среды. Особенностью используемого в детекторе ксенона является то, что он был подвергнут процедуре изотопического разделения посредством газовых центрифуг, вследствие чего оказался загрязнён высокомолекулярными примесями и не поддавался стандартному методу очистки при помощи металлических геттеров [1]. В связи с этим возникла

необходимость поиска нетривиального способа очистки рабочего вещества детектора.

Кроме того, уникальной особенностью детектора РЭД-100 является необходимость регистрации сигналов, состоящих из одиночных электронов ионизации, в условиях работы установки на поверхности Земли. Работа установки в наземных условиях приводит к возникновению в рабочем объёме детектора большого количества спонтанных электронов, ассоциированных с пролетом высокоэнергетических мюонов космических лучей, что является нежелательным фоном для искомых сигналов, состоящих из нескольких электронов ионизации. В связи с этим возникла необходимость поддержания высокой степени чистоты ксенона в процессе работы детектора.

Цель диссертационной работы

Целью работы являлась разработка методики подготовки и поддержания в рабочем состоянии жидкого ксенона, используемого в качестве рабочей среды детектора РЭД-100 в эксперименте по поиску процесса упругого когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино (УКРН) на ядрах ксенона, а именно — поддержание уровня чистоты ~ 200 кг жидкого ксенона в течение не менее 1 года в состоянии с временем жизни электронов ионизации до захвата примесями не менее 1 мс.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Предварительная очистка сильно загрязнённого вследствие процедуры изотопического разделения на газовых центрифугах исходного ксенона с помощью усовершенствованной методики электроискровой очистки на установке «Мойдодыр».

2. Разработка и организация способа непрерывной энергетически эффективной циркуляционной очистки жидкого ксенона (-100°C) при помощи металлического геттера SAES Monotorr, работающего при температуре $+510^{\circ}\text{C}$.

3. Разработка и реализация метода контроля чистоты ксенона при помощи измерения времени жизни квазисвободных электронов до захвата примесями непосредственно в самом детекторе с использованием треков ионизации, возникающих вследствие пролёта мюонов космических лучей через детектор.

В результате решения вышеуказанных задач была обеспечена постановка уникального эксперимента РЭД-100 по поиску процесса упругого когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино (УКРН) на ядрах ксенона на Калининской АЭС.

Научная новизна работы

Впервые разработан и реализован комплексный метод очистки ксенона, обеспечивший за время ~ 3 месяцев уровень чистоты образца ксенона массой ~ 200 кг, соответствующий времени жизни электронов ионизации > 2 мс, что позволило провести на Калининской АЭС уникальный эксперимент по поиску процесса упругого когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино (УКРН) на атомных ядрах ксенона, поставивший мировой рекорд по количеству экспонирующегося на реакторах рабочего вещества.

Достоверность результатов исследования подтверждается:

1. Обеспечением проведения эксперимента РЭД-100 на Калининской АЭС.
2. Соответствием заявленного уровня чистоты лучшим результатам современных экспериментов, использующих жидкий ксенон в качестве рабочего вещества.
3. Независимыми измерениями времени жизни электронов ионизации до захвата электроотрицательными примесями в детекторе РЭД-100 с помощью источников гамма-излучения.

Практическая значимость работы

1. Разработан комплексный метод подготовки рабочей среды детекторов на основе жидкого ксенона, обеспечивший время жизни электронов

ионизации до захвата электроотрицательными примесями > 2 мс в образце ксенона массой ~ 200 кг, изначально загрязнённом при центрифужном выделении изотопа ^{124}Xe , и не поддававшемся очистке стандартными промышленными геттерами. Указанный метод позволил достичь необходимой чистоты ксенона за рекордное время ~ 3 месяцев, что обеспечило проведение уникального эксперимента РЭД-100 на Калининской АЭС с целью первого наблюдения и исследования эффекта УКРН на ядрах ксенона.

2. Разработанный метод позволит удовлетворить требования к уровню чистоты ксенона в многотонных детекторах нового поколения (nEXO, DARWIN), которые, с большой вероятностью, будут использовать ксенон, загрязнённый при проведении процедуры изотопического разделения посредством газовых центрифуг.

Личный вклад соискателя

Все основные результаты работы были получены лично автором, либо при его определяющем участии, включая:

1. Разработку и применение комплексного метода подготовки рабочей среды двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100, который обеспечил проведение уникального физического эксперимента на Калининской АЭС.

2. Разработку метода измерения уровня чистоты жидкого ксенона по сигналам от мюонов космических лучей, пересекающих рабочий объём детектора РЭД-100. Все измерения уровня чистоты данным методом как в тестовых сеансах в НИЯУ МИФИ, так и во время проведения эксперимента на Калининской АЭС, также выполнены лично автором.

3. Изучение и описание процесса образования наночастиц металла при высоковольтном разряде в жидком ксеноне, исследование их характеристик, разработку и использование оптимизированного способа электроискровой

очистки жидкого ксенона, основанного на динамике происходящих при этом процессов.

Соискатель активно участвовал в работе эксперимента РЭД-100 с 2013 года, занимался сборкой и отладкой различных систем данного эксперимента, участвовал в обработке данных и разработке программного обеспечения, разработал методику измерения времени жизни электронов ионизации и являлся ответственным за контроль чистоты ксенона при проведении эксперимента на КАЭС. Для проведения исследований по теме диссертации в 2018 г. автором был получен грант РФФИ «мой первый грант». Все заявленные цели гранта были успешно достигнуты в 2020 г. на момент завершения гранта.

На защиту выносятся

1. Усовершенствованный метод электроискровой очистки, обеспечивающий возможность очистки ксенона, загрязнённого электроотрицательными и высокомолекулярными примесями и плохо поддающегося очистке стандартными геттерами.

2. Результаты анализа частиц, образующихся при распылении материала электродов в процессе электроискровой очистки.

3. Комплексный метод очистки промышленных количеств ксенона, позволивший обеспечить работоспособность детектора РЭД-100 с общей массой ксенона ~ 200 кг в эксперименте по поиску эффекта УКРН на ядрах ксенона, проведённом на КАЭС в 2021–2022 гг. Метод позволил за время ~ 3 месяцев обеспечить уровень чистоты рабочей среды детектора, при котором время жизни электронов ионизации до захвата электроотрицательными примесями составляет > 2 мс, а также поддерживать необходимый уровень чистоты в течение всего времени проведения эксперимента.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались автором на следующих российских и международных конференциях:

- На международных конференциях по физике частиц и астрофизике ICPPA-2018 (Москва), ICPPA-2020 (online)
- На молодёжной конференции по теоретической и экспериментальной физике (2019, Москва)
- На международной молодёжной школе-конференции по ядерной физике и технологиям (2020, online)

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 4 работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и проиндексированных в базах данных Web of Science и Scopus, получен патент на полезную модель.

Кроме того, по теме диссертации в 2018 г. автором был получен грант РФФИ «мой первый грант» №18–32–00920 под названием «Разработка технологии подготовки рабочих сред двухфазных эмиссионных детекторов следующего поколения для постановки ядерно-физических экспериментов фундаментального значения», успешно завершённый в 2020 г. с выполнением всех поставленных задач.

Также под научным руководством автора в 2018 г. в НИЯУ МИФИ был защищён диплом бакалавра по теме «Исследование характеристик системы контроля чистоты ксенона установки электроискровой очистки «Мойдодыр», используемой для эксперимента РЭД-100».

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения. Содержит 107 страниц, 35 рисунков, 4 таблицы и список литературы, состоящий из 74 ссылок на источники.

Основное содержание работы

Введение посвящено общей характеристике работы. Рассмотрены актуальность темы диссертации, цель работы, научная новизна и достоверность полученных результатов. Изложены основные публикации по теме работы, показана практическая ценность результатов и личный вклад соискателя. Обозначены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрен двухфазный эмиссионный метод регистрации частиц, изобретённый группой советских учёных в МИФИ в 1970-х гг. Описаны ответственные за регистрацию процессы, происходящие в рабочей среде при взаимодействии с ней регистрируемой частицы. Приведён принцип работы современных двухфазных эмиссионных детекторов, использующих бесстеночный режим и способных восстанавливать трёхмерные координаты и энергию точечных событий. Рассмотрены сравнительные характеристики ксенона и аргона, двух наиболее часто используемых рабочих веществ в детекторах такого типа.

Рассмотрены физические задачи, решаемые при помощи двухфазных эмиссионных детекторов, а именно: поиск тёмной материи в виде «вимпов» и исследование упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомных ядрах. Произведён обзор современных двухфазных эмиссионных детекторов, указан текущий статус экспериментов и современные физические результаты. Показана практическая ценность решения этих физических задач.

Показана необходимость глубокой очистки рабочего вещества детекторов на основе конденсированных благородных газов от различных примесей, ухудшающих эффективность сбора электронов ионизации.

Рассмотрен механизм захвата примесями электронов, указаны количественные критерии оценки чистоты рабочего вещества. Приведён обзор существующих методов очистки рабочих сред для детекторов, использующих двухфазный эмиссионный метод регистрации.

Отдельно рассмотрен двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100, разработанный в МИФИ и предназначенный для поиска и исследования когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона. Детально описано устройство детектора и решаемые физические задачи. Указаны технические особенности используемого в детекторе РЭД-100 ксенона, которые осложнили его очистку.

Обозначена общая схема предлагаемого в диссертационной работе комплексного метода подготовки рабочих сред для двухфазных эмиссионных детекторов.

Во второй главе описана установка для электроискровой очистки конденсированных сред «Мойдодыр», первоначально созданная в ИТЭФ в 1987 г. группой советских учёных с целью очистки жидкого криптона для прототипа сцинтилляционного калориметра установки GEM¹, планируемой к использованию на коллайдере SSC². Данная установка была выбрана с целью предварительной, «грубой» очистки ксенона для детектора РЭД-100. Подробно рассмотрена конструкция установки.

Главной частью установки «Мойдодыр» является многослойный криостат, представляющий собой цилиндрическую ёмкость вместимостью ~ 100 л, погружённую в двухслойный криостат. Во внутреннюю ёмкость конденсируется инертный газ, и там же производится очистка конденсированной среды с одновременным контролем её чистоты. Внешний

¹ «Gammas, Electrons and Muons» — по названиям частиц, на регистрацию которых детектор был направлен в первую очередь.

² «Superconducting Super Collider» – проект протон-протонного коллайдера в США, закрытый на этапе строительства в начале 1990-х гг.

двухслойный криостат представляет собой «жидкоазотную рубашку» вместимостью около 120 литров, окружённую вакуумным кожухом. При работе установки давление в вакуумном кожухе поддерживается на уровне $\sim 10^{-5}$ Торр. Пространство между криостатами («газовая рубашка») может либо откачиваться, либо заполняться газообразным азотом, тем самым позволяя регулировать теплоперенос между внутренней ёмкостью с инертным газом и внешней «жидкоазотной рубашкой». Для дополнительного контроля на стенках внутренней ёмкости установлены электрические нагреватели.

Во внутренний криостат погружены высоковольтные электроды, при помощи которых осуществляется электроискровая очистка в жидкости, а также анод ионизационной камеры, служащей для определения чистоты рабочего вещества. В качестве катода ионизационной камеры служит дно криостата. Чистота среды определяется по одной из важнейших характеристик рабочего вещества эмиссионных детекторов — величине времени жизни электронов до их захвата электроотрицательными примесями. Для этого анод ионизационной камеры выполнен в виде алюминиевого диска с установленным на нём источником альфа-частиц ^{241}Am , а под установкой располагается рентгеновская трубка типа БСВ-7. Рентгеновское излучение попадает в камеру сквозь алюминиевые окна, установленные по центру ёмкостей, окружающих ионизационную камеру.

Подробно описан метод математической коррекции сигналов с ионизационной камеры, требуемый для учёта заряда токовым сигналом динамической ёмкости предусилителя и последующего её разряда.

Описан процесс очистки ксенона для детектора РЭД-100 при помощи установки электроискровой очистки «Мойдодыр». Очистка ~ 200 кг жидкого ксенона от времени жизни электронов ионизации < 1 мкс до времени жизни электронов ионизации ~ 100 мкс для детектора РЭД-100 заняла ~ 3 недель. В процессе электроискровой очистки осуществлялся непрерывный мониторинг чистоты ксенона по среднему времени дрейфа электронов ионизации до

захвата электроотрицательными примесями. При помощи импульсной рентгеновской трубки и встроенной ионизационной камеры осуществлялся съём импульсов, возникающих при прохождении электронного трека через объём ионизационной камеры. График, показывающий зависимость времени жизни электронов до захвата электроотрицательными примесями от времени очистки, показан на Рис. 1.

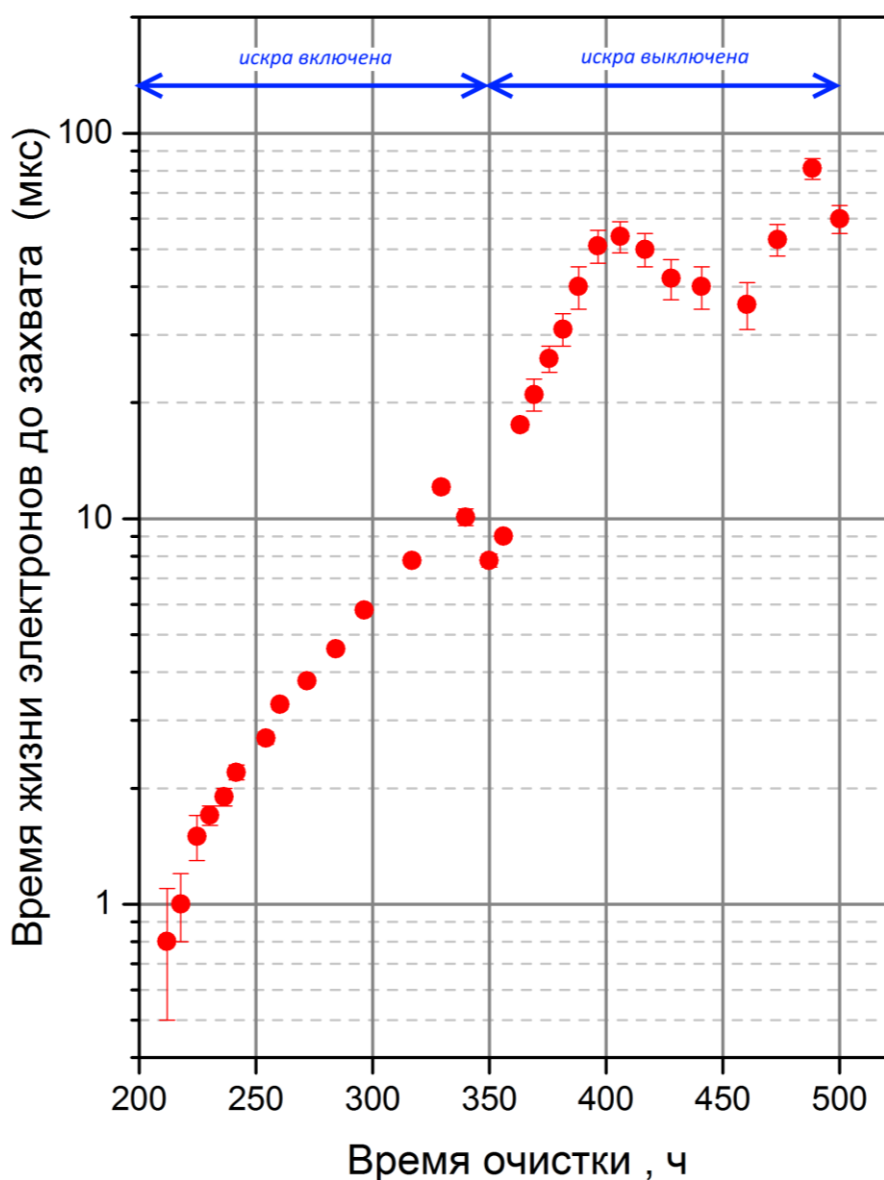


Рис. 1. График зависимости времени жизни электронов от длительности очистки. Видно, что скорость очистки при включённом искровом разряде выходит на плато, а при выключении искры —

возобновляется, что объясняется конкурирующими процессами поглощения и десорбции примесей.

Видно, что при непрерывной искре плато времени жизни электронов находится на уровне 10 мкс, а после отключения увеличивается в несколько раз. Это объясняется тем, что при работе очистке среды электроискровым способом работают несколько параллельных процессов:

1. Абсорбция примесей на нанодисперсной металлической пыли, распыляемой из материала электродов и обладающей большой площадью активной поверхности.
2. Диссоциация высокомолекулярных примесей в разряде, вызванная, по-видимому, жёстким ультрафиолетовым излучением, возникающем при высоковольтном разряде.
3. Десорбция примесей под воздействием ультрафиолетового излучения.

Первый процесс является основным действующим процессом, отвечающим за увеличение времени жизни дрейфующих электронов ионизации, поскольку химически чистый металл хорошо связывает электроотрицательные примеси. Второй и третий процессы противодействуют увеличению степени очистки ксенона от электроотрицательных примесей. Второй процесс самостоятельно генерирует электроотрицательные примеси путём УФ-фотолиза (диссоциации) высокомолекулярных примесей, содержащихся в жидком ксеноне. Третий процесс возвращает электроотрицательные примеси в очищаемый объём. При достижении определённой чистоты ксенона первый и третий процессы сравниваются по производительности, что существенно замедляет скорость очистки ксенона.

С учётом указанных особенностей предложена двухэтапная процедура очистки жидкого ксенона. На первом этапе поддерживается постоянный ток через разрядный промежуток, равный ~ 1 мА. При этом высокомолекулярные примеси диссоциируют под воздействием интенсивного ультрафиолетового

излучения при одновременной генерации титановой пыли из разрядных электродов. На втором этапе искровой разряд выключается, и жидкий ксенон дополнительно очищается уже наработанной титановой пылью.

Для подтверждения гипотезы о том, что в процессе разряда образуется металлический нанопорошок, после сеанса очистки был произведён анализ пыли, осевшей на поверхности различных конструктивных элементов установки. Наглядное представление об образующихся частицах даёт микрофотография установленного в жидкости «свидетеля» в виде кремниевой полированной пластинки. Фотография поверхности «свидетеля» приведена на Рис. 2.

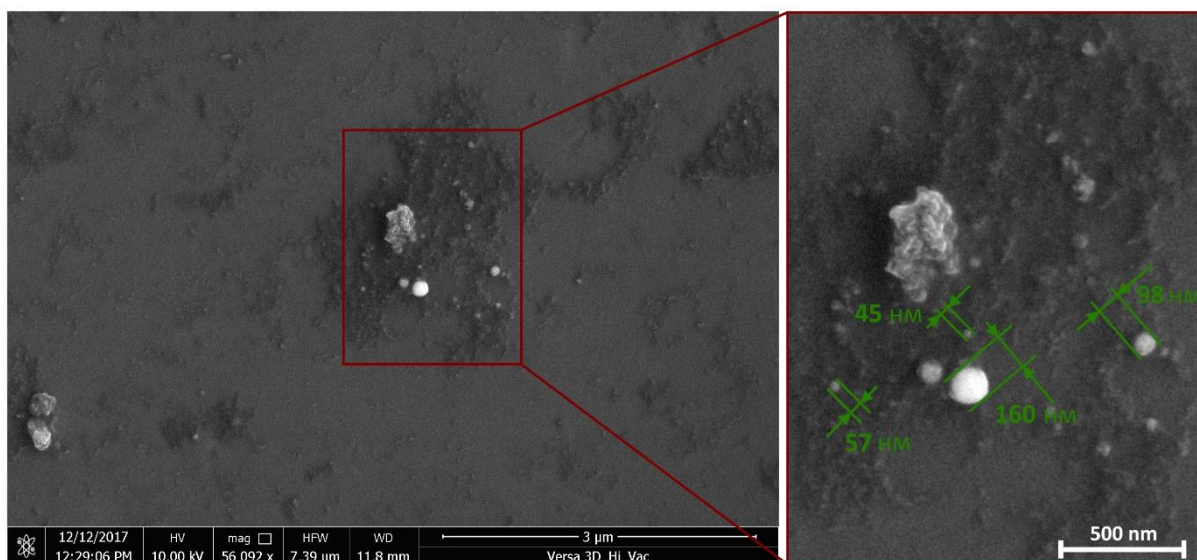


Рис. 2. Фотография поверхности кремниевого «свидетеля», полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50: слева — макрофотография, справа — выделенная слева часть в увеличенном масштабе.

На Рис. 3, а представлена микрофотография поверхности уплотнительной прокладки из посеребрённой меди. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии был определён элементный состав образующихся частиц. На Рис. 3, б представлены результаты исследования элементного состава найденного на поверхности уплотнительной прокладки

шарика. По спектру видно, что образующиеся частицы состоят в основном из титана. Присутствие небольшого количества кислорода, вероятно, связано с тем, что образцы открывались на воздух перед помещением в вакуумную камеру микроскопа. Присутствие серебра объясняется серебряным покрытием металлической подложки, на которую осаждалась титановая пыль.

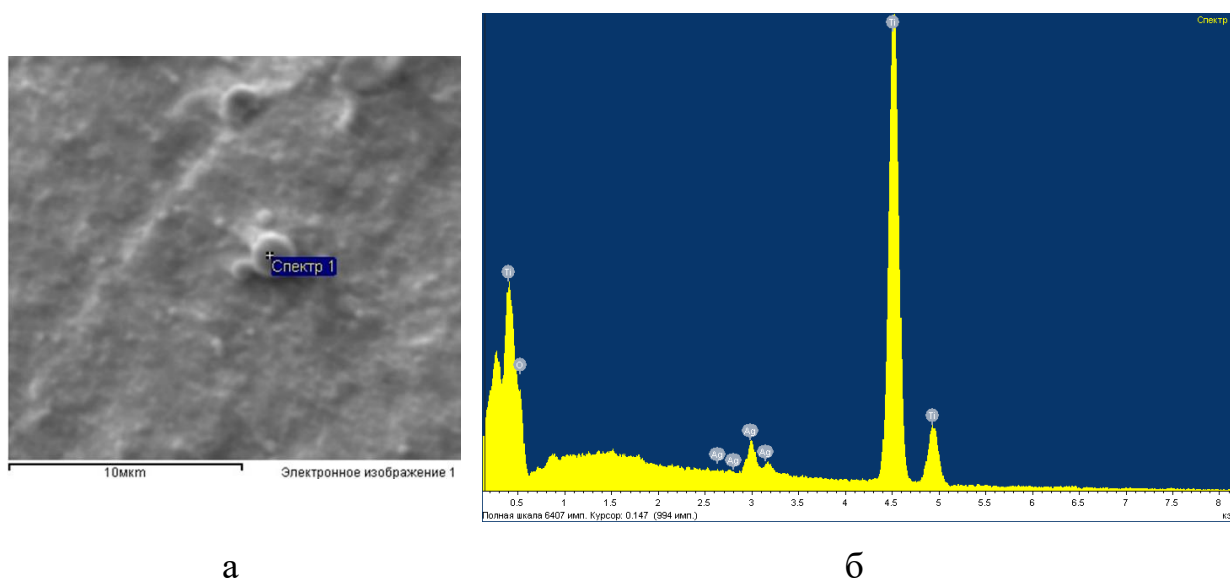


Рис. 3. а — микрофотография титанового шарика на уплотнительной прокладке, б — элементный состав титанового шарика (точка «Спектр 1» на рисунке слева)

Визуальный анализ показал, что описанным методом в жидком ксеноне производится титановая пыль, состоящая из наночастиц (НЧ), форма которых близка к сферической, а средний диаметр не превышает 50 нм. Количественный анализ произведённых наночастиц показал, что начало эффективной очистки жидкого ксенона соответствует массовой концентрации наночастиц порядка 1,2 мг/литр в жидком ксеноне, что соответствует примерно 100 мг общей массы произведённых наночастиц в сеансе очистки жидкого ксенона массой ~ 205 кг. Общая площадь поверхности наночастиц при этом составляла порядка 5 м². Это означает, что отношение массы геттера на основе наночастиц титана к его эффективной площади на несколько

порядков меньше, чем у широко известного горячего металлического геттера типа St122 (Ti-St707) производства компании SAES Pure Gases (который не смог обеспечить очистку ксенона, загрязнённого высокомолекулярными примесями и элегазом в исходном газе). Этот факт подтверждает сделанное заключение о том, что наночастицы титана, произведённые описанным здесь способом, являются чрезвычайно эффективным геттером электроотрицательных примесей.

Таким образом, впервые продемонстрирована возможность очистки промышленных количеств (сотни кг) сильно загрязнённого высокомолекулярной электроотрицательной примесью жидкого ксенона с помощью искрового разряда между титановыми электродами, что позволило увеличить время жизни τ электронов ионизации с $\leq 0,1$ мкс до ≥ 50 мкс в полях от 50 до 500 В/см. При этом было показано, что сложные молекулярные примеси могут быть удалены интенсивным ультрафиолетовым излучением, но при этом наибольшие значения времени жизни электронов достигаются за счёт химической активности титановых наночастиц, наработанных в жидком ксеноне при электрическом разряде между титановыми электродами, после прекращения разряда.

Очищенный описанным способом ксенон был использован в детекторе РЭД-100 для постановки эксперимента на Калининской атомной электростанции с целью исследования возможности контроля выгорания ядерного топлива и фундаментальных исследований в области физики нейтрино.

В третьей главе описана очистка внутренних поверхностей конструктивных элементов детектора. Она состоит из следующих последовательных этапов:

1. Механическая очистка поверхностей, состоящая в:
 - а. Продувке технологических отверстий спиртовым аэрозолем

- б. Обработке поверхностей безворсовыми салфетками, смоченными бензином и затем — спиртом
 - в. Ультразвуковой очистке деталей в бензине и спирте
2. Продув внутреннего объёма детектора инертным газом.

После механической очистки поверхностей детектора производится его сборка в «чистой комнате» — специализированном помещении, гарантирующем низкий уровень мелкодисперсной пыли за счёт непрерывного нагнетания воздуха через фильтры. Далее, для эффективного уменьшения количества адсорбированных поверхностями газов детектор РЭД-100 после сборки был подвергнут принудительной продувке тёплым сухим газообразным азотом.

3. Откачка внутреннего объёма.

На следующем этапе производится откачка внутреннего объёма детектора с целью уменьшения концентрации остаточных газов. Для более эффективной дегазации камера детектора прогревается до температуры $\sim 50^{\circ}\text{C}$, а соединительные магистрали (гибкие металлорукава, шланги) — до температуры выше 100°C . Использование анализатора остаточных газов (RGA) позволяет обеспечивать контроль остаточных газов, а также проверять наличие течи в системе, которая проявляет себя как постепенное приближение соотношения концентраций азота и кислорода к таковому в воздухе.

4. Циркуляция ксенона в газовой фазе.

На следующем этапе детектор заполняется газообразным ксеноном до давления ~ 1 атм, и производится циркуляция ксенона через геттер типа SAES Monotorr при помощи циркуляционного насоса. Непрерывная циркуляция ксенона через инфраструктуру детектора обеспечивает эффективное удаление примесей, поскольку ксенон является хорошим растворителем.

Уровень чистоты ксенона измеряется при помощи сигналов от мюонов космических лучей, пересекающих дрейфовый объём детектора. Образованные вдоль пути мюона электроны ионизации, дрейфуя в рабочем

объёме между катодом и управляющей сеткой, подвергаются захвату электроотрицательными примесями, что влияет на форму сигналов от мюонов, пересекающих детектор в вертикальном направлении. Помимо этого, вследствие соударений с молекулами примесей изменяется средняя кинетическая энергия этих электронов, что приводит к изменению скорости дрейфа и, соответственно, длительности мюонных сигналов.

Для реализации данного способа измерения уровня чистоты ксенона можно вместо отбора вертикальных мюонов усреднять сигналы от всех мюонов, прошедших через детектор. Вследствие того, что для каждого угла влёта в детектор поток мюонов однороден, совокупность всех треков ионизации от мюонов даст также равномерное распределение электронов ионизации по всему рабочему объёму (без учёта изменения удельной ионизации мюонов при пролете сквозь рабочий объём). При суммировании мюонных сигналов с привязкой к первичной сцинтилляции итоговый сигнал моделирует сигнал, вызванный дрейфом такой совокупности треков ионизации (при усреднении мюонных сигналов форма итогового сигнала остается прежней, и меняется лишь амплитуда). В таком случае, усреднённый мюонный сигнал будет отражать зависимость количества вытянутых из жидкой фазы в газовую фазу электронов от вертикальной координаты их образования в детектирующем объёме, а длительность этого сигнала будет отражать полное время дрейфа электронов от катода до границы раздела фаз.

Известно, что скорость дрейфа электронов ионизации в благородных газах сильно зависит от присутствия в газе молекулярных примесей. Это связано с наличием в сечении рассеяния благородных газов т.н. «минимума Рамзауэра», обусловленного квантовомеханическим характером рассеяния электронов в газах. Чтобы оценить чувствительность метода, описанного выше, к количественному содержанию примесей, были проделаны расчёты скоростей дрейфа электронов в ксеноне с добавками азота в диапазоне от 10^{-4} % (1 ppm) до 10^{-2} % (100 ppm). Скорости дрейфа были рассчитаны с

использованием программы "MAGBOLTZ" [2]. В качестве первой добавки был выбран азот — основной компонент воздуха. На Рис. 4 представлен основной результат — зависимость скорости дрейфа электронов от содержания азота при разных напряжённостях электрического поля.

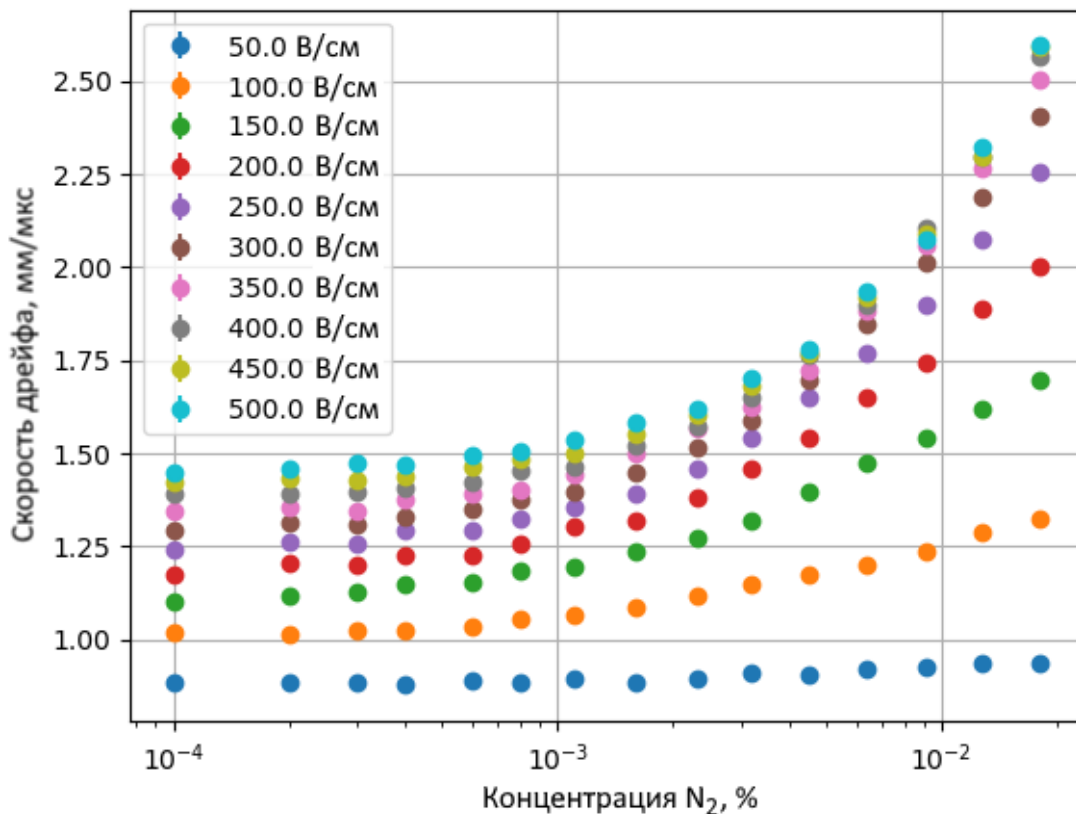


Рис. 4. Зависимость скорости дрейфа электронов от содержания азота при разных напряжённостях электрического поля

Из графика видно, что при достаточно высоких полях можно детектировать наличие примеси азота на уровне десятков ppm. Не менее интересно выглядит и другая проекция данной зависимости — график отношения скорости дрейфа электронов в смеси ксенона с азотом к скорости дрейфа электронов в чистом ксеноне от напряжённости электрического поля при различных концентрациях азота (Рис. 5).

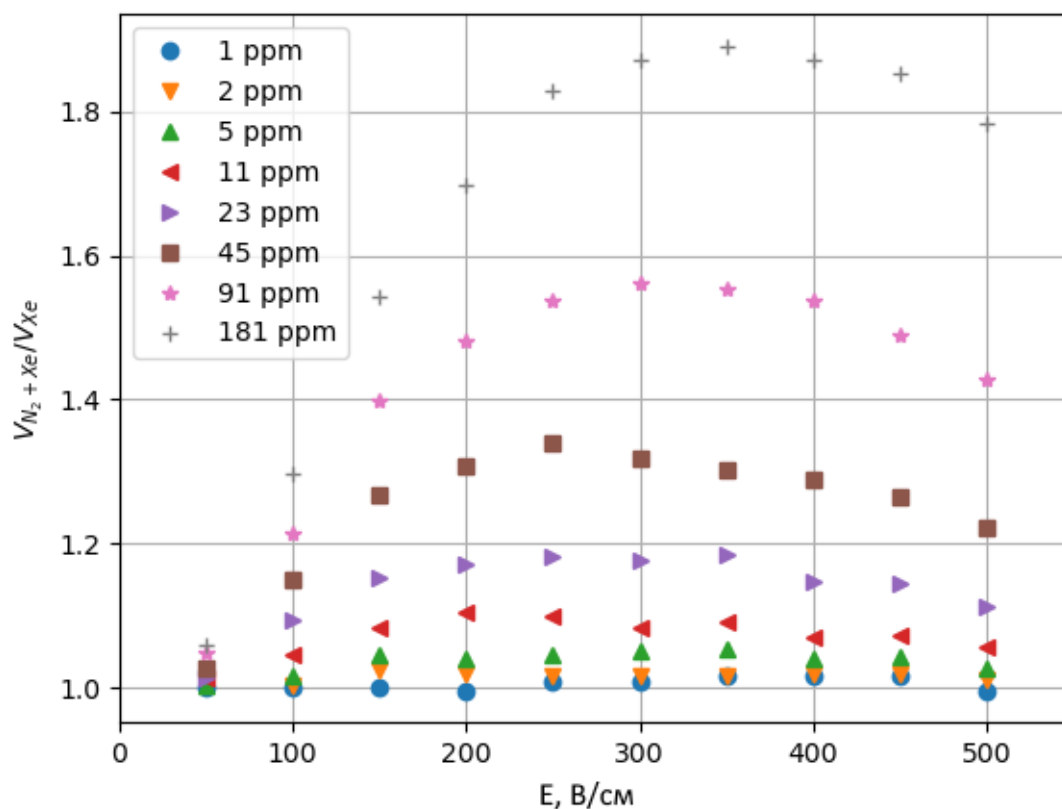


Рис. 5. Зависимость отношения скорости дрейфа электронов в смеси ксенона с азотом к скорости дрейфа электронов в чистом ксеноне от напряжённости электрического поля при различных концентрациях азота.

Из последнего графика видно, что относительное увеличение скорости дрейфа электронов в ксеноне с добавкой азота в зависимости от напряжённости электрического поля имеет максимум, при этом значение напряжённости, при котором наблюдается указанный максимум, отличается для разных концентраций азота в ксеноне. Это означает, что можно оптимизировать контроль очистки ксенона от азота — например, варьируя напряжённость электрического поля так, чтобы скорость изменения дрейфа электронов в рабочем веществе была максимальной.

В четвертой главе описана циркуляционная очистка жидкого ксенона. В течение всего времени работы двухфазных эмиссионных детекторов требуется непрерывное удаление примесей, выделяемых внутренними поверхностями. С этой целью используется набор инструментов и методов,

позволяющих осуществлять циркуляцию ксенона по замкнутому контуру аналогично тому, как это делается для циркуляции ксенона в случае детектора, наполненного газом. Общая схема циркуляционной очистки жидкого ксенона показана на Рис. 6.

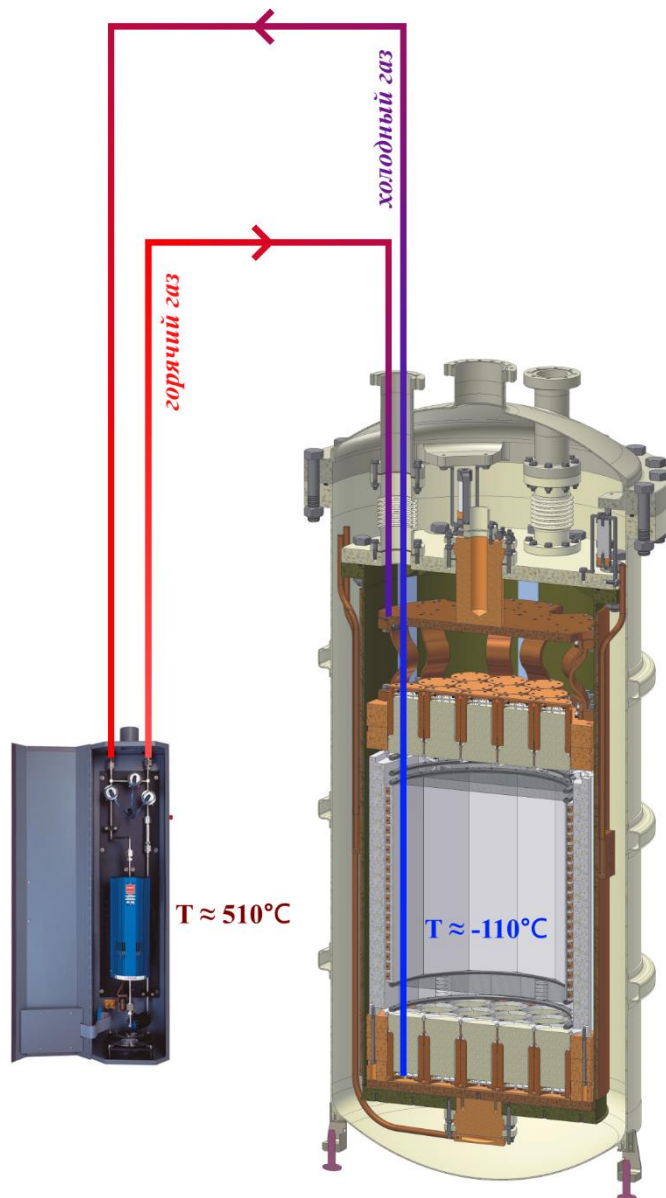


Рис. 6. Упрощённая схема циркуляционной очистки ксенона для эксперимента РЭД-100. Слева показан геттер SAES Monotorr, справа — детектор РЭД-100 в разрезе. Стрелками обозначено направление циркуляции, цветом — температура ксенона.

При помощи циркуляционного насоса ксенон прокачивается по замкнутому контуру: из рабочего объёма детектора жидкий ксенон забирается при помощи циркуляционного насоса посредством трубки, проходящей вертикально в детекторе до дна камеры, далее проходит через горячий металлический геттер и возвращается обратно в детектор, где вновь конденсируется. Для оптимизации энергопотребления используется теплообменник, суть которого заключается в следующем: выходящий из детектора холодный газ проходит по сильфону, коаксиально вложенному в другой сильфон, по которому тёплый газ, прошедший через геттер, возвращается в детектор. Такая конструкция значительно уменьшает расход жидкого азота для поддержания температурного режима криостата.

С целью температурной стабилизации жидкого ксенона используется термосифонная технология. Термосифон представляет собой вертикально расположенную запаянную с обоих концов трубку с теплоносителем (например, азотом). Нижний конец трубки имеет тепловой контакт с криостатом детектора, а верхний конец охлаждается (в РЭД-100 — погружается в резервуар, заполненный свободнокипящим жидким азотом). При этом в нижнем конце трубки происходит испарение теплоносителя, а в верхнем конце — его конденсация. Перенос тепла осуществляется за счёт разницы в плотности жидкой и газообразной фаз теплоносителя: под действием гравитации более плотный конденсат стекает вниз по внутренним стенкам тепловой трубки. Можно регулировать мощность теплопередачи термосифона, регулируя количество азота в термосифонах посредством патрубка в верхней его части. [3] На Рис. 7 показана схема системы термостабилизации, используемая в РЭД-100.

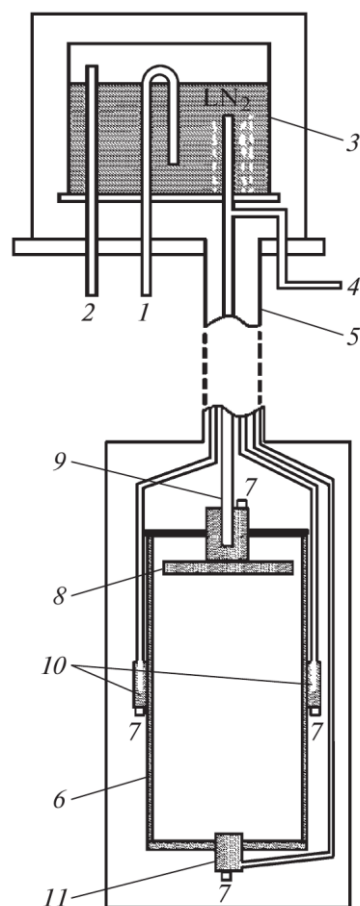


Рис. 7. Схема системы термостабилизации детектора РЭД-100. 1 — трубка для заливки жидкого азота в резервуар, 2 — трубка, уравнивающая давление внутри резервуара, 3 — жидкоазотный резервуар, 4 — трубка для подачи теплоносителя в термосифон, 5 — вакуумный металлорукав, 6 — внутренний сосуд криостата, окружённый медным листом, 7 — датчики температуры, 8 — верхний теплообменник, 9 — верхний термосифон, 10 — боковые теплообменники, 11 — нижний теплообменник [3]

Для отслеживания степени чистоты жидкого ксенона используется определение времени жизни электронов до их захвата путём анализа усреднённого сигнала от мюонов в детекторе, как это было описано в предыдущей главе для циркуляции ксенона в газовой фазе.

Примеры усреднённых мюонных сигналов во время сеанса показаны на Рис. 8.

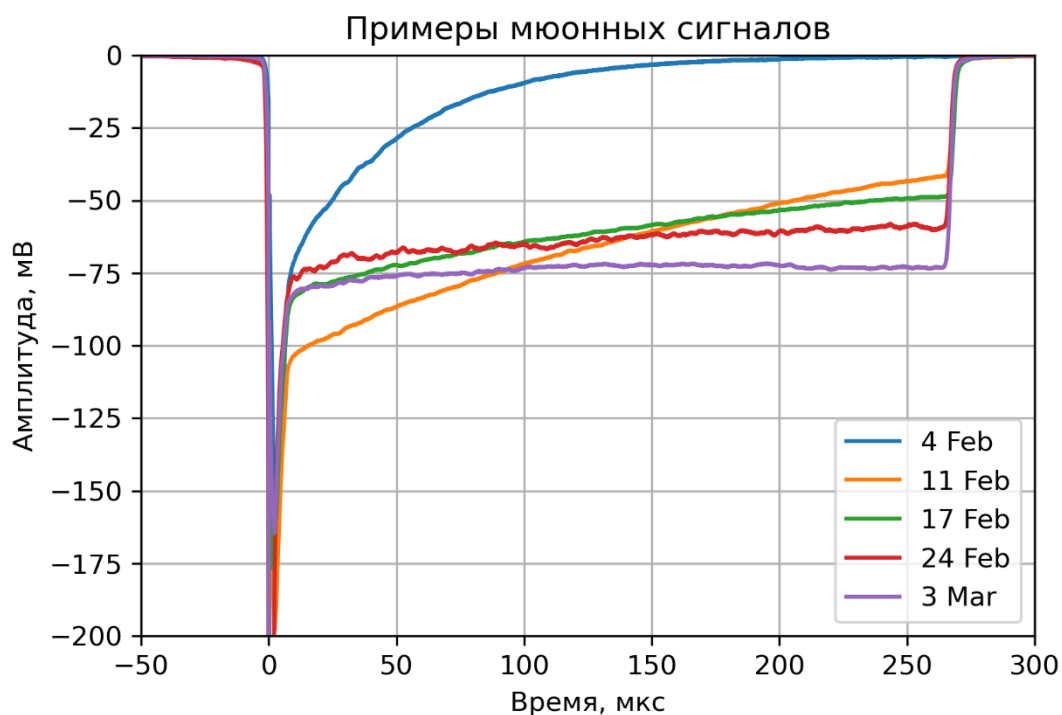


Рис. 8. Примеры мюонных сигналов во время сеанса

Количественно чистота ксенона может быть оценена из аппроксимации усреднённого сигнала функцией вида $f(t) = A \cdot e^{-t/\tau}$ в виде среднего времени жизни электронов до захвата τ , за которое количество дрейфующих электронов ионизации уменьшается в e раз.

Пример такого анализа приведён на Рис. 9.

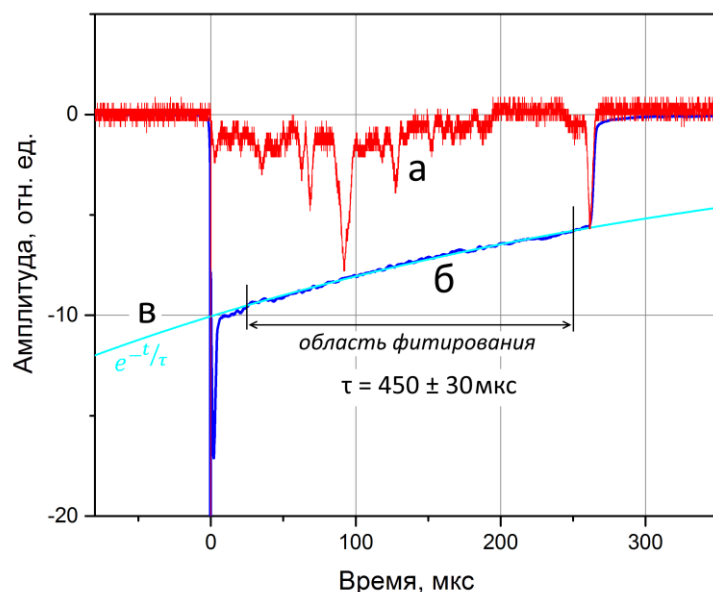


Рис. 9. Пример определения времени жизни электронов ионизации до захвата электроотрицательными примесями в жидком ксеноне: а — типичный мюонный сигнал, б — сигнал, усреднённый по 10 000 событий, в — экспоненциально спадающая функция, аппроксимирующая «ступеньку» усреднённого сигнала.

Этот способ успешно применялся во время сеанса работы РЭД-100 в МИФИ в 2019 г., в котором время жизни электронов до захвата достигало величины > 2 мс.

В пятой главе описаны результаты сеанса, проведённого при помощи детектора РЭД-100 сперва в МИФИ в 2019 г. а затем — на КАЭС в 2021–2022 гг. Ксенон для РЭД-100 был подготовлен при помощи описанного в этой работе метода.

Весной 2019 года был проведён пробный сеанс с установкой в лаборатории экспериментальной ядерной физики в МИФИ. В объёме детектора было сконденсировано ~ 200 кг ксенона. В течение всего времени сеанса (~ 30 дней) периодически производилась оценка чистоты ксенона по усреднённым мюонным сигналам. График зависимости времени жизни электронов в жидком ксеноне от времени старта эксперимента приведён

на Рис. 10. Уменьшение времени жизни электронов в период ~ 12 –17 дней с начала сеанса вызвано добавлением небольших порций относительно грязного ксенона, а также заменой мембраны циркуляционного насоса [4].

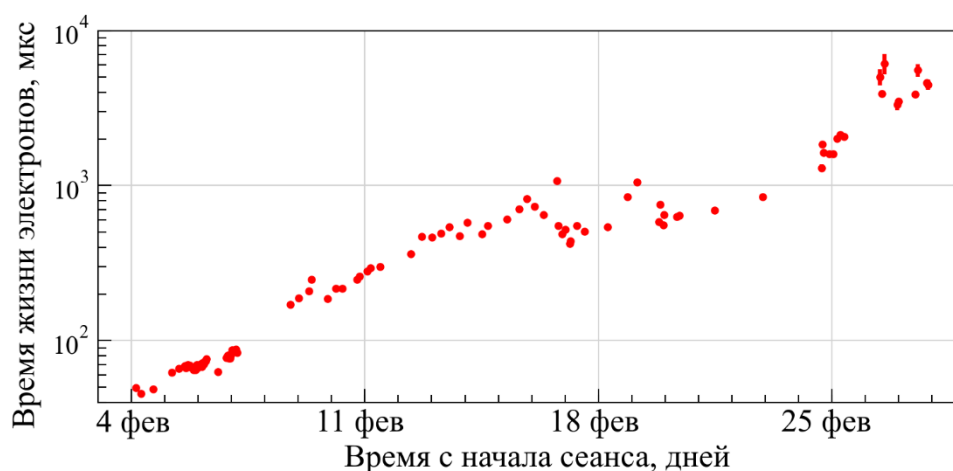


Рис. 10. График зависимости времени жизни электронов в жидком ксеноне во время пробного сеанса.

В 2021–2022 годах на Калининской АЭС был поставлен эксперимент по поиску упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомных ядрах при помощи детектора РЭД-100 (Договор № 313/1679-Д от 16.09.2019 и доп. соглашение № 313/1678-Д-1 от 31.07.2020 с АО "Наука и инновации" ГК «Росатом»). Разработанная методика подготовки рабочего вещества была успешно применена в ходе этого сеанса.

В течение всего времени проведения эксперимента производилась циркуляция ксенона по замкнутому контуру через горячий металлический геттер SAES Monotorr. Уровень чистоты жидкого ксенона непрерывно контролировался измерением времени жизни электронов ионизации от мюонов космических лучей. Результаты измерения времени жизни электронов приведены на Рис. 11.

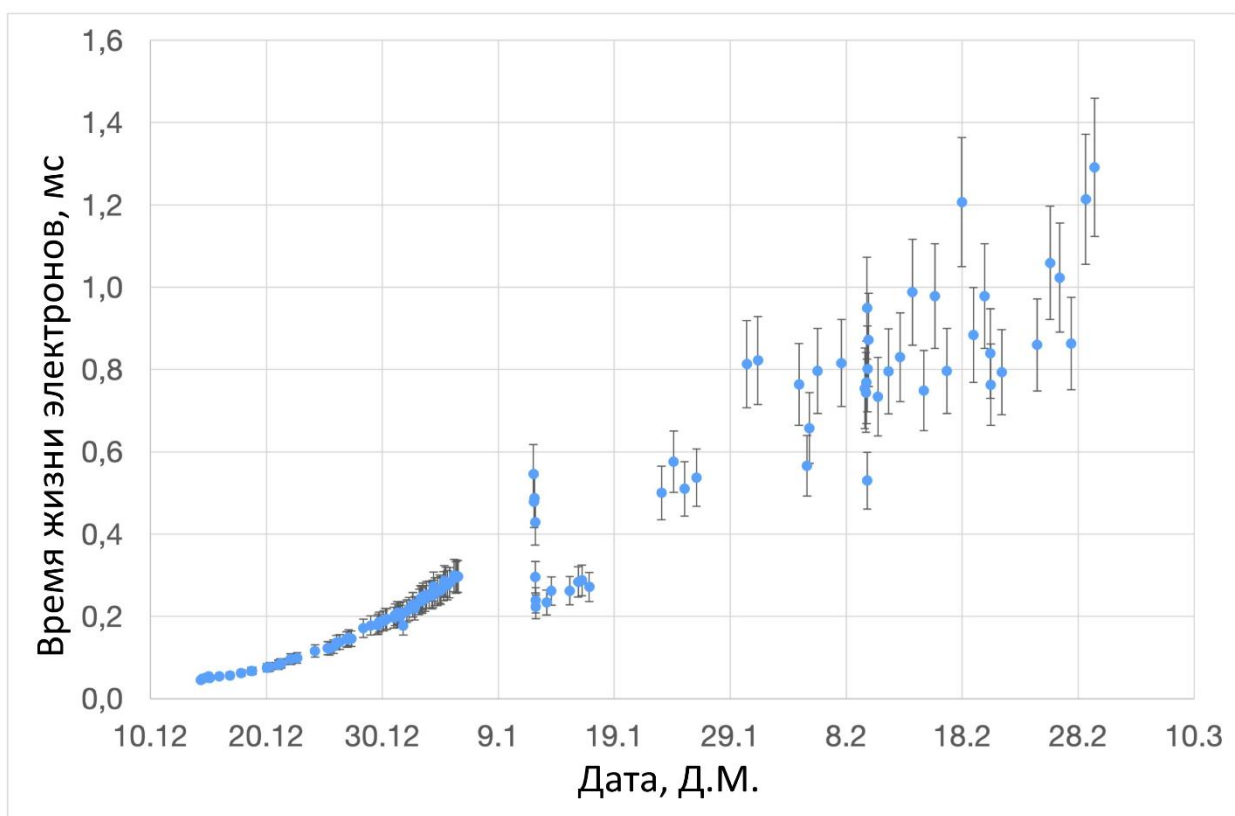


Рис. 11. График зависимости времени жизни электронов в жидком ксеноне во время физического сеанса на КАЭС. Источник:[5] (русифицировано).

Основные результаты работы

В данной работе впервые разработан и испытан оригинальный комплексный метод подготовки рабочей среды для двухфазных эмиссионных детекторов на основе ксенона. Данный метод использовался для постановки эксперимента по регистрации реакторных электронных антинейтрино посредством упругого когерентного рассеяния на тяжёлых ядрах ксенона с помощью двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100. Показано, что, несмотря на использование в установке РЭД-100 ксенона, первоначально сильно загрязнённого электроотрицательными и высокомолекулярными примесями в процессе изотопной модификации исходного газа посредством газовых центрифуг, при помощи разработанного в этой работе метода удалось поддерживать время жизни электронов ионизации ~ 1 миллисекунды в ~ 200 кг жидкого ксенона, что позволило в 2021–2022 гг. провести эксперимент фундаментального значения на Калининской АЭС.

Публикации автора по теме диссертации

1. Akimov D. Y., Belov V. A., Bolozdynya A. I., Dolgolenko A. G., Efremenko Y. V., Etenko A. V., Galavanov A. V., Gouss D. V., Gusakov Y. V., Kdib D. E., Khromov A. V., Konovalov A. M., Kornoukhov V. N., Kovalenko A. G., Kozlova E. S., Kumpan A. V., Lukyashin A. V., Melikyan Y. A., Moramzin V. V., Nischeta D. A., Razuvaeva O. E., Rudik D. G., **Shakirov A. V.**, Simakov G. E., Sosnovtsev V. V., Stogov Y. V., Vasin A. A. First Ground-Level Laboratory Test of the Two-Phase Xenon Emission Detector RED-100 // JINST. 2020. V.15. № 02. P02020
2. Акимов Д. Ю., Белов В. А., Болоздыня А. И., Васин А. А., Галаванов А. В., Гусаков Ю. В., Кдиб Дж. Э., Коваленко А. Г., Козлова Е. С., Коновалов А. М., Кумпан А. В., Лукьяшин А. В., Меликян Ю. А., Непочатая О. Е., Рудик Д. Г., Симаков Г. Е., Сосновцев В. В., Хромов А. В., **Шакиров А. В.** Комплексный метод подготовки ксенона для использования в качестве рабочей среды двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100 // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 4. С. 5–11
3. Акимов Д. Ю., Белов В. А., Болоздыня А. И., Бобков С. В., Васин А. А., Волков Н. В., Галаванов А. В., Гусаков Ю. В., Джумаев П. С., Kdib D. E., Коваленко А. Г., Козлова Е. С., Колпаков М. Ю., Коновалов А. М., Кумпан А. В., Лукьяшин А. В., Меликян Ю. А., Непочатая О. Е., Рудик Д. Г., Савинов М. Ю., Симаков Г. Е., Сосновцев В. В., Хромов А. В., **Шакиров А. В.** Синтез наночастиц титана в жидком ксеноне с помощью высоковольтного электрического разряда // Журнал технической физики. 2018. Т. 44. № 14. С. 73–79
4. Акимов Д. Ю., Белов В. А., Бердникова А. К., Бобков С. В., Болоздыня А. И., Гусаков Ю. В., Гусс Д. В., Джумаев П. С., Долголенко А. Г., Коваленко А. Г., Козлова Е. С., Колпаков М. Ю., Коновалов А. М., Крахмалова Т. Д., Кумпан А. В., Лукьяшин А. В., Меликян Ю. А., Непочатая О. Е., Рудик Д. Г., Савинов М. Ю., Сидоренко А. В., Симаков Г. Е., Сосновцев В. В., Таэр

Г. С., Хромов А. В., **Шакиров А. В.** Очистка жидкого ксенона электроискровым методом для использования в двухфазных эмиссионных детекторах // Приборы и техника эксперимента — 2017. № 6. С. 16–22

5. Патент на полезную модель №191338 «Устройство для очистки жидких благородных газов от высокомолекулярных и электроотрицательных примесей», приоритет от 22 августа 2018 г.

Список литературы

1. Акимов Д.Ю. и др. Очистка жидкого ксенона электроискровым методом для использования в двухфазных эмиссионных детекторах // Приборы И Техника Эксперимента. Российская академия наук, 2017. № 6. С. 16–22.
2. Biagi S. Magboltz - transport of electrons in gas mixtures [Электронный ресурс]. URL: <https://magboltz.web.cern.ch/magboltz/>
3. Болоздыня А.И. et al. Термостатирование жидкоксенонового эмиссионного детектора РЭД-100 // Приборы И Техника Эксперимента. Российская академия наук, 2016. № 3. С. 149–152.
4. Akimov D.Y. et al. First ground-level laboratory test of the two-phase xenon emission detector RED-100 // J. Instrum. IOP Publishing, 2020. Vol. 15, № 02. P. P02020.
5. Akimov D.Y. et al. The RED-100 experiment // J. Instrum. IOP Publishing, 2022. Vol. 17, № 11. P. T11011.