

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 66.088

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ПОДГОТОВКИ КСЕНОНА
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ
ДВУХФАЗНОГО ЭМИССИОННОГО ДЕТЕКТОРА РЭД-100

© 2019 г. Д. Ю. Акимов^{a,b}, В. А. Белов^{a,b}, А. И. Болоздыня^a, А. А. Васин^a,
А. В. Галаванов^a, Ю. В. Гусаков^{a,c}, Дж. Э. Кдиб^a, А. Г. Коваленко^{a,b}, Е. С. Козлова^a,
А. М. Коновалов^{a,b,d}, А. В. Кумпан^a, А. В. Лукьяшин^{a,b}, Ю. А. Меликян^a, О. Е. Непочатая^a,
Д. Г. Рудик^{a,b}, Г. Е. Симаков^{a,b,d}, В. В. Сосновцев^a, А. В. Хромов^a, А. В. Шакиров^{a,*}

^a Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

^b Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова Национального исследовательского
центра “Курчатовский институт”
Россия, 117218, Москва, ул. Б. Черемушкинская, 25

^c Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^d Московский физико-технический институт (государственный университет)
Россия, 141700, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

*e-mail: Shalexey91@mail.ru

Поступила в редакцию 10.01.2019 г.

После доработки 10.01.2019 г.

Принята к публикации 22.01.2019 г.

Описан комплексный метод подготовки ксенона для использования в качестве рабочей среды двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100, который построен в НИЯУ “МИФИ” для исследования процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре. Разработанная технология очистки ксенона и детектора позволила увеличить время жизни квазисвободных электронов в 205 кг жидкого ксенона от ≤ 0.1 до ≥ 400 мкс в полях от 50 до 500 В/см. Вся процедура заняла около 1000 ч. Метод может быть использован для подготовки рабочих сред двухфазных эмиссионных детекторов нового поколения с целью проведения фундаментальных исследований, включая поиск темной материи в форме слабовзаимодействующих массивных частиц, регистрацию борных солнечных нейтрино, поиск двойного безнейтринного бета-распада.

DOI: 10.1134/S0032816219040025

1. ВВЕДЕНИЕ

Двухфазные эмиссионные детекторы на основе жидкого ксенона широко используются в наиболее чувствительных физических экспериментах по поиску холодной темной материи в виде слабовзаимодействующих массивных частиц. В 2016 г. был запущен эксперимент по поиску темной материи XENON1T, в котором используется 3.2 т жидкого ксенона в качестве рабочей среды двухфазного эмиссионного детектора [1]. Коллаборацией XENON разрабатывается проект детектора следующего поколения – XENONnT – с общей массой ксенона 8 т в качестве рабочего вещества. Готовится к постановке эксперимент LZ, в котором будет использовано около 7 т жидкого ксенона. Кроме того, обсуждается возможность постановки нового эксперимента DARWIN, в котором предполагается использовать ~40 т жид-

кого ксенона в качестве рабочей среды эмиссионного детектора следующего поколения [2]. Помимо поисков темной материи, детекторы такого типа можно использовать для исследования недавно открытого процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре.

Для исследования процесса когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино на ядрах ксенона в НИЯУ “МИФИ” построен детектор РЭД-100 [3]. Этот очень эффективный метод регистрации нейтрино может быть использован для мониторинга активной зоны ядерных реакторов в интересах международных программ нераспространения ядерного оружия. Кроме того, ставятся эксперименты по поиску двойного безнейтринного бета-распада, в которых используется жидкий ксенон в качестве рабочего вещества. К таким экспериментам относится, напри-

мер, действующий эксперимент ЕХО-200 и его планируемое продолжение nЕХО, в котором предполагается использовать 5 т изотопически обогащенного жидкого ксенона [4].

К рабочей среде всех этих детекторов предъявляется требование высокой эффективности собирания электронов ионизации и высокой прозрачности рабочих сред к сцинтилляционному излучению в области вакуумного ультрафиолета. Для этого ксенон, доступный на рынке, необходимо очищать от электроотрицательных и высокомолекулярных примесей. Дополнительным осложнением является то обстоятельство, что во всех перечисленных экспериментах может использоваться ксенон, прошедший процедуру разделения изотопов с помощью газовых центрифуг с целью выделения ^{136}Xe , используемого для поиска двойного бета-распада. В результате этой процедуры ксенон оказывается сильно загрязненным высокомолекулярными и электроотрицательными примесями, которые значительно усложняют процесс очистки. В настоящее время ксенон для физических экспериментов очищают в основном многократным пропусканием газа через промышленные горячие металлические геттеры. Однако, как показал опыт [5], этот способ является малопродуктивным для такого рода загрязнений.

Если учесть быстрый рост габаритов детекторов на жидком ксеноне, становится ясно, что в скором времени сложится ситуация, когда при распределении ксенона между различными экспериментами значительная его часть будет подвергаться процедуре разделения изотопов с помощью газовых центрифуг. Это неизбежно приведет к загрязнению всей используемой массы ксенона высокомолекулярными примесями, что вызовет глобальный спрос на технологию его очистки от соответствующих примесей. Данная работа посвящена разработке технологии такой очистки ксенона после разделения изотопов для последующего использования его в двухфазном эмиссионном детекторе РЭД-100.

2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Целью очистки ксенона для использования в качестве рабочей среды низкофоновых детекторов слабозаимодействующих частиц и редких процессов является понижение концентрации посторонних примесей до уровня порядка или менее относительной концентрации по кислороду ~ 0.1 ppb. Это позволяет обеспечить время жизни дрейфующих электронов до захвата электроотрицательными примесями порядка 1 мс в полях порядка и более 100 В/см, а также прозрачность жидкого ксенона к собственному люминесцентному излучению не хуже нескольких десятков сантиметров и среднюю энергию дрейфующих в

жидком ксеноне электронов >0.5 эВ для эффективной эмиссии электронов в газовую фазу. В данном проекте разработана многоступенчатая технология очистки ксенона от примесей с целью обеспечения указанных требований к чистоте ксенона.

На первом этапе массивный (до 300 кг) образец жидкого ксенона облучают жестким ультрафиолетовым излучением, генерируемым с помощью электрического высоковольтного (в.в.) разряда в жидкости, с целью разложения сложных высокомолекулярных примесей в реакциях фотоллиза. Образующиеся при этом твердотельные отложения извлекают из камеры очистки механическим путем после удаления оттуда ксенона.

На втором этапе массивный образец жидкого ксенона очищают нанодисперсным титаном, образующимся в жидкости при электрическом в.в.-разряде между титановыми электродами. При значительном загрязнении исходного образца ксенона окончательная фаза очистки нанодисперсным титаном проводится в отсутствие ультрафиолетового облучения. В этом случае в.в.-разряд выключается после наработки необходимого количества нанодисперсного титана, и образец жидкого ксенона некоторое время выдерживается в контакте с нанодисперсным титаном. Последнее необходимо для химического связывания примесей на поверхности геттера, которым является химически чистый нанодисперсный титан при температуре примерно -100°C .

На третьем этапе, который может идти параллельно с первым и вторым этапами, осуществляется очистка внутренних поверхностей детектора и линий его газовых коммуникаций путем многократной циркуляции по замкнутому контуру газообразного ксенона (поток газа ~ 10 л/мин при давлении до 1.5 атм) при комнатной или повышенной температуре через детектор и стандартный горячий металлический геттер.

На четвертом этапе уже в ходе эксплуатации детектора по назначению проводится забор жидкого ксенона из заполненного детектора, его испарение в специальном теплообменнике, пропускание газообразного ксенона через горячий металлический геттер и его обратная конденсация в детектор с помощью теплообменника со скоростью ~ 1 кг/ч. Этот этап проводится одновременно с физическим экспериментом и предполагает непрерывное измерение времени жизни электронов до захвата электроотрицательными примесями для коррекции получаемых экспериментальных данных.

Контроль степени очистки ксенона на первом и втором этапах осуществляется по измерению времени жизни электронов до захвата электроотрицательными примесями в специальной ионизационной камере, заполненной жидким ксенонем и облучаемой с помощью импульсной рент-

геновской трубки. На третьем и четвертом этапах время жизни электронов до захвата измеряется в самом детекторе, заполненном газообразным (на третьем этапе) или жидким (на четвертом этапе) ксеноном, путем анализа формы сигналов от космических мюонов.

3. ОЧИСТКА ЖИДКОГО КСЕНОНА ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ МЕТОДОМ

Электроискровой метод очистки жидких благородных газов был впервые предложен в 1980 г. в работе [6]. Исследования возможности применения этого метода в качестве второго этапа очистки ксенона после кальциевого геттера для использования ксенона в жидкостном гетерогенном ионизационном электромагнитном калориметре частиц высоких энергий проведены в работе [7]. В 1987 г. в ИТЭФ была построена и испытана установка “Мойдодыр” для электроискровой очистки массивных образцов криптона, предназначенного для использования в качестве рабочей среды жидкостных гомогенных сцинтилляционных электромагнитных калориметров для экспериментов в области физики частиц высоких энергий [8, 9]. В последние годы искровой метод успешно используется для очистки рабочей среды прецизионных гамма-спектрометров на сжатом ксеноне [10].

Для подготовки рабочей среды двухфазного эмиссионного нейтринного детектора на жидком ксеноне РЭД-100 [11] установка искровой очистки “Мойдодыр” была модернизирована. В этом проекте используется ксенон, прошедший процедуру изотопического обеднения (выделения из исходного образца изотопа ^{136}Xe) с помощью газовых центрифуг, что, как было показано в работе [12], привело к его загрязнению высокомолекулярными примесями, очистка от которых известными методами малоэффективна.

Схема устройства модернизированной установки “Мойдодыр” приведена на рис. 1. Детальное описание последней версии модернизированной установки “Мойдодыр” приведено в статье [5]. Основным элементом установки является высоковольтный разрядник 1, представляющий собой кольцевую электродную пару типа “лезвие–плоскость”, в которой оба электрода выполнены из титанового сплава ВТ1. Зазор между электродами составляет порядка 0.5–1.0 мм, что позволяет производить электрический разряд в жидкости при напряжениях между электродами до 15 кВ. Высоковольтный разрядник заключен в холодную рабочую камеру 4 криостата из нержавеющей стали. Размеры рабочей камеры ($\varnothing 40 \times 70$ см) позволяют заполнять ее ста литрами сжиженного благородного газа, что в случае ксенона соответствует массе ~ 300 кг. В центральной части рабочей камеры установки “Мойдодыр” установлена двухэлектродная рентгеновская ионизационная

камера с межэлектродным зазором 18 мм. Все электроды установки, включая разрядные электроды 1 и анод 2 ионизационной камеры, закреплены на металлических штангах, через которые подключаются к соответствующим электрическим цепям через металлокерамические вводы 8, 9, установленные на верхнем фланце криостата. Штанги изолированы от металлических частей установки стеклянными трубками, как показано на рис. 1б. В центре нижних фланцев криостата имеются алюминиевые окна 11 для ввода рентгеновского излучения. Импульс рентгеновского излучения с энергией до 30 кэВ и длительностью ~ 0.5 мкс генерируется импульсной рентгеновской трубкой типа БСВ-7 (12), установленной вне криостата и имеющей два окна для вывода рентгеновского излучения (вверх – в криостат и вниз – в сцинтилляционный детектор 13, используемый для контроля работы трубки). Глубина поглощения рентгеновского излучения в жидком ксеноне ~ 1 мм. В случае идеально чистой жидкости дрейф облака электронов, возникших при взаимодействии рентгеновского импульсного излучения с жидким ксеноном, обеспечивает практически постоянный зарядный ток зарядово-чувствительного преусилителя, подключенного к аноду ионизационной камеры. Наличие экспоненциального отклонения тока от постоянной величины свидетельствует о захвате электронов электроотрицательными примесями в процессе их дрейфа между электродами ионизационной камеры (рис. 2).

Установка “Мойдодыр” работает следующим образом. Между титановыми разрядными электродами 1 в жидком ксеноне организуется высоковольтный разряд. При этом в жидком ксеноне может генерироваться как жесткое ультрафиолетовое излучение, так и мелкодисперсная металлическая пыль из-за испарения материала электродов в плазме разряда. Оба процесса обеспечивают эффективное удаление электроотрицательных и сложных молекулярных примесей: фотолиз высокомолекулярных соединений жестким ультрафиолетовым излучением и химическое соединение активных молекулярных соединений с активным чистым металлом на поверхности пыли. В случае использования титановых разрядных электродов генерируемая пыль является особенно эффективным химическим геттером [13], при этом, если параметры разрядной цепи подобраны соответствующим образом, генерируется нанодисперсная пыль [14].

Однако между двумя этими процессами, действующими одновременно, в случае сильно загрязненных образцов возможна конфликтная ситуация. Химически связанные примеси на поверхности титановой пыли могут разлагаться под действием ультрафиолетового излучения, повторно загрязняя жидкий ксенон. Рис. 3 иллюстрирует именно такую ситуацию, которая на-

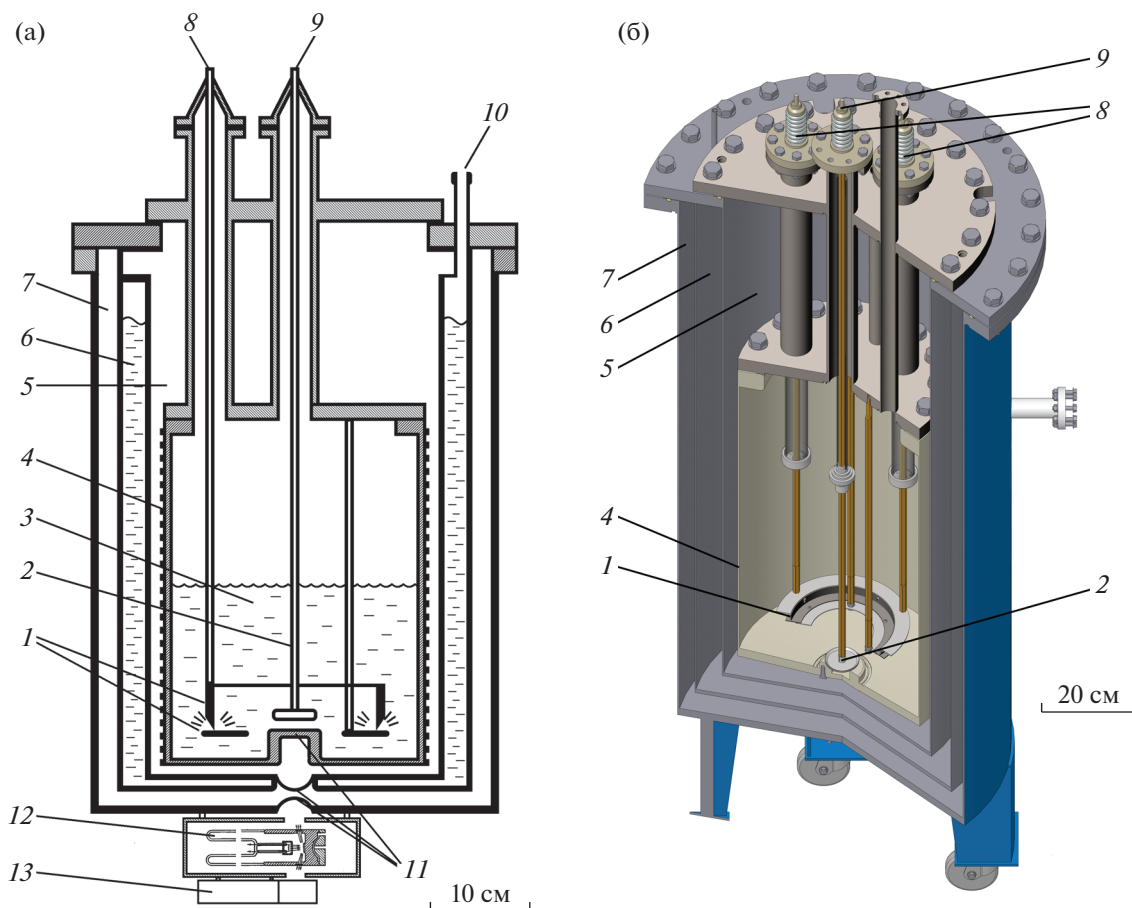


Рис. 1. Схема устройства (а) и внешний вид (б) установки для электроискровой очистки сжиженных благородных газов “Мойдодыр”. 1 – титановые разрядные электроды типа “острие–плоскость”; 2 – анод ионизационной камеры для определения времени жизни электронов до захвата электроотрицательными примесями; 3 – сжиженный благородный газ объемом до 100 л; 4 – холодная камера, окруженная медным экраном, на котором установлены нагревательные элементы; 5 – газовая азотная рубашка; 6 – жидкоазотная рубашка; 7 – вакуумная рубашка; 8 – ввод высокого напряжения, подаваемого на разрядные электроды; 9 – ввод для съема ионизационного сигнала; 10 – патрубок для залива жидкого азота; 11 – алюминиевые окна для ввода рентгеновского излучения в межэлектродный промежуток ионизационной камеры; 12 – рентгеновская управляемая трубка; 13 – сцинтилляционный детектор для контроля работы рентгеновской трубки [5].

блюдалась при очистке образца жидкого ксенона массой 55 кг [5], загрязненного высокомолекулярными примесями в процессе выделения изотопа ^{136}Xe (исходное содержание примесей в этом образце ксенона показано в графе “Начальная” в табл. 1). После примерно 100 ч электроискровой очистки этого образца время жизни электронов до захвата электроотрицательными примесями, среди которых особенно выделялся SF_6 , вышло на плато на уровне 10 мкс. Это интерпретировалось нами как ситуация, когда скорость связывания примесей на нанодисперсном титане уравнивалась со скоростью разложения связанных состояний под действием ультрафиолетового излучения. Данное предположение было подтверждено тем фактом, что при выключении разряда после 170 ч искровой очистки наблюдалось резкое возрастание времени жизни электронов до захвата (от 10 до

50 мкс) за время ~ 80 ч. Это могло происходить только за счет процесса химического связывания активных примесей на нанодисперсном титане, произведенном ранее. Как следует из табл. 1, в результате такой процедуры было значительно снижено содержание электроотрицательных и высокомолекулярных примесей (графа “Конечная”).

Такая двухступенчатая методика очистки исходного образца ксенона применялась к нескольким массивным (50–100 кг) образцам, с тем чтобы общая масса очищенного ксенона составила 205 кг, что необходимо для заполнения детектора РЭД-100.

4. ЦИРКУЛЯЦИОННАЯ ОЧИСТКА

Наличия достаточно чистого исходного образца ксенона недостаточно для обеспечения необходимой степени чистоты рабочей среды детектора

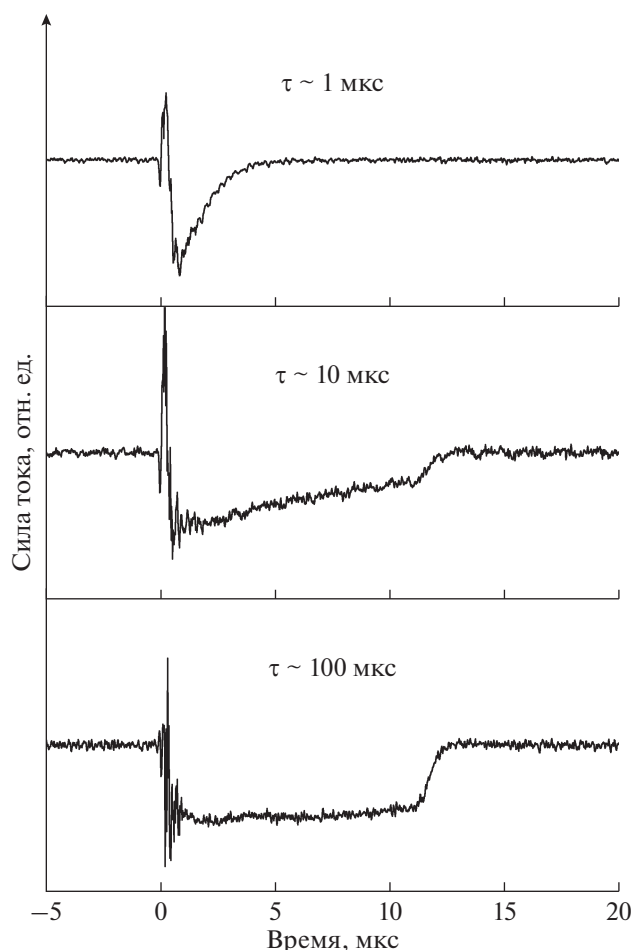


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока в ионизационной камере установки “Мойдодыр” при различной степени чистоты жидкого ксенона, определяемой временем жизни электронов до захвата примесями: $\tau \sim 1$ мкс, ~ 10 мкс и ~ 100 мкс, усредненные по совокупности 10000 сигналов при потенциале анода +500 В. Осциллограммы записаны с помощью осциллографа LeCroy WaveRunner 640Zi.

во время его эксплуатации. Дополнительным необходимым условием является чистота поверхности элементов детектора, соприкасающихся с жидким ксеноном или с равновесной с ним газовой фазой. Адсорбированные на внутренних деталях электроотрицательные и молекулярные примеси в период их контакта с окружающей воздушной атмосферой способны значительно загрязнить рабочую

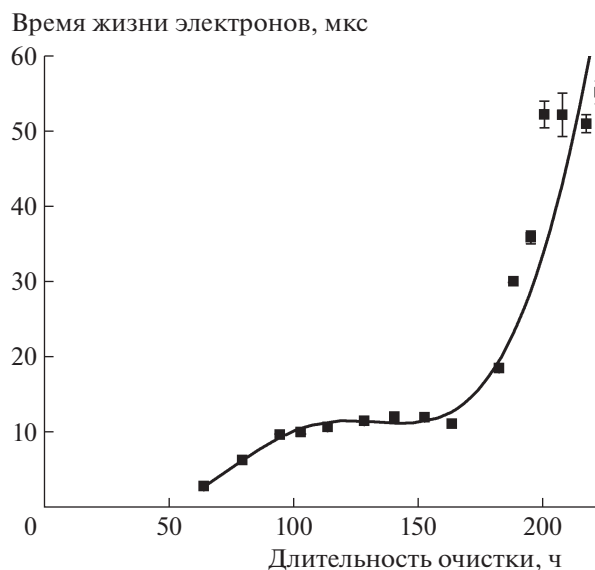


Рис. 3. Зависимость времени жизни электронов до захвата электроотрицательными примесями от времени работы искрового разрядника установки “Мойдодыр” в образце жидкого ксенона массой 55 кг при потенциале 1000 В на аноде ионизационной камеры [5].

среду детектора. Особенно это опасно для жидкого ксенона, который отличается высокой адсорбционной способностью к сложным и химически активным молекулам из-за высокой поляризуемости атомов ксенона [15]. По этой причине подготовка и очистка поверхностей деталей, контактирующих внутри детектора с ксеноном, является абсолютно необходимой процедурой для эффективной эксплуатации детектора.

Для очистки внутренних поверхностей от адсорбированных примесей применялись два метода циркуляционной очистки:

1) очистка внутренних поверхностей детектора РЭД-100 от адсорбированных примесей при комнатной температуре путем многократной циркуляции газообразного ксенона по замкнутому контуру через детектор, газовые коммуникационные линии и пористый горячий металлический геттер SAES model PS3-MT3-R-2 при давлении ~ 1.3 атм со скоростью ~ 10 л/мин;

2) доочистка жидкого ксенона в процессе эксплуатации детектора испарением некоторой его части с последующим пропуском образующе-

Таблица 1. Содержание, ppm, молекулярных примесей в образце ксенона до (“Начальная”) и после (“Конечная”) двухступенчатой искровой процедуры очистки, согласно масс-спектрометрическому анализу, проведенному на предприятии ООО ХРОМ

Примесь	H ₂	N ₂	O ₂	CF ₄	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	SF ₆	C _n H _m R _k
Начальная	0.325	0.950	0.180	<0.001	0.210	0.835	1.4	0.015	7.450
Конечная	0.600	0.700	0.050	<0.001	0.065	0.015	1.0	<0.0001	1.520

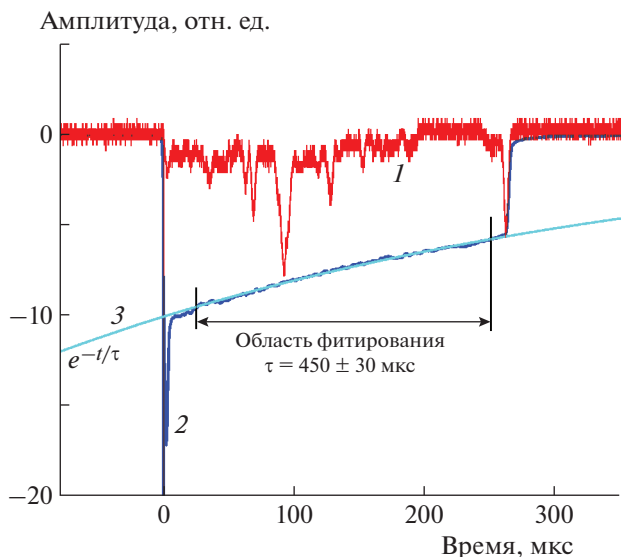


Рис. 4. Определение времени жизни дрейфующих электронов в жидком ксеноне до захвата электроотрицательными примесями: 1 – сигнал от одиночного мюона, по вертикали пересекшего заполненный жидким ксеноном чувствительный объем детектора РЭД-100; 2 – усредненный сигнал по 10000 мюонных сигналов; 3 – аппроксимация усредненного сигнала экспонентой, по которой в указанной временной зоне время жизни электронов определено как $\tau \approx 450$ мкс.

гося газа через пористый горячий металлический геттер и конденсацией чистого газа в детектор со скоростью $\sim 5\text{--}10$ кг/ч.

Контроль над процессом циркуляционной очистки осуществлялся путем определения времени жизни дрейфующих в электрическом поле электронов до их захвата электроотрицательными примесями. Время жизни дрейфующих квазисвободных электронов до захвата измерялось по форме сигналов от космических мюонов, пересекающих чувствительный объем детектора, заполненный или газообразным (в первом случае), или жидким (во втором случае) ксеноном. Помимо этого, во втором случае контроль времени жизни электронов осуществлялся также по форме сигналов от γ -источников ^{22}Na и ^{60}Co .

На рис. 4 показан пример определения времени жизни электронов в жидком ксеноне по мюонному сигналу при напряженности электрического поля ~ 200 В/см. Типичный сигнал от одиночного мюона, пересекшего весь чувствительный объем детектора РЭД-100, показан кривой 1. Усредненный по 10000 подобных событий сигнал соответствует кривой 2. Сигнал состоит из двух компонент: быстрого сцинтилляционного (узкий пик вблизи 0 мкс) и последующей спадающей электролюминесценции газовой фазы, вызванной дрейфующими электронами, вытянутыми электрическим полем с треков космических мюонов (спадающая

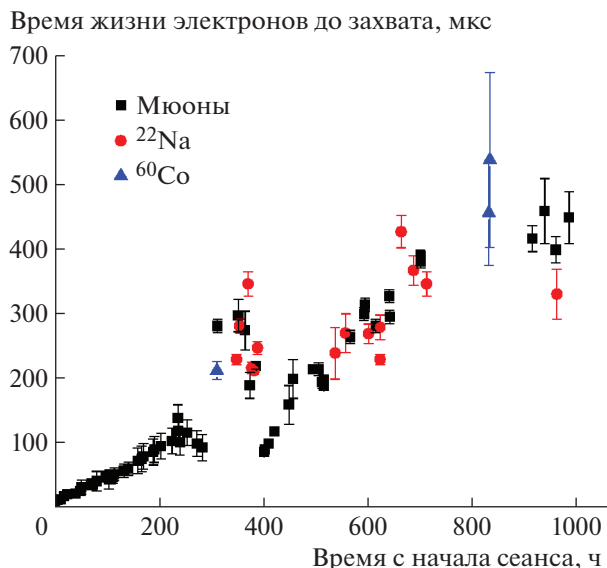


Рис. 5. Динамика непрерывной очистки рабочей среды (205 кг жидкого ксенона) работающего детектора РЭД-100 путем многократной циркуляции ксенона в газообразном состоянии через горячий металлический геттер.

ступенька от ~ 10 до ~ 260 мкс). Для определения времени жизни дрейфующих электронов до захвата электроотрицательными примесями усредненный электролюминесцентный сигнал аппроксимировали экспоненциальной функцией $\sim \exp(-t/\tau)$ (кривая 3).

На рис. 5 представлены данные, демонстрирующие изменение времени жизни электронов в 205 кг жидкого ксенона от времени циркуляции в период физического теста детектора РЭД-100 в марте–апреле 2018 г. Общее время циркуляционной стадии очистки жидкого ксенона составило 480 ч.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность очистки комбинированным методом промышленных количеств ксенона, который был загрязнен высокомолекулярными и электроотрицательными примесями в результате предшествовавших операций по разделению изотопов ксенона. Разработанная технология очистки позволила увеличить время жизни квазисвободных электронов в 205 кг жидкого ксенона с ≤ 0.1 до ≥ 400 мкс в электрических полях от 50 до 500 В/см. Время, затраченное на всю процедуру, составило около 1000 ч. Очищенный описанным способом ксенон планируется использовать в детекторе РЭД-100 для исследования когерентного рассеяния электронных антинейтрино на ядрах ксенона.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Авторы благодарны за финансовую поддержку работы Российскому научному фонду (грант № 18-12-00135), Программе повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (контракт № 02.а03.21.0005) и Российскому фонду фундаментальных исследований (гранты № 18-32-00910, № 18-32-00920).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *XENON Collaboration. Aprile E. et al. // Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 121. P. 111302. doi 10.1103/PhysRevLett.121.111302
2. *Aalbers J., Agostini F., Alfonsi M., Amaro F.D., Amsler C., Aprile E., Arazi L., Arneodo F., Barrow P., Baudis L., Benabderrahmane M.L., Berger T., Beskers B., Breskin A., Breur P.A. et al. // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics.* 2016. Issue. 11. Article number 17. doi 10.1088/1475-7516/2016/11/017
3. *Akimov D.Yu., Berdnikova A.K., Belov V.A., Bolozdynya A.I., Burenkov A.A., Dolgolenko A.G., Efremenko Yu.V., Guskov Yu.V., Etenko A.V., Kaplin V.A., Khromov A.V., Kononov A.M., Kovalenko A.G., Kozlova E.S., Kumpan A.V. et al. // JINST.* 2017. V. 12. C06018. doi 10.1088/1748-0221/12/06/C06018
4. *Albert J.B., Anton G., Arnquist I.J., Badhrees I., Barbeau P., Beck D., Belov V., Bourque F., Brodsky J.P., Brown E., Brunner T., Burenkov A., Cao G.F., Cao L., Cen W.R. et al. // Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 120. P. 072701. doi 10.1103/PhysRevC.97.065503
5. *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. и др. // ПТЭ.* 2017. № 6. С. 16. doi 10.7868/S0032816217050159
6. *Ободовский И.М., Покачалов С.Г., Шилов В.А. // ЖТФ.* 1980. Т. 50. № 9. С. 2028.
7. *Гавриленко И.Л., Кириленков А.В., Коновалов С.П., Муравьев С.В.* Препринт ФИАН № 252. М., 1984.
8. *Анисимов С.Н., Барабаш А.С., Болоздыня А.И., Стеханов В.Н.* Препринт ИТЭФ № 106. М.: ЦНИИАтоминформ, 1987.
9. *Анисимов С.Н., Барабаш А.С., Болоздыня А.И., Стеханов В.Н., Чураков Д.Л. // ПТЭ.* 1991. № 2. С. 73.
10. *Ананьев В.В., Дмитренко В.В., Власик К.Ф., Улин С.Е., Утешев З.М. // Решетневские чтения.* 2016. С. 2028.
11. *Акимов Д.Ю., Александров И.С., Белов В.А., Болоздыня А.И., Буренков А.А., Власик К.Ф., Гусаков Ю.В., Дмитренко В.В., Долголенко А.Г., Ефременко Ю.В., Каплин В.А., Коваленко А.Г., Козлова Е.С., Коновалов А.М., Крахмалова Т.Д. и др. // ПТЭ.* 2017. № 2. С. 22. doi 10.7868/S0032816217010141
12. *Aprile E., Bolotnikov A.E., Bolozdynya A.I., Doke T. // Noble Gas Detectors.* Wiley-VCH, 2006.
13. *Иванов-Есипович Н.К.* Физико-химические основы производства радиоэлектронной аппаратуры, М.: Высшая школа, 1979.
14. *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. и др. // Письма в ЖТФ.* 2018. Вып. 14. С. 73. doi 10.21883/PJTF.2018.14.46347.17300
15. *Bolozdynya A.I., Bradley A.W., Brusov P.P., Dahl C.E., Kwong J., Shutt T. // IEEE Transactions on Nucl. Scie.* 2008. V. 55. Issue 3. P. 1453. doi 10.1109/TNS.2008.919258