

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.6

ДВУХФАЗНЫЙ ЭМИССИОННЫЙ ДЕТЕКТОР РЭД-100

© 2017 г. Д. Ю. Акимов^{a,b}, И. С. Александров^f, В. А. Белов^{a,b}, А. И. Болоздыня^a,
А. А. Буренков^{a,b}, К. Ф. Власик^a, Ю. В. Гусаков^{a,d}, В. В. Дмитренко^a, А. Г. Долголенко^b,
Ю. В. Ефременко^{a,c}, В. А. Каплин^a, А. Г. Коваленко^{a,b}, Е. С. Козлова^a,
А. М. Коновалов^{a,b}, Т. Д. Крахмалова^a, А. В. Кумпан^a, Ю. А. Меликян^a,
П. П. Наумов^a, Д. Г. Рудик^{a,b}, И. С. Сальдииков^a, В. В. Сосновцев^a,
Г. В. Тихомиров^a, А. А. Тоболкин^a, И. А. Толстухин^a, А. В. Хромов^a,
З. М. Утешев^a, А. В. Шакиров^{a,*}, Р. Р. Шафигуллин^a, А. В. Этенко^{a,e}

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

^b ГИЦ РФ “Институт теоретической и экспериментальной физики”
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”,
Россия, Москва

^c Университет штата Теннесси, 1331 Circle Park Drive, 37996 Knoxville, Tennessee, USA

^d Объединенный институт ядерных исследований,
Россия, Дубна

^e Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
Россия, Москва

^f Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, Томск

*e-mail: shalexey91@mail.ru

Поступила в редакцию 04.04.2016 г.

Описана экспериментальная установка РЭД-100, созданная для регистрации упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона. Особенностью данной установки является возможность ее использования в наземных экспериментах. В основе установки – двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100, использующий жидкий ксенон в качестве рабочей среды для регистрации редких событий. Приведены результаты технического запуска установки, которые свидетельствуют о штатной работе всех систем и готовности установки к постановке эксперимента.

DOI: 10.7868/S0032816217010141

1. ВВЕДЕНИЕ

Упругое когерентное рассеяние нейтрино (у.к.р.н.) на атомном ядре, происходящее по каналу нейтральных токов, никогда не наблюдалось со времени его теоретического предсказания в 1974 г. [1]. Единственным способом доказать существование у.к.р.н. является регистрация ядер отдачи с низкой кинетической энергией. Технические трудности при разработке массивных детекторов с низким энергетическим порогом и низким уровнем фонов сдерживают экспериментальное наблюдение этого эффекта в течение пяти десятилетий. Тем не менее, недавние достижения в технологии детекторов для поиска темной материи (см., например, обзор [2]) дают надежду, что у.к.р.н. окажется доступным для исследования в ближайшем будущем.

Сечение упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядре с нулевым спином в пренебрежении радиационными поправками описывается формулой [3]

$$\frac{d\sigma}{dT}(E, T) = \frac{G_F^2}{2\pi} M \left[2 - \frac{2T}{E} + \left(\frac{T}{E}\right)^2 - \frac{MT}{E^2} \right] \frac{Q_w^2}{4} F^2(Q^2), \quad (1)$$

где E – энергия налетающего нейтрино; T – кинетическая энергия ядра отдачи; M – масса ядра; F – ядерный форм-фактор; Q_w – заряд слабого ядерного взаимодействия; G_F – постоянная Ферми. Условие когерентности состоит в том, чтобы величина переданного импульса $Q \leq 1/R$, где R – радиус ядра. Это условие хорошо выполняется для нейтрино с энергией < 50 МэВ при взаимодействии с ядрами средней массы.

Интенсивный источник нейтрино является непременным условием постановки опыта по наблюдению когерентного νA -рассеяния. Хотя вероятность наблюдения у.к.р.н. на реакторах достаточно высока [4–6], импульсный пучок нейтрино от останавливающихся пионов, генерируемых с помощью ускорителя, имеет ряд преимуществ по сравнению с реакторными экспериментами. Наиболее интенсивным нейтринным источником такого типа является ускорительный комплекс Spallation Neutron Source (SNS) в Окриджской национальной лаборатории США [7]. Импульсный характер источника позволяет эффективно подавлять не связанные с нейтрино фоны и определять отношение сигнал/фон путем сравнения результатов измерений в одинаковых временных окнах во время сброса пучка на мишень и между сбросами. Такой способ организации съема информации с нейтринного детектора позволяет подавлять ожидаемые фоны на 3–4 порядка [8]. Для рабочих сред на основе жидких благородных газов ожидаемые скорости счета нейтринных событий на SNS представляются весьма перспективными [9].

В соответствии с уравнением (1) скорость когерентного упругого рассеяния пропорциональна Q_w^2 – квадрату слабого заряда, определяемого как $Q_w = N - (1 - 4\sin^2\theta_w)Z$, где Z – число протонов, N – число нейтронов, θ_w – угол слабого смешивания. Следовательно, угол слабого смешивания может быть извлечен из измеренного абсолютного сечения при типичном значении $Q = 0.04$ ГэВ/с. Отклонение от предсказаний Стандартной модели может служить указанием на новую физику [9]. Поиски нестандартных взаимодействий основаны на точном знании ядерных форм-факторов, которые известны с погрешностью <5%, так что отклонение от предсказанного Стандартной моделью более чем на 5% может означать проявление эффектов за ее пределами.

Реакции у.к.р.н. весьма важны при описании процесса коллапса ядер сверхновых звезд [10], равно как и полезны при рассмотрении процесса эволюции Вселенной [2]. Отметим, что спектр и состав нейтринного излучения от мишени SNS близок к ожидаемым при коллапсе сверхновых звезд и может служить моделью нейтринной вспышки от сверхновой. Измерение скорости регистрации таких событий позволит осуществить “тонкую настройку” физики нейтрино во Вселенной. Успешные измерения когерентного рассеяния нейтрино будут немедленно востребованы в экспериментах следующего поколения по прямой регистрации темной материи, для которых у.к.р.н. от солнечных и атмосферных нейтрино будет создавать заметный фон [11].

2. УСТАНОВКА РЭД-100

Установка РЭД-100 предназначена для поиска и регистрации редких событий в виде ядер отдачи с энерговыделением в килоэлектронвольтовой области в присутствии достаточно интенсивного фона, связанного, в частности, с космогенными мюонами. Такие условия характерны для работы детекторов, расположенных в нормальных лабораторных условиях практически на земной поверхности, в отличие от известного класса эмиссионных двухфазных детекторов, предназначенных для поиска темной материи и находящихся в низкофонных лабораториях, в глубоком подполье [2].

Установка РЭД-100 включает в себя непосредственно детектор РЭД-100, систему сбора данных, систему очистки и хранения ксенона, интерфейсное устройство, через которое детектор соединен с системой сбора данных, газовой системой и высоковольтными источниками для формирования дрейфовых полей, а также систему термостабилизации детектора на основе термосифонной технологии (рис. 1).

2.1. Детектор РЭД-100

Устройство детектора РЭД-100 показано на рис. 2. Для поддержания рабочей среды (ксенона) в жидком состоянии используется вакуумный криостат (1, 2), изготовленный из титана. Внутри криостата находится электродная структура, с помощью которой к жидкому ксенону, заключенному в объем высотой 414 мм и диаметром ~380 мм, прикладывается электрическое поле, обеспечивающее дрейф электронов к свободной поверхности жидкости и их эмиссию в равновесную газовую фазу. Электродная структура состоит из катода 6, системы кольцевых электродов и сетчатых электродов 4. Катод 6 выполнен в виде плоской, электролитически сформированной из фольги из нержавеющей стали сетки с гексагональными ячейками (коэффициент оптической прозрачности 0.8). Система кольцевых электродов обеспечивает равномерно распределенный электрический потенциал по высоте дрейфового объема с целью создания однородного поля для сбора электронов из жидкости. Сетчатые электроды 4 выполненные в той же технике, что и катод, служат для создания сильного электрического поля в газовой фазе над поверхностью жидкого ксенона. Это необходимо для обеспечения электролюминесценции газовой фазы при дрейфе через нее электронов ионизации, эмитированных из жидкости.

Рабочий объем детектора, заключенный внутри электродной системы, просматривается фотоэлектронными умножителями (ф.э.у.) R11410-20.

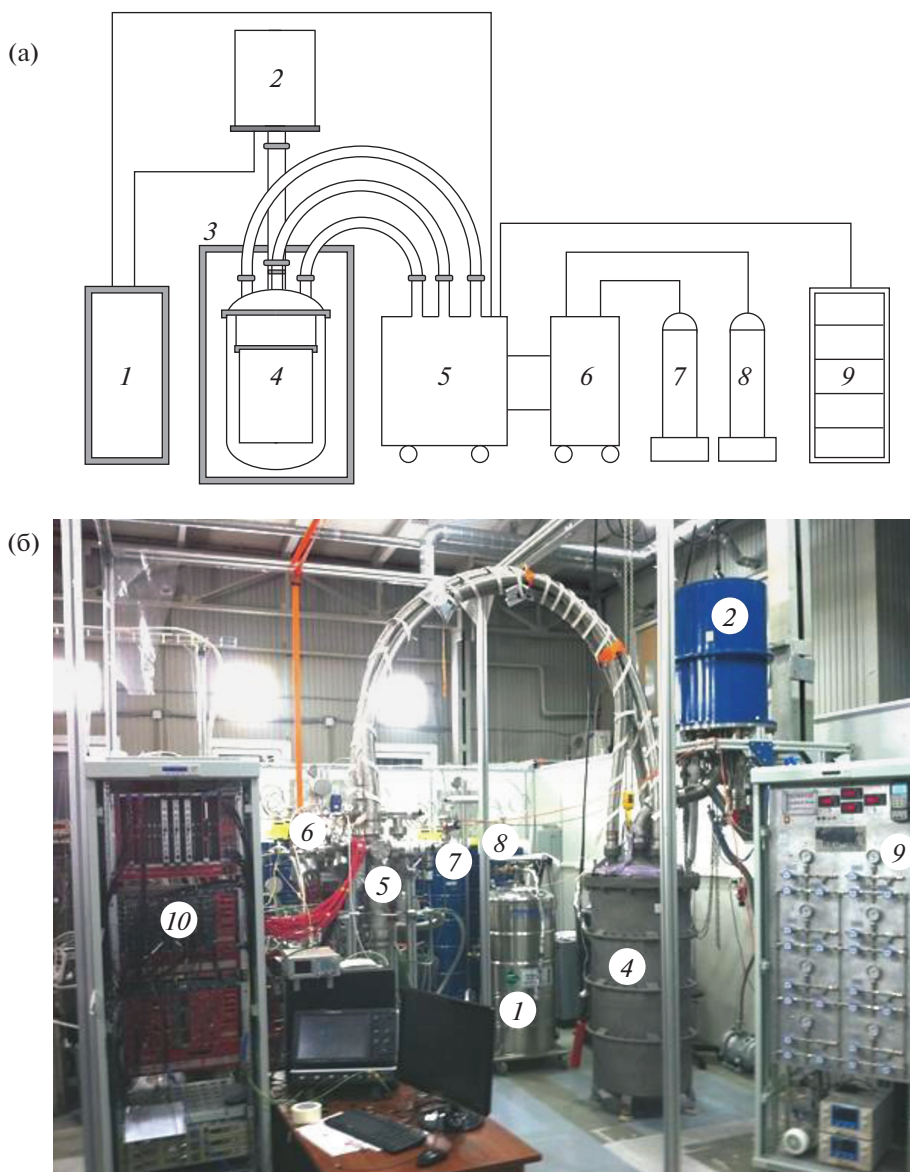


Рис. 1. Блок-схема (а) и общий вид (б) установки РЭД-100. 1 – источник жидкого азота; 2 – криостат термосифонной криогенной системы; 3 – пассивная защита; 4 – детектор РЭД-100; 5 – интерфейсный блок; 6 – система газовой очистки; 7, 8 – система хранения газообразного ксенона; 9 – система контроля параметров установки; 10 – система сбора данных.

Фотоэлектронные умножители этого типа специально разработаны японской фирмой Hamamatsu для низкофоновых эмиссионных детекторов на жидком ксеноне. Они могут работать при криогенных температурах (-100°C) и чувствительны к длине волны 175 нм с квантовой эффективностью регистрации (QE) порядка 30%. В детекторе установлены две матрицы ф.э.у. – нижняя 7 и верхняя 3 – по 19 ф.э.у. в каждой.

Ожидается, что в детекторе РЭД-100, благодаря электролюминесцентному промежутку шириной 19 мм, количество фотоэлектронов на один дрейфующий в промежутке электрон ионизации

будет порядка 80, что, например, почти в 3 раза превосходит аналогичную величину в детекторе ZEPLIN-III. При таком значении электролюминесцентного промежутка можно уверенно дискриминировать реальные события от одноэлектронного шума, который, как показали наши и других групп исследования, всегда присутствует в эмиссионном двухфазном детекторе на жидком ксеноне [12]. Этот шум связан с накоплением части ионизационных электронов под поверхностью жидкого ксенона и их спонтанной эмиссией в газовую фазу детектора.

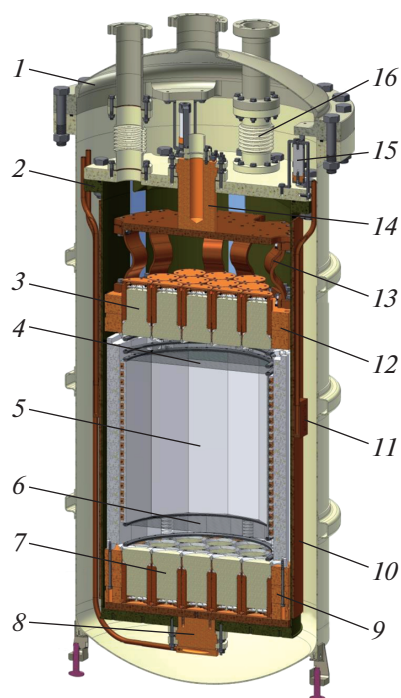


Рис. 2. Устройство детектора РЭД-100. 1 – внешний (теплый) сосуд криостата; 2 – внутренний (холодный) сосуд криостата; 3 – верхняя матрица из девятнадцати ф.э.у. типа HAMAMATSU R11410-20; 4 – сетчатый анод и вытягивающая сетка; 5 – рабочий объем, окруженный тефлоновым отражателем со встроенными полезадающими электродами; 6 – сетчатый катод; 7 – нижняя матрица из девятнадцати ф.э.у.; 8 – нижний центральный теплосъемник с термосифоном; 9 – медная обойма для нижней матрицы ф.э.у.; 10 – медный кожух холодного сосуда криостата; 11 – один из двух боковых теплосъемников с термосифонами; 12 – медная обойма верхней матрицы ф.э.у.; 13 – гибкий тепловой мост; 14 – верхний центральный теплосъемник с медным диском, на котором конденсируется ксенон; 15 – теплоизолирующий подвес на основе материала Vespel; 16 – сильфонная тепловая развязка на трубопроводе для вывода кабелей.

2.2. Система газобеспечения

Ксенон, предназначенный для использования в детекторе РЭД-100, должен иметь высокую степень очистки от электроотрицательных и молекулярных примесей. Поскольку исходный газообразный ксенон поступает от производителей с уровнем примесей порядка 1 ppb и, кроме того, газовыделение материалов, формирующих внутреннюю структуру детектора, вносит в ксенон дополнительные электроотрицательные и молекулярные примеси, то для эффективной регистрации сцинтилляционного и электролюминесцентного (ионизационного) сигналов необходима дополнительная очистка рабочего вещества детектора до концентраций электроотрицательных примесей не более 1 ppb.

Для выполнения этой задачи была разработана система циркуляционной очистки ксенона. Она включает в себя газовые баллоны высокого давления для хранения газообразного ксенона, безмасляные вакуумные насосы, элементы газовых коммуникаций, манометры и вакуумметры с металлическими уплотнениями, горячий металлический геттер SAES MonoTorr, а также контрольную камеру для измерения времени жизни дрейфующих электронов до захвата электроотрицательными примесями в жидком ксеноне. В качестве альтернативной системы очистки рассматривается также искровая очистка “Мойдодыр” [13].

Основная сложность очистки рабочей среды детектора стандартными методами заключается в том, что горячий металлический геттер очищает ксенон от примесей только в газовой фазе. Поэтому была разработана методика очистки ксенона путем непрерывной циркуляции ксенона из жидкой фазы с переходом в газовую фазу, пропускания газа через геттер и реконденсации его в детектор. Для поддержания постоянного давления паров ксенона в камере (1.3 абс. атм) необходимо было минимизировать баланс между притоком тепла от конденсируемого в камере ксенона и оттоком тепла за счет испаряющейся жидкости. При этом скорость испарения жидкости должна была быть равна скорости конденсации газа.

Для достижения этого условия создан специальный теплообменник между потоками конденсируемого в детектор (теплого и очищенного) и испаряющегося из детектора (холодного и “грязного”) ксенона. Теплообменник выполнен в виде двух вложенных один в другой сильфонных металлорукавов диаметром 32 и 14 мм из нержавеющей стали длиной 4 м. Скорость циркуляции ограничена максимальной скоростью пропускания газа через геттер 10 л/мин. Отбор жидкого ксенона из детектора осуществляется через трубку диаметром 6 мм из нижней части детектора за счет перепада давления, создаваемого циркуляционным насосом, установленным в системе газовой очистки. Жидкость поступает во внутренний сильфонный металлорукав теплообменника диаметром 14 мм, где испаряется за счет отбора тепла от очищенного ксенона, поступающего в детектор по внешнему металлорукаву диаметром 32 мм. Поток поступающего в детектор ксенона конденсируется внутри холодного сосуда криостата на специальном медном теплообменнике, охлаждаемом с помощью термосифона 14 (см. рис. 2).

Испытания показали, что для осуществления циркуляции ксенона при заданной скорости через теплообменник необходимо обеспечить дополнительно ~100 Вт мощности охлаждения для эффективной конденсации ксенона внутри криостата. Детектор соединен с системой очистки че-

рез интерфейсный блок (break-out-box) при помощи трех металлорукавов диаметром 68 мм и длиной 4 м с фланцами CF 4½". Один из металлорукавов содержит высоковольтные кабели, другой – сигнальные кабели, третий – сильфонный теплообменник для обеспечения циркуляции ксенона через систему очистки.

Интерфейсное устройство представляет собой отдельный блок, на котором установлены вакуумные насосы и датчики, высоковольтные и высокочастотные металлокерамические вводы. Через устройство детектор соединен со всеми системами обеспечения его работы. Три сильфонных металлорукава, соединяющие интерфейсное устройство с детектором, продуваются потоком 1 л/мин газообразного ксенона, поступающим из детектора в систему очистки газа. На входе в газовую систему каждый канал подачи ксенона оснащен вентилем и контролирующим расходомером MKS 1479D. Необходимый поток газа в каждой линии устанавливается и регулируется программным образом.

Процесс очистки 200 кг ксенона займет несколько недель непрерывной работы установки. Мониторинг степени очистки ксенона осуществляется при помощи двухфазной ионизационной камеры, как это было описано ранее [14].

2.3. Криогенная система

Система термостатирования РЭД-100 построена по принципу термосифона и обеспечивает конденсацию около 200 кг жидкого ксенона в течение суток и поддержание температуры холодного сосуда титанового криостата в диапазоне 160–190 К с точностью не хуже 1 К, как это было описано в специальной статье [15].

С помощью термосифонной криогенной системы технически также возможно заполнение РЭД-100 жидким аргоном, чтобы проверить справедливость предсказанной в рамках Стандартной модели зависимости сечения процесса у.к.р.н. от числа нейтронов в ядре, согласно формуле (1).

2.4. Система сбора данных

Логика работы системы сбора данных основана на оцифровке сигналов с помощью модулей CAEN V1730B и последующей обработке оцифрованных сигналов триггером на базе программируемого логического модуля CAEN V1495 [16, 17]. Модули выполнены в стандарте VME и испытаны в составе системы с крейтом CAEN 8100 и контроллером крейта CAEN V2718. Разработана специальная прошивка для модуля CAEN V1495, позволяющая вырабатывать триггер на все типы событий, необходимых детектору для калибровки и набора данных, включая события с одним элект-

роном ионизации. Также в прошивке реализована управляемая схема совпадений для выработки триггера при совпадении заданных событий и система регистрации событий, где каждому событию присваивается временная метка и тип зарегистрированного события.

Результаты исследования показали, что в целом характеристики указанных модулей CAEN V1730 соответствуют значениям, заявленным фирмой-производителем. Частотные характеристики, такие как частота оцифровки и полоса пропускания аналогового усилительного тракта, хорошо согласованы и отвечают требованиям, обеспечивающим функционирование РЭД-100. Коэффициент усиления может варьироваться в пределах 1–200 для каждого канала в зависимости от решаемой задачи (регистрация полезных или калибровочных сигналов). Динамический диапазон амплитуд регистрируемых сигналов несколько хуже заявленных теоретических характеристик, но находится в пределах допустимого. Это подтверждает правильность выбора модели модулей оцифровки сигналов. Вариации характеристик различных каналов находятся в пределах допустимой погрешности.

Исследовано взаимодействие модулей оцифровки форм электрических сигналов CAEN V1730 с программными компонентами системы сбора данных 10 (см. рис. 1). Модули используют стандартный интерфейс фирмы CAEN и были успешно интегрированы в систему после небольших изменений. Проверена работа модулей как в одноканальном режиме, так и в режиме полной загрузки. Устоявшаяся скорость чтения форм сигналов из модуля соответствует заявленной производителем. Модули отвечают требованиям системы сбора данных в программной части. Они размещены в двух крейтах NIM и одном крейте VME и компактно расположены в одной 19"-стойке. Расположение элементов системы позволяет перемещать всю систему целиком при необходимости, при этом сохраняется легкость доступа к модулям для тестирования и перекоммутации сигналов.

2.5. Фотозлектронные умножители

Регистрация сцинтилляционных и люминесцентных фотонов в чувствительном объеме РЭД-100 осуществляется с помощью двух матриц 3 и 7 (см. рис. 2), составленных из 19-ти вакуумных ф.э.у. НАМАМАТСУ R11410-20 в низкофоновых металлических корпусах, оснащенных кварцевыми окнами диаметром 76 мм, оптически прозрачными для света с длиной волны ≥ 160 нм. Заявленная производителем квантовая эффективность фотокатода диаметром 64 мм составляет 30–35% для длины волны 175 нм.

Фотоумножители оснащены индивидуальными управляемыми делителями напряжения, изготовленными с помощью бессвинцовых электронных компонент поверхностного монтажа на основе материала Cirflex, оптимального для использования в среде чистого криогенного ксенона. Общее сопротивление каждого делителя напряжения составляет 18.5 МОм, что обеспечивает выделение тепловой мощности ≤ 6 Вт со всех 38-ми ф.э.у. Система управления делителями позволяет блокировать считывание интенсивных сигналов от космических мюонов, пересекающих рабочий объем детектора, загрузка от которых может достигать $\sim 2 \cdot 10^7$ фотоэлектронов на один ф.э.у. в течение 200 мкс собирания электронов ионизации из рабочего объема детектора [18].

Каждый из установленных в детекторе ф.э.у. прошел предварительную процедуру характеристики при комнатной температуре, включающую измерение однофотоэлектронных характеристик, темнового счета, временных спектров следования послеимпульсов и ряда других параметров [19]. Характеризация ф.э.у. показала, что они имеют хорошее однофотоэлектронное разрешение и достаточно высокое внутреннее усиление ($\sim 5 \cdot 10^6$) сигнала при средних величинах напряжения питания ~ 1500 В. Это позволило обойтись без использования предусилителя в электронном тракте считывания сигналов с детектора (используется лишь один основной усилитель Phillips Scientific 777 с коэффициентом усиления 2–50). Измерения при комнатной температуре также показали, что основная часть используемых ф.э.у. характеризуется частотой темнового счета ~ 5 кГц, которая может снижаться до нескольких десятков герц при понижении температуры до -60°C и ниже. В то же время было выявлено два экземпляра ф.э.у., демонстрирующих крайне высокую и нестабильную частоту темновых шумов, на уровне 100 кГц. Как было выяснено в ходе дополнительных исследований, причина столь высокого уровня собственных шумов данных приборов кроется в эмиссии света внутренней структурой ф.э.у. [20].

2.6. Технический запуск установки РЭД-100

В ноябре 2015 г. было проведено трехнедельное круглосуточное криогенное испытание установки (технический запуск) с целью комплексного исследования работоспособности всех описанных выше систем. Были получены следующие результаты.

1. Проверка работоспособности ф.э.у. в ксенона при низких температурах показала, что подавляющее большинство (72%) ф.э.у. типа НАМА-TSU R11410-20 в охлажденном режиме работают с пониженным на порядок уровнем одноэлек-

тронных шумов по сравнению с режимом работы при комнатной температуре. При этом делители нижней матрицы ф.э.у., будучи погруженными в жидкий ксенон, работают как в штатном режиме, без пробоев и вскипания жидкого ксенона, так и в управляемом режиме — для отключения съема сигналов на время электролюминесценции, иницированной космогенными мюонами.

2. Термосифонная система криостатирования способна поддерживать температуру холодного сосуда криостата с точностью порядка $1^\circ\text{--}2^\circ$, так что давление паров ксенона не превышает 1.3 абс. атм. Ожижение ксенона в детекторе обеспечивается со скоростью до 10 л/мин при н.у. (60 г/мин), эвакуация жидкого ксенона из РЭД-100 в охлажденный баллон может осуществляться со скоростью 10 кг/ч.

3. Системы газообеспечения и криостатирования обеспечивают режим стабильной циркуляции ксенона из жидкой фазы в газообразную через горячий геттер и обратно в жидкую фазу со скоростью до 15 л/мин при н.у. в пределах расхода жидкого азота ~ 5 л/ч для обеспечения функционирования всей установки.

4. Система высоковольтного питания обеспечивает напряженность электрического поля, достаточную для собирания электронов из рабочего объема детектора, эффективной эмиссии электронов из жидкого ксенона и генерации электролюминесценции газовой фазы при дрейфе эмиттировавших электронов.

5. Система сбора данных отлажена при регистрации сигналов от космогенных мюонов, пересекающих рабочий объем детектора, и может работать бесперебойно достаточно длительное время для набора необходимого в планируемом эксперименте объема данных.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря поддержке государственного контракта НИЯУ МИФИ и Министерства образования РФ № 11.G34.31.0049 от 19 октября 2011 г. в рамках гранта правительства Российской Федерации по постановлению № 220 в НИЯУ МИФИ в 2011–2015 гг. был построен и испытан уникальный детектор РЭД-100 (российский эмиссионный детектор), использующий до 240 кг жидкого ксенона в качестве рабочего вещества.

В период 2017–2018 гг. международная научная коллаборация COHERENT планирует использовать установку РЭД-100 для постановки эксперимента по обнаружению и исследованию процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на тяжелых ядрах на ускорительном комплексе Spallation Neutron Source в Окриджской национальной лаборатории США [21].

Детектор РЭД-100 может также использоваться для исследования неупругих взаимодействий нейтрино с тяжелыми ядрами, для наблюдения ($\bar{\nu}_e e$)-рассеяния с малыми энерговыделениями [22], для поиска позитронного безнейтринного бета-распада [23], для исследования процесса у.к.р.н. на ядерных реакторах, являющихся интенсивными источниками нейтрино одного типа $\bar{\nu}_e$ [24].

В случае успеха в наблюдении у.к.р.н. и подтверждения ожидаемой величины сечения этого процесса открывается уникальная возможность для создания компактных и мобильных установок нового типа для независимого мониторинга ядерных реакторов по нейтринному излучению [25]. Такие устройства могут использоваться для дистанционного контроля состояния и изотопного состава активной зоны реактора, например, в интересах программ нераспространения, поддерживаемых международным агентством МАГАТЭ [26].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Freedman D.Z.* // Phys. Rev. D. 1974. V. 9. P. 1389. doi 10.1103/PhysRevD.9.1389
2. *Bolozdynya A.I.* // Physics Procedia. Fundamental Research in Particle Physics and Cosmophysics. 2015. V. 74. P. 405. doi 10.1016/j.phpro.2015.09.212
3. *Horowitz C.J., Coakley K.J., McKinsey D.N.* // Phys. Rev. D. 2003. V. 68. P. 023005. doi 10.1103/PhysRevD.68.023005
4. *Barbeau P.S., Collar J.I., Tench O.* // JCAP. 2007. V. 09. P. 009. doi 10.1088/1475-7516/2007/09/009
5. CoGeNT Collaboration. *Collar J.I. et al.* // Journal of Physics Conference Series. 2008. V. 136. P. 022009. doi 10.1088/1742-6596/136/2/022009
6. *Wong H.T., Li H.B., Lin S.K., Lin S.T., He D., Li J., Li X., Yue Q., Zhou Z.Y., Kim S.K.* // Nucl. Phys. B. Proceedings Supplements. 2011. V. 221. P. 320. doi 10.1016/j.nuclphysbps.2011.09.024
7. *Акимов Д.Ю., Болоздыня А.И., Каванна Ф., Ефременко Ю.В., Гарвей Г.Т., Гудков В.П., Хацikutелис А., Хикс В.Р., Луис В.К., Линк Дж.М., Марков Д.М., Миллс Г.Б., Патон К., Рэй Х., Шолберг К. и др.* Возможности для исследования нейтрино на ускорительном источнике нейтронов типа Spallation Neutron Source. М.: НИЯУ МИФИ, 2013.
8. *Avignone III.F.T., Efremenko Y.V.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2003. V. 29. P. 2615. doi 10.1088/0954-3899/29/11/012
9. *Scholberg K.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 033005. doi 10.1103/PhysRevD.73.033005
10. *Freedman D.Z., Schramm D.N., Tubbs D.L.* // Annual Review of Nuclear Science. 1977. V. 27. P. 167. doi 10.1146/annurev.ns.27.120177.001123
11. *Monroe J., Fisher P.* // Phys. Rev. D. 2007. V. 76. P. 033007.
12. *Akimov D.Y., Belov V.A., Bolozdynya A.I., Burenkov A.A., Efremenko Y.V., Etenko A.V., Kaplin V.A., Karelin A.K., Khromov A.V., Kirsanov M.A., Klimanov S.G., Kobayakin A.S., Kononov A.M., Kovalenko A.G., Kuchenko A.V. et al.* // J. Inst. 2016. V. 11. C03007. doi 10.1088/1748-0221/11/03/C03007
13. *Анисимов С.Н., Барабаш А.С., Болоздыня А.И., Стеханов В.Н., Чураков Д.Л.* // ПТЭ. 1991. № 2. С. 79.
14. *Alexandrov I.S., Belov V.A., Bolozdynya A.I., Burenkov A.A., Chepurinov A.S., Danilov M.V., Efremenko Y.V., Etenko A.V., Gromov M.B., Gulin M.A., Ivakhin S.V., Kaplin V.A., Karelin A.K., Khromov A.V., Kirsanov M.A. et al.* // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2015. V. 62. Issue 1. P. 257. doi 10.1109/TNS.2014.2381365
15. *Bolozdynya A.I., Dmitrenko V.V., Efremenko Y.V., Khromov A.V., Shafigullin R.R., Shakirov A.V., Sosnovtsev V.V., Tolstukhin I.A., Uteshev Z.M., Vlasik K.F.* // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. V. 80. P. 159. doi 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.001
16. *Наумов П.П., Акимов Д.Ю., Белов В.А., Болоздыня А.И., Ефременко Ю.В., Каплин В.А.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. № 9–10. С. 824.
17. *Naumov P.P., Akimov D.Yu., Belov V.A., Bolozdynya A.I., Efremenko Yu.V., Kaplin V.A.* // Physics of Atomic Nuclei. 2015. V. 78. № 13. P. 1539. doi 10.1134/S1063778815130244
18. *Акимов Д.Ю., Болоздыня А.И., Ефременко Ю.В., Крахмалова Т.Д., Каплин В.А., Кумпан А.В., Меликян Ю.А., Онищенко Е.М., Сосновцев В.В., Шакиров А.В.* // ПТЭ. 2014. № 5. С. 108. doi 10.7868/S0032816214050012
19. *Акимов Д.Ю., Болоздыня А.И., Ефременко Ю.В., Каплин В.А., Коваленко А.Г., Меликян Ю.А., Сосновцев В.В., Шакиров А.В., Хромов А.В.* // ПТЭ. 2015. № 3. С. 97. doi 10.7868/S0032816215020135
20. *Akimov D.Y., Bolozdynya A.I., Efremenko Y.V., Kaplin V.A., Khromov A.V., Melikyan Y.A., Sosnovtsev V.V.* // Nucl. Instrum. and Methods. B. 2015. V. A794. P. 1. doi 10.1016/j.nima.2015.04.066
21. COHERENT collaboration. *Akimov D. et al.* The COHERENT Experiment at the Spallation Neutron Source. arXiv:1509.08702v1. 29 Sep 2015.
22. *Baldo-Ceolin M., Puglierin G., Barmin V., Barabash A., Bolozdynya A., Dolgolenko A., Nozik V., Starostin A., Shebanov V., Tumanov G., Zeldovich O.* // In Proc. Conf. "Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei". Dubna, 1992. P. 753.
23. *Bolozdynya A., Egrov V., Koutchenkov A., Safronov G., Smirnov G., Medved S., Morgunov V.* // IEEE Nucl. Sci. Symposium. Conference Record. 1996. V. 2. P. 697. doi 10.1109/NSSMIC.1996.591409
24. RED collaboration. *Akimov D.Yu. et al.* // Physics Procedia. 2015. V. 74. P. 423.
25. *Белов В.А.* // Доклад на "11th Workshop on Applied Antineutrino Physics (AAP-2015)", декабрь 2015 г. <http://arxiv.org/pdf/1602.04759v1.pdf>
26. *Akimov D.Y., Alexandrov I.S., Aleshin V.I., Belov V.A., Bolozdynya A.I., Burenkov A.A., Chepurinov A.S., Danilov M.V., Derbin A.V., Dmitrenko V.V., Dolgolenko A.G., Egorov D.A., Efremenko Y.V., Etenko A.V., Gromov M.B. et al.* // JINST. 2013. V. 8. P10023. doi 10.1088/1748-0221/8/10/P10023