

ЭКСПЕРИМЕНТ НА КАЛИНИНСКОЙ АЭС ПО ПОИСКУ ЭФФЕКТА УПРУГОГО КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ РЕАКТОРНЫХ НЕЙТРИНО НА ЯДРАХ КСЕНОНА С ПОМОЩЬЮ ДВУХФАЗНОГО ЭМИССИОННОГО ДЕТЕКТОРА РЭД-100

А. В. Пинчук

Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, avpmephi@gmail.com

В статье представлено описание эксперимента на Калининской АЭС с целью разработки методики регистрации слабых ионизационных сигналов, ожидаемых от эффекта упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН) на тяжёлых ядрах, с помощью двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100 с рекордной для такого рода эксперимента массой рабочего вещества.

Ключевые слова: УКРН; двухфазный детектор; мониторинг ядерных реакторов; эмиссионный детектр; реакторные антинейтрино.

THE EXPERIMENT AT THE KALININ NPP TO SEARCH FOR THE EFFECT OF COHERENT ELASTIC NEUTRINO-NUCLEUS SCATTERING ON XENON NUCLEI USING THE TWO-PHASE EMISSION DETECTOR RED-100

A. V. Pinchuk

International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, avpmephi@gmail.com

The article presents a description of an experiment conducted at the Kalinin NPP, aimed at developing a technique for detecting weak ionization signals expected from the coherent elastic neutrino-nucleus scattering (CEvNS) effect on heavy nuclei. The experiment utilizes the two-phase RED-100 detector, which features the largest mass of target material ever used in this type of experiment.

Keywords: CEvNS; two-phase detectors; monitoring of nuclear reactors; emission detectors; reactor antineutrinos.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-1-107-111>

Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 был разработан специально для регистрации эффекта упругого когерентного рассеяния нейтрино на тяжёлых ядрах в условиях наземной лаборатории [1, 2, 3]. Основной рабочий объем детектора содержит 200 кг жидкого ксенона, который находится в дрейфовом объеме, создаваемом с помощью многослойной электродной структуры. Эта структура размещена внутри тефлоновой светособирающей конструкции, обеспечивающей эффективное улавливание и перенос сцинтилляционного света. Для регистрации сигналов используются фотодетекторы, состоящие из двух матриц по 19 криогенных ультрафиолетовых (УФ) фотоумножителей (ФЭУ) Hamamatsu R11410-20. ФЭУ чувствительны к фотонам с длиной волны около 175 нм, которые возникают в дрейфовом объеме в результате взаимодействий частиц. Работа детектора РЭД-100 обеспечивается комплексом систем, включая системы криогеники, сбора данных и мониторинга, которые интегрированы в единую экспериментальную установку.

Схематичное изображение основных блоков установки РЭД-100 представлены на рисунке 1.

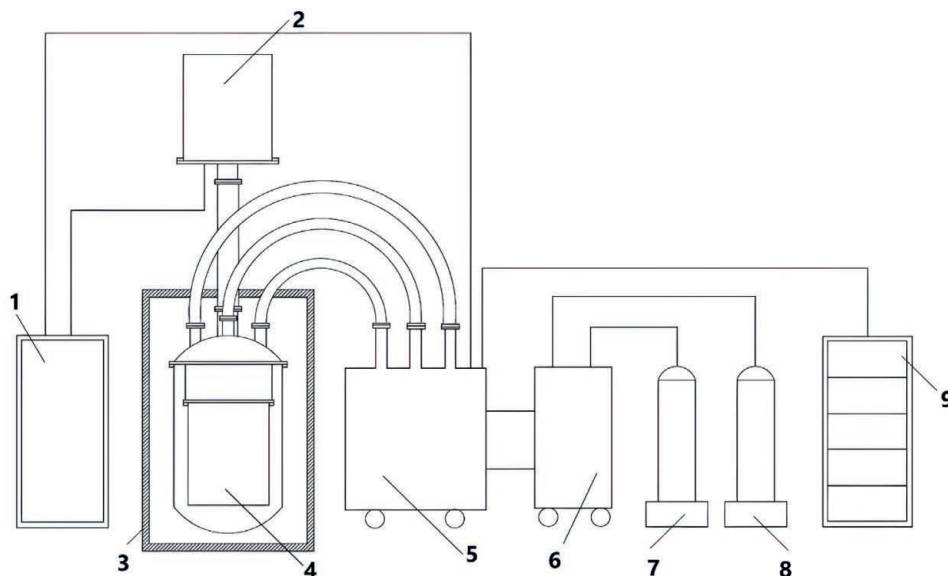


Рис. 1. Блок-схема установки РЭД-100:

1 – система управления термосифонами; 2 – жидко-азотный дьюар термосифонной криогенной системы; 3 – пассивная защита; 4 – детектор РЭД-100; 5 – интерфейсный модуль В react-Through-Box (ВТВ); 6 – система газовой очистки; 7,8 – система хранения газообразного ксенона; 9 – система сбора данных

На Калининской АЭС детектор РЭД-100 располагался примерно посередине технологического зала размером 9×9 м под реактором на расстоянии ~ 19 м от центра активной зоны реактора и ~ 1 м от вертикальной оси реактора. Детектор в медно-водяной пассивной защите общей массой ~ 15 т размещается на специальной разгрузочной платформе (рисунок 2) размером 3×3 м.

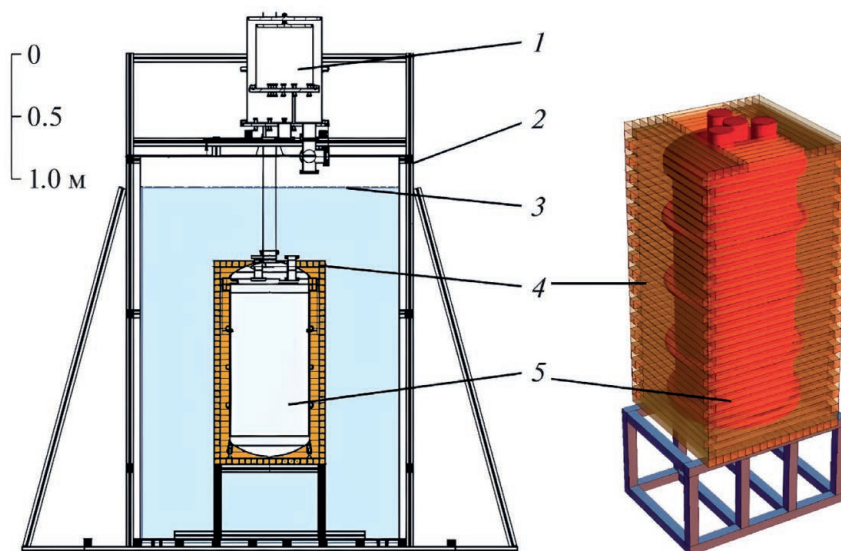


Рис. 2. Радиационная защита детектора РЭД-100:

1 – сосуд Дьюара термосифона; 2 – опорная рама; 3 – резервуар с водой; 4 – медная защита; 5 – корпус титанового криостата детектора РЭД-100

Установка РЭД-100 располагалась на уровне земли, на два уровня ниже активной зоны реактора ВВЭР-1000 тепловой мощностью 3 ГВт. Расчетная защита от космического фона в вертикальном направлении составляет около 50 метров водного эквивалента (м.в.э.) [4]. Кроме того, это место хорошо защищено от самого реактора биологической защитой, толстыми двухуровневыми потолками и расстоянием от реактора в 19 м.

Пассивная защита РЭД-100 состоит из 5 см меди и около 70 см воды во всех направлениях. Исследование эффективности пассивной защиты проводилось в лаборатории и описано в статье. Хотя эта защита подавляет окружающий гамма-фон по крайней мере на два порядка согласно предыдущему исследованию и почти непрозрачна для нейтронов низкой энергии, тем не менее важно контролировать потоки внешнего фона, чтобы выявить возможную разницу в скорости счета детектора между периодами включения и выключения реактора.

В период сбора данных РЭД-100 были установлены и непрерывно работали четыре детектора для измерения радиационного фона: два отечественных индикатора радона, детектор NaI[Tl] для контроля гамма-фона и жидкостный сцинтиллятор «Bicron» (BC501A) для контроля нейтронного фона. Последние два детектора располагались вблизи резервуара с водой РЭД-100 на высоте 180 см от пола, примерно на уровне центра рабочего объема РЭД-100.

Кроме того, до и во время эксплуатации РЭД-100 было проведено несколько дополнительных измерений характеристик гамма- и радонового фона на месте проведения эксперимента. Гамма-фон был охарактеризован с помощью более крупного детектора NaI[Tl], который использовался в предыдущих лабораторных измерениях, описанных в [4]. Радоновый фон замерялся сотрудниками КАЭС несколько раз в ходе эксплуатации РЭД-100. Согласно этим измерениям, фон радона был ниже чувствительности имеющихся детекторов, которая составляет 20 Бк/м³.

Результат средней скорости счета в секунду для всего диапазона энергий (0,05–10 МэВ) в течение каждого дня показан на рисунке 3.

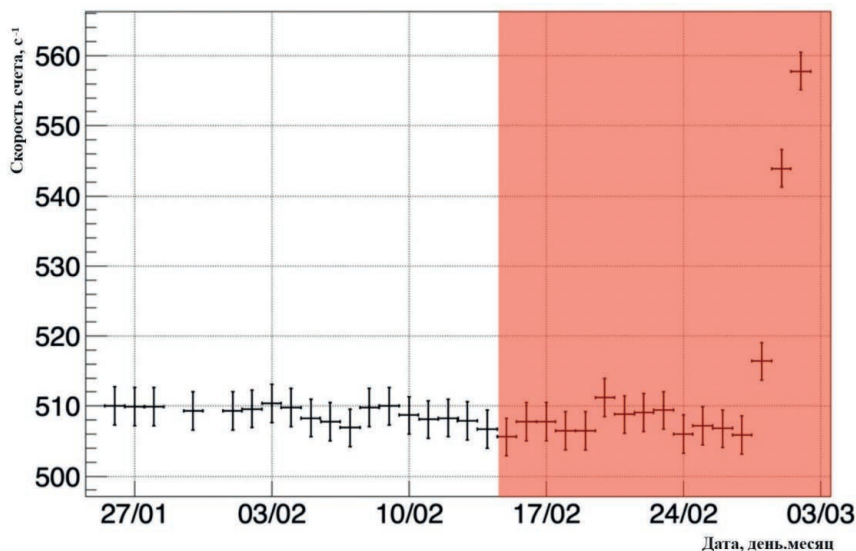


Рис. 3. Средняя скорость счета за день во время проведения эксперимента РЭД-100; красный прозрачный прямоугольник отмечает период включения реактора

Как видно из рисунка 3, влияния работы реактора на гамма-фон в экспериментальном зале РЭД-100 не наблюдалось. Тенденция к увеличению скорости счета, начавшаяся в конце февраля, была вызвана сливом воды водного резервуара РЭД-100.

Используя верхний предел нейтронного потока и энергетический спектр нейтронов, можно оценить соответствующую фоновую скорость счета УКРН в зоне интереса РЭД-100. Пред-

варительное моделирование Geant4 предполагает, что речь идет примерно об одном событии в день, что того же порядка величины, что и ожидаемый сигнал УКРН. Поэтому необходимо определить возможные изменения потока нейтронов в процессе работы реактора, чтобы оценить их потенциальное влияние на чувствительность РЭД-100 к УКРН. Для этого была построена зависимость скорости счета нейтронных взаимодействий в детекторе «Bicron» с поправкой на единицу живого времени от астрономического времени (рисунок 4).

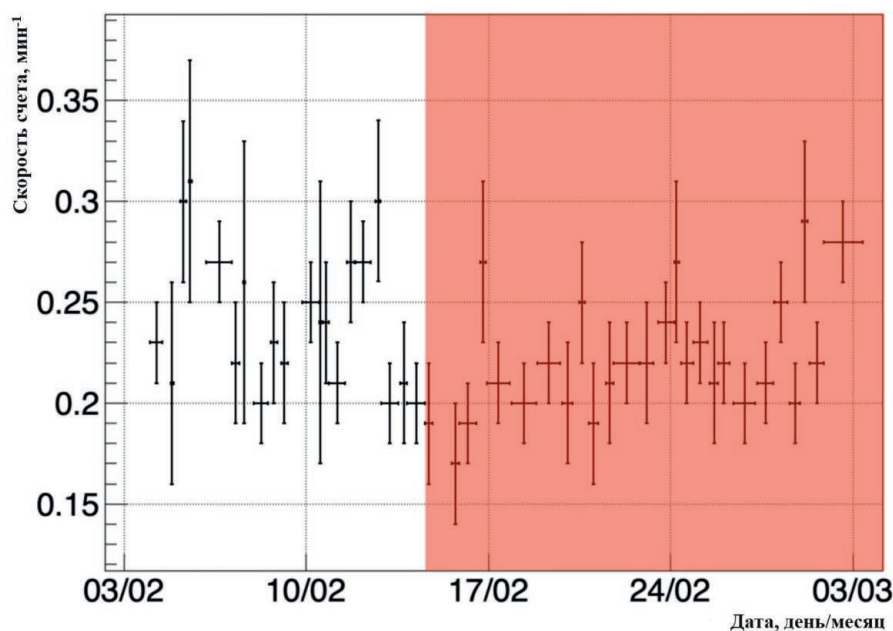


Рис. 4. Скорость счета нейтронных событий, полученная с помощью жидкостного сцинтилляционного детектора «Bicron»

На рисунке 4 красный прозрачный прямоугольник представляет период включения реактора; горизонтальные полосы ошибок показывают продолжительность каждого прогона; последняя точка на графике соответствует длительному набору после слива водной защиты РЭД-100.

При записи данных УКРН использовались специальные настройки триггера системы сбора данных РЭД-100. Триггер вырабатывался по совпадению 60 однофотозлектронных импульсов ФЭУ в рамках временного интервала длительностью 2 мкс. Такой сигнал соответствует электролюминесценции от трёх электронов ионизации в газовом зазоре детектора. Дополнительным условием выработки триггера являлось присутствие в 50 мкс окне, предшествующем окну совпадения, не более чем 50 импульсов ФЭУ. Такая блокировка позволяла исключать ещё на этапе выработки триггера сильно заселённые одноэлектронными сигналами периоды времени.

В настоящее время продолжается расчёт чувствительности эксперимента РЭД-100 к УКРН на базе полученной на КАЭС статистики, эквивалентной 0,88 суток с выключенным реактором и 2,63 суток с работающим. На основе этого анализа в 2024 году будет установлен верхний предел на сечение УКРН на ядрах ксенона.

Предварительные оценки показывают чувствительность на уровне в ~50 раз выше предсказания Стандартной модели. Малое время эффективной экспозиции на КАЭС обусловлено техническими проблемами, в числе которых разрыв мембраны циркуляционного насоса, гарантирующего чистоту жидкого ксенона, а также поломка шлейфа, связанного с выработкой триггера. Слабость ожидаемого предела обусловлена малым временем экспозиции, эффектом

зависимости триггера установки от температуры в помещении, пробоями в объёме детектора, а также наличием фона от совпадения нескольких электронов ионизации, коррелированных по положению.

Основные результаты эксперимента на КАЭС заключаются в следующем:

1. Проведена экспозиция двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100, разработанного и построенного в НИЯУ МИФИ, с жидким ксеноном (масса вещества в рабочем объеме 160 кг) в качестве рабочего вещества на Калининской АЭС, показавшая возможность использования относительно массивного двухфазного эмиссионного детектора для регистрации эффекта УКРН в условиях промышленной АЭС.

2. Эксперимент на КАЭС показал, что детектор РЭД-100 чувствителен к слабым ионизационным сигналам вплоть до одиночных электронов, что достаточно для наблюдения эффекта УКРН

3. В результате испытаний установки РЭД-100 на КАЭС было показано, что радиационная защита установки РЭД-100 обеспечивает необходимую защиту от радиационных фонов на АЭС, остаточный радиационный фон в детекторе стабилен и не зависит от того, включен или выключен реактор.

4. Эксперимент на КАЭС показал, что при использовании жидкого ксенона в качестве рабочей среды эмиссионного детектора в области ожидаемого эффекта УКРН наблюдается одно-электронный фон, связанный с облучением рабочей среды космическими мюонами.

Библиографические ссылки

1. Status of the RED-100 experiment. *D.Yu. Akimov [et. al.] // Journal of Instrumentation*, (2017), Volume 12.
2. The RED-100 two-phase emission detector/ *D.Yu. Akimov [et. al.] // Instruments and Experimental Techniques*, (2017), Volume 60, Issue 2, pp 175-181.
3. RED-100 detector for the first observation of the elastic coherent neutrino scattering off xenon nuclei. *D.Yu. Akimov [et. al.] // Journal of Physics Conference Series*, (2016), 675(1):012016.
4. DANSS: Detector of the reactor AntiNeutrino based on Solid Scintillator/ *Alekseev I. et al. // JINST* 2016. V. 11. P11011.
5. A Passive Shield for the RED-100 Neutrino Detector / *D.Yu. Akimov [et. al.] // Instruments and Experimental Techniques*, 2021 Vol. 64, No. 2 pp. 202–208.