

## ДЕТЕКТОР IDREAM НА КАЛИНИНСКОЙ АЭС: СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ

*А. В. Абрамов<sup>1</sup>, А. С. Чепурнов<sup>2</sup>, А. В. Этенко<sup>1</sup>,  
М. Б. Громов<sup>2,3</sup>, А. В. Константинов<sup>1,\*</sup>, Д. С. Кузнецов<sup>1</sup>,  
Е. А. Литвинович<sup>1</sup>, Г. А. Лукьянченко<sup>4</sup>, И. Н. Мачулин<sup>1</sup>,  
А. Е. Мурченко<sup>1</sup>, А. М. Немерюк<sup>1</sup>, Р. Р. Нугманов<sup>1</sup>,  
Б. А. Обиняков<sup>1</sup>, А. Ю. Оралбаев<sup>1</sup>, А. А. Растимешин<sup>1</sup>,  
М. Д. Скорохватов<sup>1</sup>, С. В. Сухотин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>3</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>4</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

В настоящее время в обществе широко обсуждается различное применение нейтрино. Одним из направлений является использование нейтрино для мониторинга активной зоны ядерных реакторов и контроля за нераспространением делящихся материалов. Установка IDREAM — это опытный образец детектора, разработанного для регистрации антинейтрино из активной зоны реактора посредством процесса обратного бета-распада. Мишень детектора представляет собой 1 т жидкого сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола с добавлением гадолиния. Детектор установлен на Калининской атомной электростанции (Удомля, Россия), приблизительно в 20 м от активной зоны реактора. Сбор данных IDREAM начался весной 2021 г. Представлено описание детектора, а также обсуждаются результаты измерения фоновых условий на месте проведения эксперимента.

At present, various neutrino applications are widely discussed in the community. One such topic is the use of neutrinos for nuclear nonproliferation and reactor monitoring. IDREAM is the prototype detector developed for antineutrinos registration from the reactor core through the inverse beta-decay process. The IDREAM target is 1 t of liquid scintillator based on linear alkylbenzene doped with gadolinium. The detector has been installed at the Kalinin Nuclear Power Plant (Russia), 20 m from the reactor core. The IDREAM data taking is ongoing since spring 2021. The experiment concepts and the detector's location are presented, the results of background measurements and efficiency of the IDREAM radiation shielding are discussed.

PACS: 14.60.Lm

---

\* E-mail: konstantinov\_av@nrcki.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Впервые идея применения реакторных антинейтрино для мониторинга состояния реакторов атомных станций была высказана в 1977 г. Л. А. Микаэляном [1] и затем развита учеными НИЦ «Курчатовский институт» [2]. Источником антинейтрино в реакторе являются бета-активные осколки, образующиеся при делении нейтронами ядер урана и плутония. В среднем на один акт деления приходится около шести электронных антинейтрино от всех активных бета-осколков, а общий поток электронных антинейтрино от реактора с тепловой мощностью 1 ГВт составляет  $\sim 10^{20}$  частиц/с. Вследствие малого сечения взаимодействия ( $\sim 10^{-43}$  см<sup>2</sup>) нейтрино уносят неискаженную информацию из активной зоны реактора. В то же время столь слабое взаимодействие нейтрино является проблемой для их регистрации в детекторе, что, в свою очередь, компенсируется огромным потоком числа антинейтрино из активной зоны реактора.

Исследования, проведенные в 1980–1990 гг. группой ученых НИЦ «Курчатовский институт» на Ровенской АЭС [3, 4] и Буже (Франция) [5], подтвердили научную обоснованность первоначальной идеи, что дало старт общемировому тренду в развитии прикладной физики антинейтрино для диагностики состояния активной зоны промышленных реакторов.

В начале 2000-х гг. в мире возрос интерес к данной тематике, что привело к ряду новых работ [6, 7]. Начиная с 2010-х гг. учеными НИЦ «Курчатовский институт» и НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына разрабатывался проект промышленного детектора реакторных антинейтрино для мониторинга АЭС на основе жидкого сцинтиллятора — детектор IDREAM (Industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring).

Принцип регистрации реакторных антинейтрино был выбран на основе хорошо изученной реакции обратного бета-распада (ОБР) [8, 9]:



Порог реакции соответствует 1,806 МэВ. В детекторе, который представляет собой сцинтилляционный спектрометр, взаимодействия антинейтрино отбираются по задержанным совпадениям продуктов реакции — позитрону, выделившаяся энергия которого однозначно связана с энергией антинейтрино  $E = E_\nu - 1,8 + 1,02$  МэВ (аннигиляция позитрона), и нейтрону, который после замедления и диффузии захватывается растворенным в сцинтилляторе гадолинием (1 г/л), испускающим каскадные гамма-кванты с суммарной энергией  $\sim 8$  МэВ. Среднее время жизни нейтронов в гадолиниевом жидком сцинтилляторе составляет  $\sim 30$  мкс.

Ожидается, что развитие технологии прикладного нейтринного мониторинга АЭС будет способствовать повышению эксплуатационной безопасности атомных электростанций. В перспективе нейтринные детекто-

ры могут стать дополнительным инструментом МАГАТЭ для поддержки гарантий нераспространения делящихся материалов.

## КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА IDREAM

На этапе проектирования IDREAM [10] задумывался как прототип промышленного детектора для реакторного мониторинга с высокой степенью ремонтпригодности и облегченным монтажом при установке.

Корпус IDREAM состоит из двух концентрических баков из листов нержавеющей стали толщиной 2 мм, которые закрыты общей герметичной крышкой (рис. 1).

Внутренний бак, жестко закрепленный на дне наружного бака, имеет диаметр 1254 мм, высоту 1320 мм и разделен на две части выпуклой прозрачной мембраной из акрила с вертикальной трубкой (диаметром 180 мм, высотой 470 мм) с целью отделения мишени детектора от буферного объема. Для повышения эффективности светосбора дно и стенки внутреннего бака и кольцевого объема облицованы светоотражающей пленкой Lumigrog (компании Toyga, Япония), плотно прижатой к стенкам и дну бака. Наружный бак имеет диаметр 1858 мм, высоту 1620 мм и состоит из трех герметично соединенных секций (см. рис. 1).

Кольцевой объем между стенками внутреннего и наружного баков имеет высоту 1220 мм, ширину 300 мм и просматривается равномерно расположенными фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) с шагом  $30^\circ$ . Детектор укомплектован в общей сложности 28 ФЭУ Hamamatsu R5912, при этом 16 ФЭУ просматривают центральный объем (мишень) детектора, а 12 ФЭУ — кольцевой объем (гамма-кетчер), полностью светоизолированный от мишени. Функционально гамма-кетчер является частью активной защиты детектора от космического излучения, а также повышает эффективность детектора за счет регистрации продуктов реак-

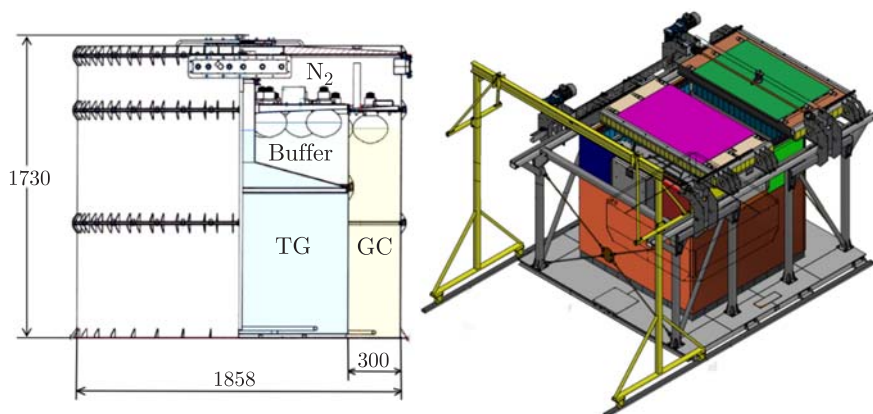


Рис. 1. Общий вид и конструкция детектора IDREAM

ции ОБР, вышедших за пределы мишени. Сверху детектор закрывается герметичной крышкой из нержавеющей стали. В крышке сделаны три отверстия в виде трубки для герметичного ввода в мишень необходимого технологического оборудования. В одной трубке установлен датчик уровня сцинтиллятора мишени, совмещенный с датчиком его температуры. Другая трубка из нержавеющей стали используется для калибровки детектора с помощью калибратора и стандартных радиоактивных источников. Третье отверстие предусмотрено для дополнительного герметичного ввода в мишень.

Ввиду наличия на Калининской АЭС повышенного радиационного фона гамма- и нейтронных полей для детектора IDREAM разработана система радиационной защиты, состоящая из нейтронно-тормозящих блоков (пассивная защита) по периметру детектора на верхних створках и поддоне. Нижний и верхний слои пассивной защиты дополнительно содержат слой из чугунных блоков толщиной 14 см и слой из свинцовых кирпичей толщиной 5 см соответственно. Для подавления фона, связанного с космическими мюонами, предусмотрена активная защита — система мюонного вето на основе сцинтилляционных пластин из полиметилметакрилата, которые установлены на раздвижных створках детектора. Пассивная и активная защиты объединены с детектором в единой несущей конструкции.

В общей сложности у детектора имеются три независимых и изолированных друг от друга объема:

- мишень —  $1,1 \text{ м}^3$ ;
- гамма-кетчер —  $1,7 \text{ м}^3$ ;
- буфер —  $0,4 \text{ м}^3$ .

В качестве мишени для нейтрино используется сцинтиллятор с большим содержанием ядер водорода — линейный алкилбензол (ЛАБ) с добавлением гадолиния концентрацией 1 г/л, а также PPO — 2,5 дефинилоксазол ( $\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{ON}$ ) и bis-MSB — 1,4-бис (2-метилстирил)бензол ( $\text{C}_{24}\text{H}_{22}$ ) концентрациями 2,7 и 0,02 г/л соответственно. Буферный объем располагается над мишенью и заполняется чистым ЛАБ, его основная задача — защита чувствительного объема мишени от естественной радиоактивности фотоумножителей. Гамма-кетчер — поглотитель гамма-квантов — заполнен тем же сцинтиллятором, что и мишень детектора, но без добавления гадолиния. Он используется для повышения эффективности регистрации гамма-квантов, образовавшихся в мишени за счет захвата нейтрона, а также для защиты мишени от высокоэнергетических космических мюонов.

Система медленного контроля (СМК) детектора была создана исходя из соображений объединения всех сенсоров и детектирующих элементов в единый модуль, что позволило получить не только контроль за любым индивидуальным датчиком детектора (уровнем жидкости, давлением, температурой), но и полную картину корреляций характеристик различных узлов детектора, оставаясь при этом в рамках единого протокола

обмена данными между детектором и управляющим компьютером. Одновременно предусмотрена возможность дистанционного вмешательства в работу детектора путем изменения значений параметров тех или иных его узлов.

СМК была реализована на сети CAN (Controller Area Network), которая хорошо подходит для связывания различных датчиков и управляющих устройств в единую сеть. CAN-сеть — это сеть типа «шина», в которой все узлы могут передавать и принимать данные. В качестве протокола верхнего уровня выбран открытый и простой в портировании на нужные устройства протокол CANopen. Непосредственное управление рабочими функциями выполняется с помощью специально написанных для IDREAM программ с удобными графическими интерфейсами.

Из практики работы с жидким органическим сцинтиллятором (ЖОС) известно, что при контактах с воздухом в ЖОС накапливается кислород, который приводит к падению световыхода этого сцинтиллятора, поэтому в детекторе он должен находиться в атмосфере инертного газа, в частности азота. С этой целью была разработана система наполнения азотом свободного от ЖОС объема детектора под герметичной крышкой баков и автоматического поддержания атмосферы азота под избыточным давлением 1–2 кПа. В состав системы входят:

- стандартный баллон с азотом вместимостью 40 л под давлением 150 бар;

- стандартный двухкамерный редуктор;

- точный регулятор выходного давления.

При хранении ЖОС и дальнейшей стандартной процедуре перекачки рабочих жидкостей с использованием системы заливки из внешних объемов в рабочую полость детектора возможно насыщение ЖОС кислородом, для удаления которого в детекторе предусмотрена система барботирования (продувания) чистым азотом. Барботирование осуществляется посредством пропускания через ЖОС мишени и гамма-кетчера азота под давлением 10 кПа. Азот поступает в ЖОС через кольцевые сепараторы — свернутые в кольцо трубки из нержавеющей стали с отверстиями, равномерно распределенными по всему периметру дна внутреннего бака и гамма-кетчера.

Для калибровок детектора и наблюдения за стабильностью сцинтиллятора была разработана калибровочная система, с помощью которой в автоматическом режиме возможно установить источник в калибровочном канале по оси мишени детектора с точностью до 2 мм.

Специально для IDREAM была создана система первичной обработки сигналов ФЭУ, которая построена по модульному принципу и состоит из четырех 8-канальных блоков сумматоров-дискриминаторов (компании ООО «Марафон», Россия). Также было создано триггерное устройство с использованием микросхемы программируемой логической матрицы (ПЛИС) Xilinx Zynq-7020, которая позволяет выделять из общего потока данных редкие полезные события со сложной сигнатурой. В качестве

оцифровщика формы импульсов детектора используется блок DT5730 фирмы CAEN. Напряжение на ФЭУ подается через систему высоковольтного питания, основанную на модульной конструкции и состоящую из шести 8-канальных модулей, каждый из которых обеспечивает подачу рабочего напряжения на любой ФЭУ до 2000 В при потреблении постоянного тока до 1 мА. Для управления системой высоковольтного питания используется последовательная шина CAN-bus, подсоединенная к контроллеру CAN-PCI, с протоколом верхнего уровня CANopen (компания ООО «Марафон», Россия). Генерация триггера от всех ФЭУ происходит в два этапа: на первом — обрабатываются входные сигналы от дискриминаторов и на основе выборочных цифровых сумм в скользящем временном окне вырабатываются первичные триггеры-кандидаты, а на втором — из первичных триггеров на схеме совпадений-антисовпадений формируются итоговые триггерные сигналы нескольких типов. Выделение событий взаимодействия антинейтрино осуществляется в ходе офлайн-анализа данных.

В результате прототип промышленного детектора IDREAM имеет следующие характеристики:

- обладает простой конструкцией;
- не требует ежедневного обслуживания;
- является малогабаритным для детекторов такого типа;
- является быстросборным/разборным;
- обладает наличием активной и пассивной защиты для проведения низкофоновых измерений;
- основан на принципе регистрации ОБР как хорошо зарекомендовавшей себя технологии регистрации нейтрино;
- имеет возможность удаленного контроля за всеми системами работы детектора.

Весной 2021 г. детектор IDREAM был установлен на третьем энергоблоке Калининской АЭС (КАЭС, Россия) приблизительно в 20 м от активной зоны реактора. Детектор был залит жидким сцинтиллятором с добавлением гадолиния и дальнейшим барботированием. Затем была установлена пассивная защита по периметру внешнего бака детектора, а также смонтирована верхняя активная защита от космических мюонов и пассивная защита от гамма-полей на верхних створках детектора. Вслед за установкой всех элементов детектора в процессе пусконаладки была проведена тщательная диагностика всех его систем, после чего был осуществлен физический запуск и начался первый набор данных.

## **ИЗМЕРЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ФОНОВ НА МЕСТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДЕТЕКТОРА**

В помещении 3А-121/1 третьего энергоблока Калининской АЭС, где расположен детектор, гамма-фон формируется из суммы большого числа источников как относительно постоянных (стены реакторного здания,

металлоконструкции), так и переменных по времени (космические мюоны, при прохождении которых за счет процессов ионизации в окружающем веществе рождаются потоки вторичных частиц, которые могут давать вклад в гамма-фон).

В процессе пусконаладки с целью определения реальных фоновых условий работы в местоположении детектора были проведены многочисленные исследования гамма- и нейтронных полей, а также фона от космических мюонов.

Измерения гамма-фона в различных точках помещения 3А-121/1 (на уровне пола) показали, что интенсивность гамма-излучения с энергиями менее 1 МэВ заметно (в 4–8 раз) варьируется от точки к точке, однако с ростом энергии фон становится более однородным. Сравнивая значения гамма-полей на верхних раздвижных створках и под ними за защитой детектора, можно сказать, что, начиная с 2,5 МэВ, интенсивность фона резко падает и потоки гамма-квантов подавляются в 2–3 раза, а в диапазоне энергий до 2 МэВ — в 4–6 раз. Также в течение недели проводились исследования по изучению стабильности гамма-фона в данном помещении. Как видно из рис. 2, в измеренных спектрах хорошо различимы гамма-линии  $^{137}\text{Cs}$  ( $E_\gamma = 667$  кэВ),  $^{60}\text{Co}$  ( $E_\gamma = 1,17$  и  $1,33$  МэВ),  $^{40}\text{K}$  ( $E_\gamma = 1,46$  МэВ), что характерно для реакторных помещений такого типа. В целом же гамма-фон не претерпел существенных изменений и оставался стабильным.

В помещении 3А-121/1 третьего энергоблока гамма-фон в среднем в 3–4 раза больше по сравнению с фоном лабораторного помещения в НИЦ «Курчатовский институт», где осуществлялась разработка детектора IDREAM. Также проводились измерения нейтронного фона в помещении 3А-121/1. Во время этих работ третий энергоблок КАЭС был остановлен и находился на плановом ремонте. Для измерений ис-

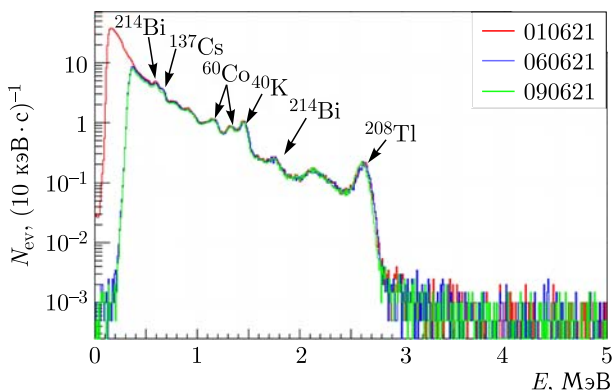
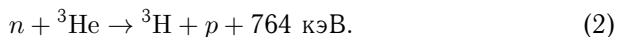


Рис. 2. Амплитудные спектры при длительном проведении измерений гамма-фона в помещении 3А-121/1

пользовалась сборка из 12 пропорциональных  ${}^3\text{He}$ -счетчиков длиной 1 м, интегрированных в состав единого блока и разбитых на четыре группы (по три счетчика в группе). Каждая группа имеет свой преусилитель. Детектирование тепловых нейтронов осуществляется по реакции



Для замедления нейтронов пространство между счетчиками внутри единого блока заполнено полиэтиленом. Согласно измерениям средний поток нейтронов в помещении 3А-121/1 Калининской АЭС составил  $\Phi_n = 42$  нейтронов/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ). Оценки полного потока медленных нейтронов у поверхности земли, производимых космическими лучами, соответствуют, по различным данным, от 1 до 10 нейтронов/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) [11, 12]. Следовательно, измеренный поток нейтронов в помещении 3А-121/1 является более высоким, по крайней мере в несколько раз. Скорость счета нейтронов внутри защиты IDREAM составила  $R_n = 0,03$  нейтронов/с. Таким образом, пассивная защита IDREAM обеспечила подавление потока нейтронов более чем в 100 раз.

Измерения фона от космических мюонов в помещении 3А-121/1 проводились с помощью двух сцинтилляционных пластин (по одному ФЭУ с каждой торцевой стороны пластины), расположенных друг над другом на расстоянии 0 и 30 см. Согласно работе [13] скорость счета мюонов на уровне земли составляет  $R_\mu \sim 1$  событие/( $\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ ). Результаты измерений потока космических мюонов на отметке 6,6 м четвертого энергоблока приведены в работе [14], в которой также показано, что поток сильно зависит от зенитного угла и подавлен в 2–14 раза относительно фона на уровне земли. На основе проведенных нами измерений можно заключить, что поток мюонов в помещении 3А-121/1 Калининской АЭС подавлен в 7,8 раза по сравнению с потоком мюонов в НИЦ «Курчатовский институт».

## АНАЛИЗ КАЛИБРОВОЧНЫХ ДАННЫХ И НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СТАБИЛЬНОСТЬЮ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА

На этапе ввода детектора в эксплуатацию летом 2021 г. были проведены многочисленные исследования отклика детектора и его стабильности. Для калибровки использовались различные источники:  ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{65}\text{Zn}$ ,  ${}^{54}\text{Mn}$ ,  ${}^{60}\text{Co}$ ,  ${}^{22}\text{Na}$ ,  ${}^{252}\text{Cf}$ . Нелинейность энергетической шкалы детектора определялась как зависимость отношения измеренной энергии к истинной  $Q/E_{\text{true}}$  от истинной энергии частицы  $E_{\text{true}}$ . Функция отклика детектора была определена по четырем точкам данных: по  ${}^{137}\text{Cs}$  ( $E_\gamma = 0,662$  МэВ),  ${}^{54}\text{Mn}$  ( $E_\gamma = 0,835$  МэВ),  ${}^{65}\text{Zn}$  ( $E_\gamma = 1,115$  МэВ) и  $\gamma$ -линии захвата нейтрона на водороде ( $E_\gamma = 2,224$  МэВ), как показано на рис. 3. Из этого рисунка видно, что кривая хорошо описывается с помощью



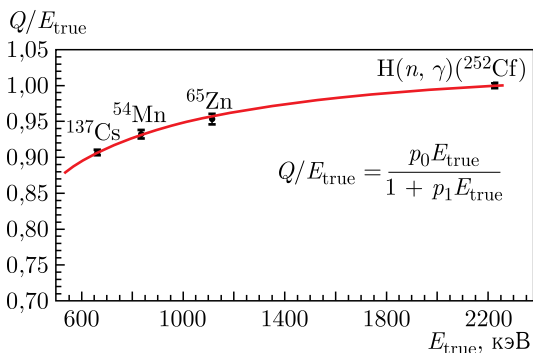


Рис. 3. Эффект квенчинга в ЖОС детектора IDREAM

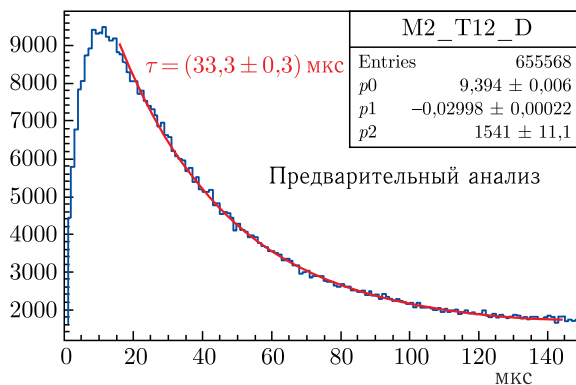


Рис. 4. Время захвата нейтрона в ЖОС детектора IDREAM

аналогичной Бирксу функции [15]

$$f(E_\gamma) = \frac{p_0 E_\gamma}{1 + p_1 E_\gamma}. \quad (3)$$

Дальнейшие исследования с нейтронным источником  $^{252}\text{Cf}$  показали (рис. 4), что время захвата нейтронов составило  $\tau = (33,3 \pm 0,3)$  мкс и соответствует ожидаемому для ЖОС с гадолинием концентрацией 1 г/л.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детектор IDREAM установлен на Калининской АЭС (Удомля, Россия). Весной 2021 г. был произведен монтаж детектора и всех его систем. IDREAM создан как промышленный прототип детектора для мониторинга реактора по потоку антинейтрино из его активной зоны. После уста-

новки и монтажа был осуществлен пуск, начался первый набор данных. Измерены фоновые условия работы детектора в гамма- и нейтронных полях и фон космических мюонов. Осуществляется постоянный мониторинг стабильности детектора с момента запуска. Также произведена оценка времени жизни нейтрона в ЖОС мишени детектора.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00219). Анализ данных проведен с использованием вычислительных ресурсов Объединенного вычислительного кластера НИЦ «Курчатовский институт».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mikaelian L. A.* Neutrino Laboratory in the Atomic Plant // Proc. of the Intern. Conf. "Neutrino-77", June 18–24, 1977. М.: Nauka, 1978. V. 2. P. 383–385.
2. *Borovoi A. A., Mikaelyan L. A.* Possibilities of Practical Applications of Neutrinos // At. Energy. 1978. V. 44, No. 6. P. 508–511.
3. *Korovkin V. A. et al.* Remote Monitoring of Reactor by Means of Neutrino Instrument in Process Room of Rovno Nuclear Power Plant // At. Energy. 1991. V. 71, No. 6. P. 559–561.
4. *Klimov Yu. V., Kopeikin V. I. et al.* // Neutrino Method Remote Measurement of Reactor Power and Power Output // At. Energy. 1994. V. 76. P. 123–127.
5. *Vyrodov V. N., Declais Y., Kerret H. et al.* Precise Measurement of the Cross Section for the Reaction at the Bugey Reactor // JETP Lett. 1995. V. 61, No. 3. P. 163.
6. *Bowden N. S. et al.* Experimental Results from an Antineutrino Detector for Cooperative Monitoring of Nuclear Reactors // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 572. P. 985.
7. *Bernstein A. et al.* Colloquium: Neutrino Detectors as Tools for Nuclear Security // Rev. Mod. Phys. 2020. V. 92. 011003.
8. *Fayans S. A.* Radiative Corrections and Recoil Effects in the Reaction  $\nu + p \rightarrow n + e^+$  at Low Energies // Sov. J. Nucl. Phys. 1985. V. 42. P. 590.
9. *Vogel P.* Analysis of the Antineutrino Capture on Protons // Phys. Rev. D. 1984. V. 29. P. 1918.
10. *Gromov M. B., Lukjanchenko G. A. et al.* The Industrial IDREAM Detector for Neutrino Monitoring of the Operating Modes of Nuclear Reactors // Moscow Univ. Phys. Bull. 2015. V. 70. P. 190–194.
11. *Yamashita M. et al.* Cosmic-Ray-Produced Neutrons at Ground Level: Neutron Production Rate and Flux Distribution // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. P. 3817.
12. *Боровой А. А., Протопопов Х. В.* Фон сцинтилляционных детекторов, связанный с космическим излучением. Препринт ИАЭ-2595. М.: Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова, 1975.
13. *Heusser G.* Low-Radioactivity Background Techniques // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1995. V. 45. P. 543–590.
14. *Alekseev I. et al.* DANSS: Detector of the Reactor Antineutrino Based on Solid Scintillator // J. Instrum. 2016. V. 11. P. 11011.
15. *Birks J. B.* Theory and Practice of Scintillation Counting. New York: Macmillan, 1964.