

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**ИЗУЧЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СВЕТОСОБИРАНИЯ В
ДЕТЕКТОРЕ РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО iDREAM**

Студент _____ А. А. Нуркенов

Научный руководитель,

к.ф.-м.н

_____ Е. А. Литвинович

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Детектор iDREAM	4
1.1 Устройство детектора	4
1.2 Калибровочная система	7
2 Построение кривой неоднородности	9
Заключение	12
Список источников информации	13

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной научно-исследовательской работы является определение неоднородности светособирания детектора iDREAM и построения кривой, отображающей долю собираемого света относительно центра мишени с целью оценки разрешающей способности детектора после слива воды в буферной зоне или верхнего слоя сцинтиллятора.

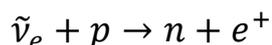
Детектор iDREAM (Industrial Detector of Reactor Antineutrinos for Monitoring) задумывался, как прототип промышленного детектора для реакторного мониторинга с высокой степенью ремонтпригодности и облегчённым монтажом при установке. Ожидается, что развитие технологии прикладного нейтринного мониторинга АЭС будет способствовать повышению эксплуатационной безопасности атомных электростанций. В перспективе нейтринные детекторы могут стать дополнительным инструментом МАГАТЭ для поддержки гарантий нераспространения делящихся материалов.

Детектор iDREAM предназначен для опосредованного мониторинга активной зоны ядерных реакторов и контроля за нераспространением делящихся материалов. В случае возникновения неисправностей в активной зоне ожидается изменение потока нейтрино, что отобразится так же и в данных с детектора.

В ходе исследовательских работ были отдельно слиты объём буферной зоны и верхний слой сцинтиллятора с проведением калибровочных ранов на бета-радиоактивном изотопе кобальта, чтобы определить коэффициент потерь собираемого света внутри всей мишени относительно центра.

1 ДЕТЕКТОР iDREAM

Детектор iDREAM установлен на третьем энергоблоке Калининской атомной электростанции. Процесс регистрации антинейтрино происходит за счёт процесса обратного бета-распада (ОБР), происходящих в объёме жидкого органического сцинтиллятора в результате захвата реакторного электронного антинейтрино:



Порог данной реакции равен 1,806 МэВ. Энергия антинейтрино не регистрируется напрямую из-за его слабого взаимодействия с веществом, но её можно определить по легко измеряемой энергии позитрона:

$$E = E_\nu - 1,8 + 1,02 \text{ МэВ}$$

Отбор происходит по задержанным совпадениям аннигилирующего позитрона и нейтрона, который после замедления и диффузии захватывается растворённым в сцинтилляторе гадолинии, испускающим каскадные гамма-кванты с суммарной энергией, приблизительно, равным 8 МэВ. Среднее время жизни нейтронов в жидком сцинтилляторе с гадолинием составляет порядка 30 микросекунд.

1.1 Устройство детектора

Детектор состоит из двух основных отсеков цилиндрической формы, сваренных из нержавеющей стали толщиной 2 мм, его структура показана на рисунке 6.

Внешний бак (ОТ) состоит из трёх герметично соединённых секций и имеет диаметр 1858 мм и высоту 1620 мм. (рис.1)

Внутренний бак (ИТ), представляющий наибольший интерес, жёстко закреплён на дне наружного бака и имеет диаметр 1254 мм и высоту 1320 мм. Разделён на две части выпуклой прозрачной мембраной из акрила с вертикальной трубкой, чтобы отделить мишень детектора от буферной зоны.

Для повышения эффективности светосбора дно и стенки покрыты светоотражающей плёнкой.^[4]

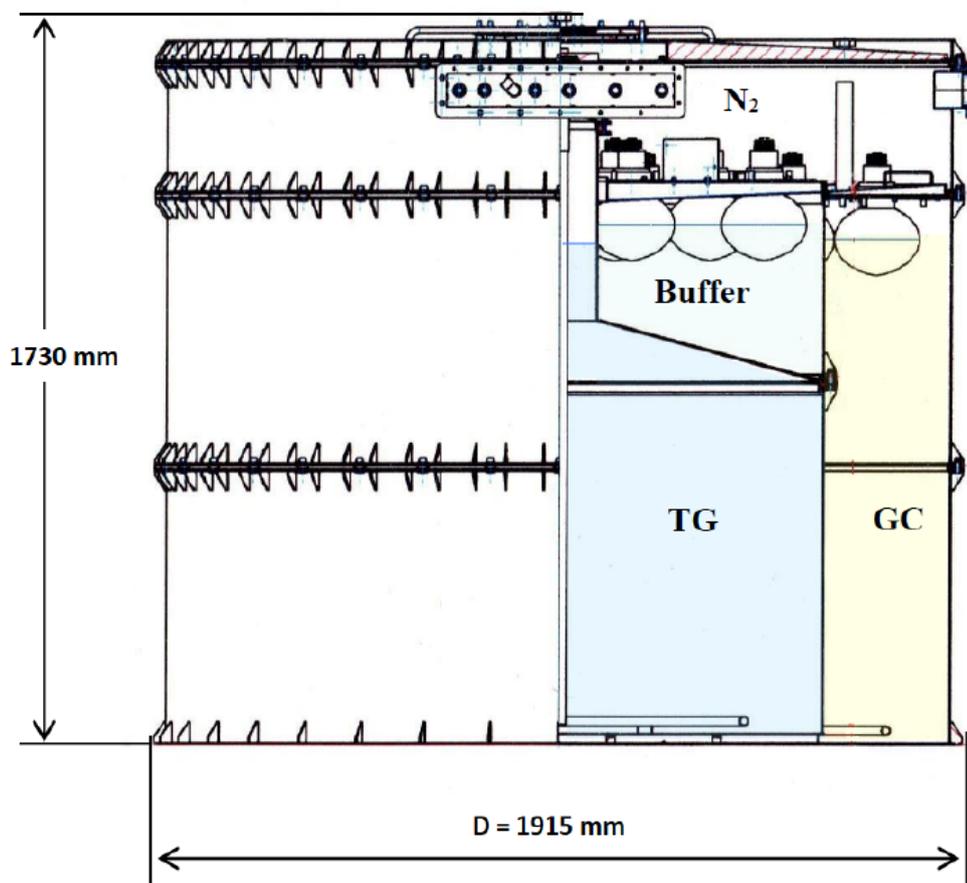


Рисунок 1 – Схематичное отображение детектора iDREAM

Детектор имеет три независимых друг от друга объёма:

- Мишень = $1,1 \text{ м}^3$;
- Буферная зона = $0,4 \text{ м}^3$;
- Гамма-кетчер = $1,7 \text{ м}^3$.

Мишенью для антинейтрино (TG) является жидкий органический сцинтиллятор (ЖОС) с большим содержанием ядер водорода – линейный алкилбензол (ЛАБ) с растворённым в нём гадолинием концентрацией 1 г/л.

Буферная зона (Buffer) служит для защиты мишени от естественной радиоактивности фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и полностью заполнена ЛАБ без примесей.

Гамма-кетчер (GC) – поглотитель гамма-квантов, использующийся для повышения эффективности регистрации гамма-квантов, образовавшихся в мишени за счёт захвата нейтрона на гадолинии, а также для защиты мишени от высокоэнергетичных космических мюонов.

Система считывания сигнала также состоит из трёх отдельных наборов:

1. Сигнал считывается непосредственно в мишени
2. Сигнал считывается с фотоэлектронных умножителей, распределённых по всей площади цилиндрической стенки
3. Сигнал считывается с ФЭУ, расположенных на горизонтальной крышке детектора

В детекторе используются ФЭУ модели Hamamatsu R5912. В общей сложности установлено 28 ФЭУ: 16 во внутреннем баке и 12 во внешнем. Схема расположения ФЭУ на верхней части детектора показана на рисунке 7

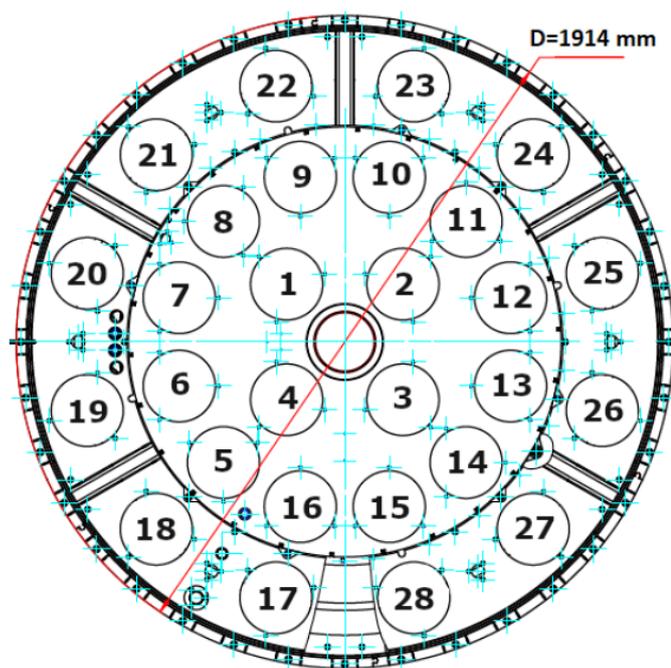


Рисунок 2 – Схема расположения ФЭУ в детекторе iDREAM

Детектор имеет цилиндрическую форму с характерными размерами 1915x1730 мм из свинца и делится на внутреннюю и внешнюю части.

Внешняя состоит из трёх секций скреплённых межфланцевыми уплотнительными кольцами Viton. Внутренняя же часть содержит в себе самую мишень, представляющую собой жидкий органический сцинтилятор массой 1 тонна на основе смеси LAB, содержащую в себе гадолиний в концентрации 10 грамм/литр.

1.2 Калибровочная система

Важно отметить устройство калибровочной установки и принцип проведения. Система устанавливается поверх трубы внутреннего бака и представляет собой установку лифтового типа.

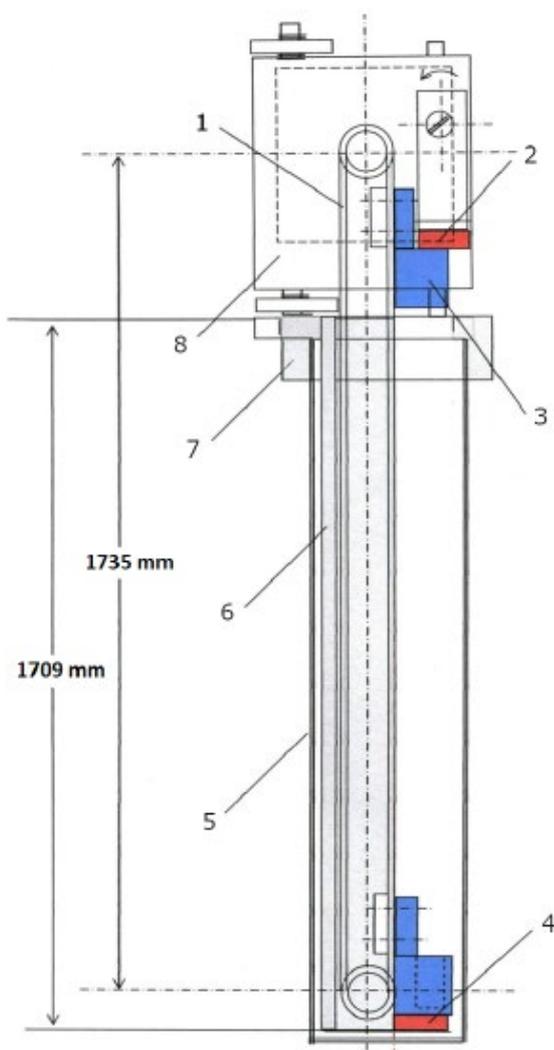


Рисунок 3 – Схема калибровочной системы детектора iDREAM

Под номером 1 указан зубчатый ремень, под номером 2 – верхний переключатель, 3 – шлюз с радиоактивным источником, 4 – нижний переключатель, 5 – сухой канал, размещённый по центру внутри мишени, 6 – удлинение держателя шагового двигателя, 7 – держатель двигателя, 8 – фланец двигателя.

Система позволяет определить положение радиоактивного источника по оси z с точностью до 2 мм. Калибровочный источник, заключенный в челнок, установлен на замкнутом зубчатом ремне, охватывающем два шкива, как показано на рисунке 3.

Система калибровки управляется с панели оператора с установленным специальным программным обеспечением. В отдельном окне программы отображаются дата и время калибровки, режим калибровки и показано положение источника. Программное обеспечение предоставляет два режима калибровки. В обоих режимах интерфейс отображает шкалу калибровочного канала в мм и текущее положение челнока.

В режиме 1 калибровка производится в любой выбранной точке вертикальной оси калибровки. В этом режиме оператор предварительно устанавливает точку калибровки. Положение заданной точки рассчитывается по высоте, начиная с самого нижнего положения челнока.

В режиме 2 осуществляется сканирование детектора в выбранном диапазоне с фиксированным шагом. В этом режиме оператор может установить шаг сканирования в диапазоне от 50 до 150 мм. Максимальная вертикальная длина диапазона калибровки составляет 1200 мм относительно самого нижнего положения челнока, т. е. внутри мембранной трубки.

2 ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

В качестве радиоактивных источников используются ^{137}Cs ($E_\gamma = 0.662$ МэВ), ^{54}Mn ($E_\gamma = 0.835$ МэВ), ^{65}Zn ($E_\gamma = 1.115$ МэВ), ^{60}Co ($E_\gamma = 1.173, 1.332$ МэВ), а также ^{252}Cf в качестве источника быстрых нейтронов.

Для данной работы были взяты данные калибровочного рана на основе ^{60}Co для построения кривой неоднородности.

Для получения зависимости было рассмотрено три случая:

- 1) Детектор в основном состоянии;
- 2) После слива 150 л буферной зоны;
- 3) Буферная зона снова заполнена, слито 100 л из мишени до края мембраны и установления симметричного объёма мишени.

В каждом из этих случаев ^{60}Co устанавливали на высотах:

- 0 мм;
- 100 мм;
- 200 мм;
- 300 мм;
- 351 мм;
- 400 мм;
- 500 мм;
- 600 мм;
- 700 мм;
- 800 мм;
- 900 мм

с центром на уровне 351 мм. Для каждой высоты были получены энергетические спектры, по которым определялось положение пика, путём его фитирования вблизи отметки 2.5 МэВ, что соответствует суммарной энергии двух испускаемых γ -квантов, что показано на рис. 4.

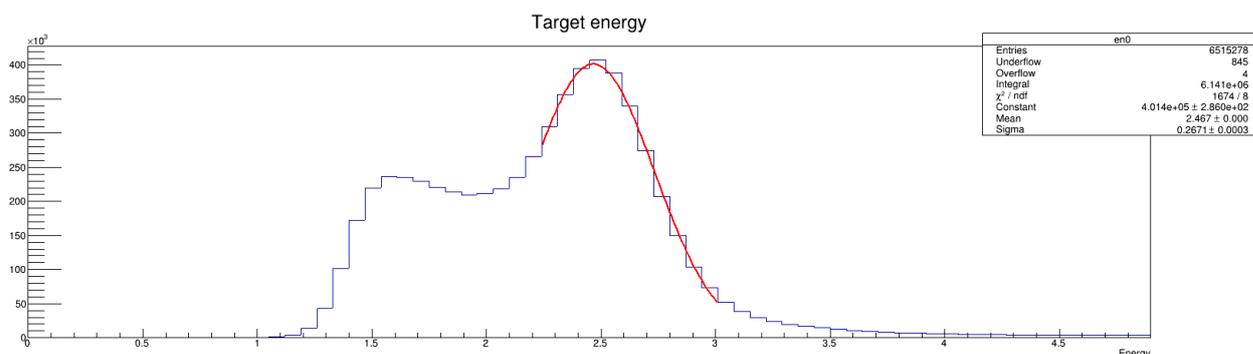


Рисунок 4 – Энергетический спектр ^{60}Co с фитированием пика

Каждое такое значение сравнивалось со значением в центре, получаемое соотношение отображает коэффициент светопоглощения в детекторе для конкретной высоты в конкретной конфигурации детектора. Из этих коэффициентов откладывается кривая неоднородности.

Очевидно, что при изменении объёма сцинтиллятора будут проявляться и отличия в спектре регистрируемого сигнала от радиоактивного источника, что можно пронаблюдать на рисунке 5.

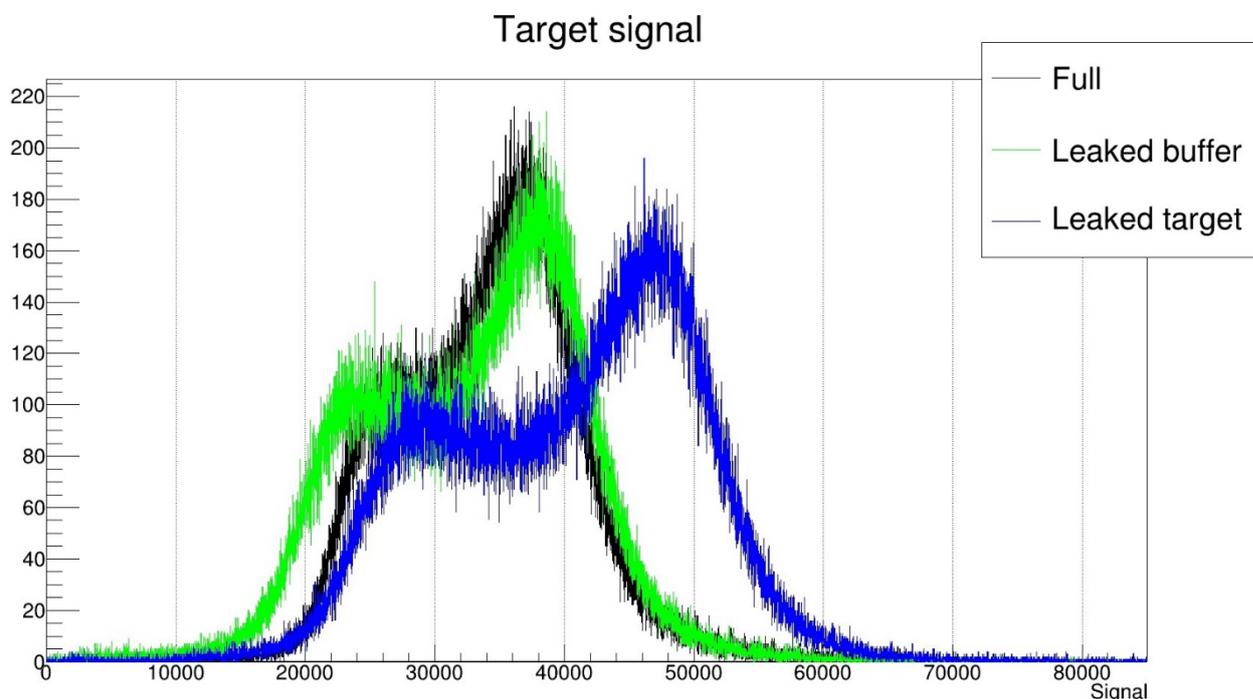


Рисунок 5 – Спектры сигналов ^{60}Co

Гистограмма, выделенная чёрным цветом, соответствует заполненному внутреннему баку детектора, зелёным цветом обозначена гистограмма,

соответствующая, детектору со слитыми 150 литрами LAB из буферной зоны, синий цвет – слито 100 литров сцинтиллятора из мишени

На прилагаемом рисунке (рис.6) показаны кривые неоднородности для различных конфигураций внутреннего объёма детектора. Лучше всего, если кривая будет близка по форме к прямой вблизи:

$$\frac{E_i}{E_{351}} = 1,$$

где i – высота положения источника в мм.

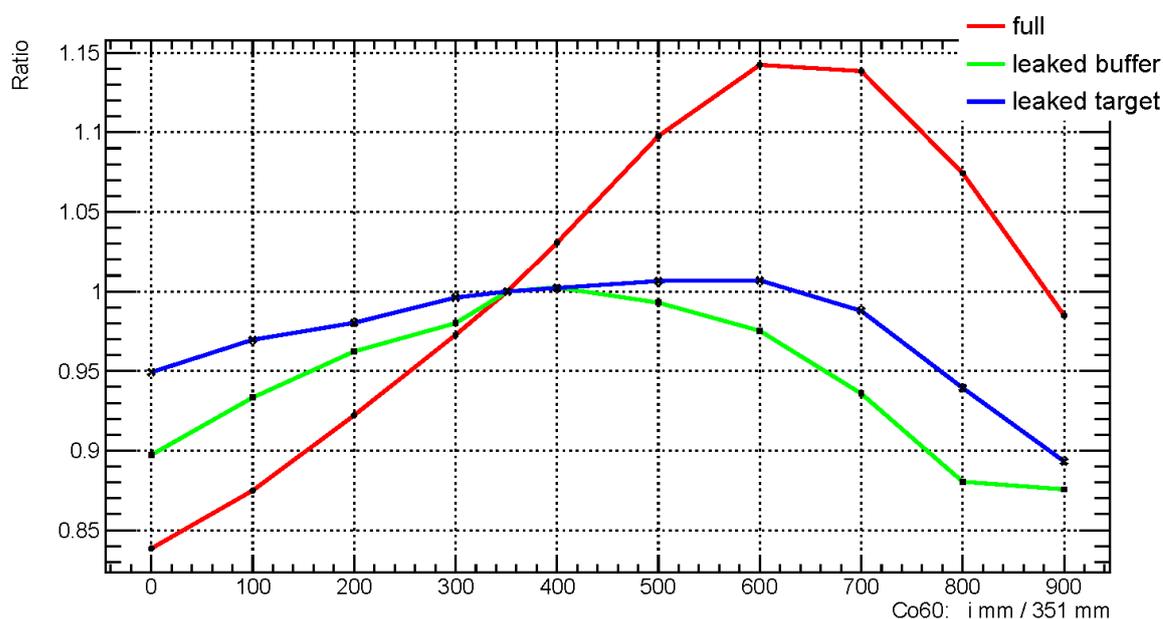


Рисунок 6 – Кривые неоднородности светособирания ФЭУ детектора

Как показано на графике наибольший разброс наблюдается в состоянии с полностью залитыми мишенью и буферной зоны, в отличии от случаев, когда слиты сцинтиллятор или вода в буфере.

Приближение отношения к единице на низких высотах может быть объяснено отсутствием дополнительной помехи распространению света, в виде толщи жидкости в верхних участках внутреннего бака. Тогда как снижение соотношения на высоких положениях источника – отсутствием дополнительного излучения и переизлучения в жидкостном объеме сцинтиллятора и/или воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения научно-исследовательской работы были выполнены следующие поставленные задачи:

1. Получены энергетические спектры ^{60}Co
2. Были определены энергетические пики на каждой высоте для интересующих нас конфигураций внутреннего объёма детектора
3. Были получены соотношения светосбора на основе пиков и построены кривые неоднородности

Полученные соотношения позволяют получить наглядное представление о диапазоне изменения однородности регистрации гамма-квантов фотоэлектронными умножителями детектора iDREAM.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. «iDREAM: industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant»/ [A. Abramov and others]
2. Отчет о НИОКР «Разработка метода нейтринного контроля ядерного реактора: натурный эксперимент на Калининской АЭС» за 6 этап (2021).
3. Отчет о НИОКР «Разработка метода нейтринного контроля ядерного реактора: натурный эксперимент на Калининской АЭС» за 5 этап (2021).
4. « Online monitoring of the Osiris reactor with the Nucifer neutrino detector»/ [G. Boireau and others]