

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»

УДК 539.1.06

**ОТЧЕТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**  
**ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ ДЕТЕКТОРА**  
**РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО IDREAM**

Студент \_\_\_\_\_ А. А. Растимешин  
Научный руководитель,  
к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Е. А. Литвинович

Москва 2020

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
<b>1 Подготовка эксперимента</b>	<b>4</b>
1.1 Применение антинейтринного излучения в атомной энергетике для дистанционного контроля ядерного реактора . . . . .	4
1.2 Устройство детектора iDREAM . . . . .	8
<b>2 Анализ калибровочных данных детектора</b>	<b>13</b>
2.1 Проведение измерений . . . . .	13
2.2 Изучение зависимости энергетического разрешения от энергии гамма-кванта . . . . .	16
2.3 Изучение пространственной неоднородности . . . . .	18
Заключение . . . . .	19
Список использованных источников . . . . .	20

# ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы было изучение спектрометрических характеристик детектора iDREAM: энергетического разрешения и пространственной неоднородности светособирания.

Неоднородность светособирания – это зависимость функции отклика детектора от положения источника излучения. Одними из основных факторов, влияющих на неоднородность светособирания, являются геометрия детектора, расположение ФЭУ, а также отражающие характеристики поверхности мишени.

В ходе предыдущих работ данные спектрометрические характеристики уже изучались. Тем не менее, к настоящему времени конструкция детектора претерпела изменения – с целью уменьшить неоднородность светособирания на дно детектора было установлено светоотражающее покрытие. Помимо этого, в предыдущей работе, по причинам, не зависящим от автора, использовались лишь два источника гамма-излучения – цезий-137 и висмут-207.

В рамках данной работы проведены новые замеры с большим числом источников для уточнения предыдущих результатов.

# 1. ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

## 1.1. ПРИМЕНЕНИЕ АНТИНЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Исследования о возможности применения антинейтринного излучения от ядерных реакторов для дистанционного контроля ядерного реактора начались примерно 50 лет назад в нескольких странах. К настоящему времени накоплен опыт работы по этой теме: с высокой точностью изучены процессы излучения и взаимодействия реакторных антинейтрино, разработаны методы регистрации антинейтринного излучения ядерных реакторов.

На данный момент имеется возможность практического использования антинейтринного излучения для решения таких задач как:

- 1) Выявление несанкционированных режимов работы реактора, в т.ч. с целью наработки оружейного плутония
- 2) Дистанционный контроль энерговыработки ядерных реакторов
- 3) Контроль технического состояния и повышения безопасности эксплуатации ядерных реакторов.
- 4) Мониторинг отработавшего ядерного топлива

Идея использования антинейтринного излучения в ядерной энергетике появилась в Курчатовском институте в 70-ых годах и затем нашла подтверждение в ряде экспериментальных работ, проведенных сотрудниками Курчатовского института на АЭС в Ровно [1] и в Буже (Франция)[2].

Цепная реакция деления, протекающая в активной зоне ядерного реактора, сопровождается излучением электронного антинейтрино в результате процессов бета-распада перегруженных нейтронами осколков деления.

При производстве тепловой энергии 1 МВт × сутки в реакторе ВВЭР-1000 выгорает примерно 1.3 грамма топлива, что соответствует  $3 \times 10^{21}$  делений и излучению  $1.8 \times 10^{22}$  антинейтрино. Плотность потока антинейтрино  $\Phi$  [антинейтрино/см<sup>2</sup>×с] прямо пропорциональна скорости выгорания топлива. Характерная величина плотности потока антинейтрино за биологической защитой реактора, работающего на тепловой мощности 1 ГВт, составляет  $\Phi \sim 10^{13}$  антинейтрино/см<sup>2</sup>×с, что на несколько порядков выше предела чувствительности современных исследовательских детекторов. Таким образом, уровни облучения ядерного топлива и режим работы реактора могут контролироваться детектором дистанционно в режиме постоянного мониторинга по скорости счета антинейтрино.

Ещё больше информации о состоянии ядерного топлива можно получить если измерять энергетический спектр реакторных антинейтрино, поскольку при делении разных изотопов, входящих в состав ядерного топлива, формируются разные энергетические спектры нейтринного излучения. Таким образом, измерение энергетической зависимости плотности потока антинейтрино дает возможность определить состав ядерного топлива, а постоянный мониторинг – динамику выгорания изотопов урана и накопление изотопов плутония, т.е. прямой способ измерения содержания плутония в активной зоне реактора.

Для измерения плотности потока и энергетического спектра реакторных антинейтрино используется реакция обратного бета-распада:



Сечение реакции (1.1) получено теоретически [3] и проверено экспериментально на АЭС в Ровно и Бюже с точностью 1.4%. [4]

Основными компонентами ядерного топлива являются изотопы <sup>235</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>238</sup>U и <sup>241</sup>Pu, суммарный вклад которых в общее число делений составляет около 99.8%. Спектр электронных антинейтрино от ядерного реактора в области энергий, превышающих порог реакции обратного бета-распада 1.8 МэВ, может быть представлен в следующем виде:

$$\rho(E_{\bar{\nu}_e}, t) = \sum_i \alpha_i(t) \rho_i(E_{\bar{\nu}_e}), \quad (1.2)$$

где  $\rho_i(E_{\bar{\nu}_e})$  – спектры электронных антинейтрино продуктов деления  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  (рис. 1.1), а  $\alpha_i(t)$  – доли делений изотопов для момента времени  $t$ . В данном случае считаем  $\sum_i \alpha_i = 1$  для любого момента времени, поскольку вклад в антинейтринное излучение других изотопов пренебрежимо мал. Вклад каждого изотопа меняется по ходу работы реактора (рис 1.2), но их сумма остается неизменной.

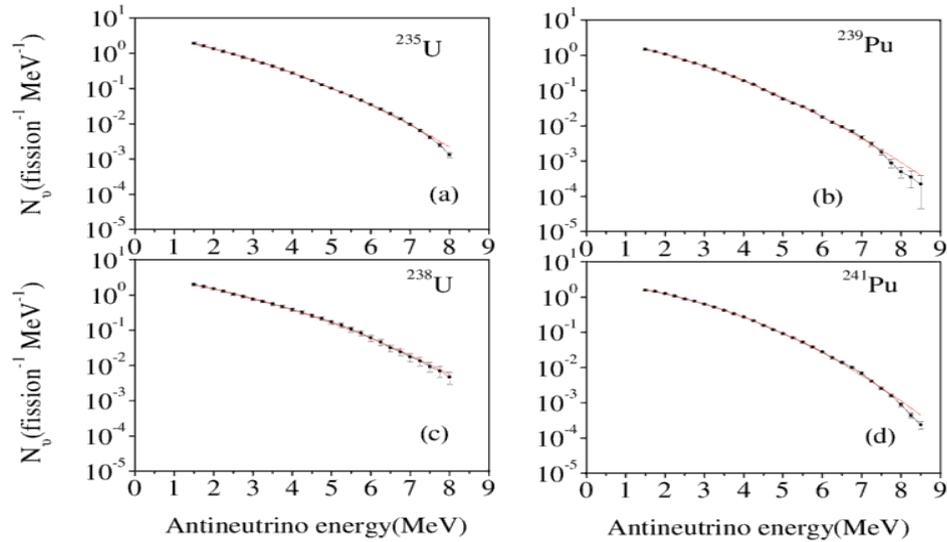


Рисунок 1.1 – Спектры электронных антинейтрино от изотопов  $^{235}\text{U}$ (рис. а),  $^{239}\text{Pu}$ (рис. b),  $^{238}\text{U}$ (рис. с),  $^{241}\text{Pu}$ (рис. d) [5]

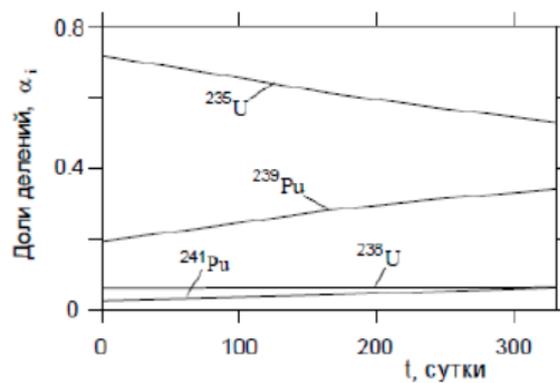


Рисунок 1.2 – Зависимость вклада изотопов  $\alpha_i$  в число делений в течение годовичного цикла работы реактора ВВЭР-1000. Видно, что вклад изотопов меняется в ходе кампании реактора. В среднем вклад составляет 0.56 для  $^{235}\text{U}$ , 0.31 для  $^{239}\text{Pu}$ , 0.06 для  $^{241}\text{Pu}$  и 0.07 для  $^{238}\text{U}$ .

В качестве мишени в детекторе используется водородо–содержащая органическая жидкость (в рамках данной работы – линейный алкилбензол), на основе которой производится жидкий сцинтиллятор. Детектирование антинейтрино осуществляется по фотонам люминесценции, возникающим при поглощении позитрона и нейтрона в сцинтилляторе. Фотоны регистрируются с помощью ФЭУ. Замедление и диффузия нейтрона до его захвата позволяют разделить во времени сигналы от позитрона и нейтрона. Энергия налетающего антинейтрино  $E_{\bar{\nu}_e}$  линейно связана с измеряемой детектором величиной позитронного сигнала, который, в свою очередь, зависит от кинетической энергии позитрона. Необходимо также учесть постоянную поправку от двух аннигиляционных  $\gamma$ -квантов:

$$E_{\text{изм}} = E_{\bar{\nu}_e} - T_{\text{пор}} + 2m_e c^2 = E_{\bar{\nu}_e} - 0.78 \text{ МэВ}, \quad (1.3)$$

где  $T_{\text{пор}} = 1.8 \text{ МэВ}$  – порог реакции. Регистрация нейтронов используется для выделения событий взаимодействия антинейтрино на фоне других событий.

При массе мишени  $\sim 1000 \text{ кг}$  число регистрируемых нейтрино в диапазоне энергий от  $1.8 \text{ МэВ}$  до  $10 \text{ МэВ}$  на расстоянии  $19 \text{ метров}$  от реактора типа ВВЭР-1000 составит примерно  $4000$  в сутки.

Таким образом, с помощью детектора антинейтрино можно с высокой точностью [6] измерять текущую мощность реактора, энерговыработку, анализировать состав ядерного топлива и динамику изменения изотопного состава активной зоны реактора. Особенности данного метода являются:

- 1) Сбор и анализ данных во время работы реактора.
- 2) Отсутствие какого-либо вмешательства в работу реактора.
- 3) Оперативное получение информации.
- 4) Автономность

Предлагаемый метод регистрации реакторных антинейтрино был реализован в детекторе iDREAM.

## 1.2. УСТРОЙСТВО ДЕТЕКТОРА iDREAM

Детектор iDREAM представляет собой жидко-сцинтилляционный детектор с сцинтиллятором на основе линейного алкилбензола – ЛАБ, объемом  $1.1\text{ м}^3$ , предназначенный для регистрации реакторных антинейтрино по реакции обратного бета-распада:



Корпус детектора состоит из двух коаксиальных баков из листов нержавеющей стали толщиной 2 мм. Баки закрыты общей герметичной крышкой. Внутренний бак имеет диаметр 1254 мм и высоту 1320 мм. Дно бака во избежание образования «хлопунов», нарушающих рабочую геометрию детектора, усилено решеткой из стальных брусков толщиной 20 мм. Внутренний бак жестко закреплен на дне наружного бака и разделен по высоте на две части выпуклой прозрачной мембраной из акрила с вертикальной трубкой по центральной оси диаметром 180 мм и высотой 470 мм. Мембрана уплотнена между фланцами нижней и верхней частей бака кольцевыми уплотнителями из витона. Снаружи узел уплотнения мембраны закрыт светонепроницаемым кольцеобразным экраном. Пространство под мембраной объемом  $1.1\text{ м}^3$  изолировано от общего объема детектора, заполняется ЖОС и является мишенью детектора. Пространство объемом  $0.5\text{ м}^3$  над мембраной заполняется чистым ЛАБ и является буфером. Внутренний бак закрыт крышкой с круглыми окнами – центральное окно диаметром 200 мм для вывода трубки мембраны и 16 окон диаметром 210 мм для установки 16 узлов ФЭУ Hamamatsu R5912, просматривающих мишень через прозрачные буфер и мембрану. Фотокатоды ФЭУ погружены в ЛАБ буфера. Схемы детектора iDREAM изображены на рисунках 1.3 и 1.4.



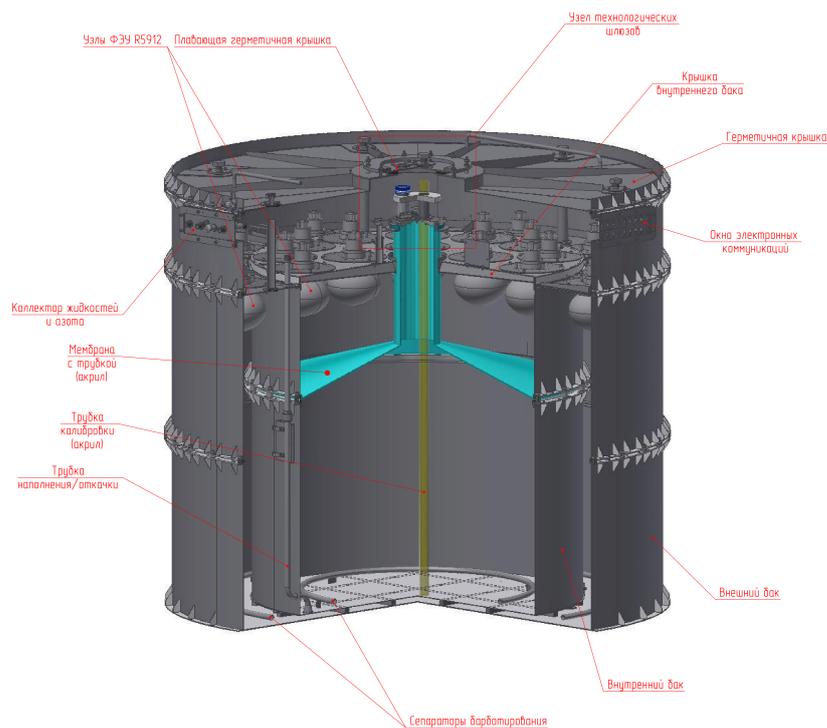


Рисунок 1.4 – Общий вид детектора iDREAM

Наружный бак имеет диаметр 1858 мм и конструктивно состоит из трех секций, герметично соединенных с помощью межфланцевых кольцевых уплотнителей из витона. Высота наружного бака без крышки составляет 1620 мм. Кольцевой зазор между стенками внутреннего и наружного баков на глубину 1220 мм заполняется жидким органическим сцинтиллятором и просматривается двенадцатью ФЭУ. Для калибровки кольцевого объема в каждом сегменте симметрично между узлами ФЭУ установлен узел с вертикальной трубкой из акрил, аналогичный узлу калибровки на крышке трубки мембраны внутреннего бака. Сегменты крепятся к держателям на внутренней стенке 2-й секции наружного бака и опираются на опорное кольцо верхней части внутреннего бака. Функционально кольцевой зазор является частью активной защиты детектора от космического излучения, а также повышает эффективность детектора за счет регистрации продуктов реакции обратного бета-распада, вышедших за пределы мишени.

Для калибровки кольцевого объема детектора в наружном фланце герметичной крышки баков над калибровочными узлами сегментов выполнено шесть отверстий со съемными герметичными заглушками для установки калибратора. Возможный эксцентриситет отверстий в крышке и в

сегментах компенсируется установкой в узлах калибровки сегментов воронкообразных направляющих для капсулы с радиоактивным источником калибратора.

Трубка мембраны выходит за пределы высоты внутреннего бака. Ее объем рассчитан с учетом коэффициента теплового расширения ЛАБ так, чтобы при рабочей температуре 20 °С уровень ЖОС мишени объемом 1.1 м<sup>3</sup> находился на середине высоты трубки, а при колебании температуры в пределах (20±5)°С не превысил высоту трубки и не опустился ниже ее основания. Чтобы предотвратить переливание сцинтиллятора в случае превышения предельной температуры +25°С трубка закрыта герметичной крышкой, имеющей герметичное соединение через коллектор рабочих жидкостей и азота с внешним ресивером. Объем ресивера, также через коллектор, соединен со свободным объемом детектора под герметичной крышкой баков. В крышке трубки мембраны сделаны три отверстия для герметичного ввода в мишень необходимого технологического оборудования. В двух из них уплотнены доходящие до дна внутреннего бака вертикальные трубки из акрила диаметром 36 мм с глухим нижним концом. В одной трубке установлен датчик уровня сцинтиллятора мишени в трубке мембраны по давлению столба сцинтиллятора, совмещенный с датчиком температуры сцинтиллятора. Другая трубка используется для калибровки детектора с помощью калибратора и стандартных радиоактивных источников. Третье отверстие предусмотрено для организации еще одного герметичного ввода в мишень.

В качестве мишени для антинейтрино используется богатая водородом жидкая среда – линейный алкилбензол (ЛАБ) с добавлением РРО – 2.5 дифенилоксазол (C<sub>15</sub> H<sub>11</sub> ON) и bis-MSB – 1.4-бис(2-метилстирил)бензол (C<sub>24</sub>H<sub>22</sub>) в концентрации 3 г/л и 0.02 г/л соответственно [7]. Также в качестве добавки используется гадолиний в концентрации 1 г/л для регистрации нейтронов, поскольку гадолиний обладает большим сечением захвата нейтронов ( $\sigma_{157} \approx 254000$  бн для <sup>157</sup>Gd,  $\sigma_{155} \approx 60900$  бн для <sup>155</sup>Gd,  $\sigma \approx 49000$  бн для природной смеси)

В детекторе iDREAM используются рабочие жидкости трех видов.

- 1) Чистый ЛАБ – заливается в буфер
- 2) ЛАБ + РРО + bis-MSB – заливается в кольцо

3) ЛАБ + PPO + bis-MSB + Gd – заливается в мишень

Детектор укомплектован 28 ФЭУ Hamamatsu R5912, схема расположения которых представлена на рисунке 1.5. ФЭУ с 1-ого по 16-й просматривают центральный объем (мишень) детектора, а с 17-ого по 28-ой – внешнее кольцо (гамма-кэтчер), которое полностью светоизолировано от мишени. [8] [9]

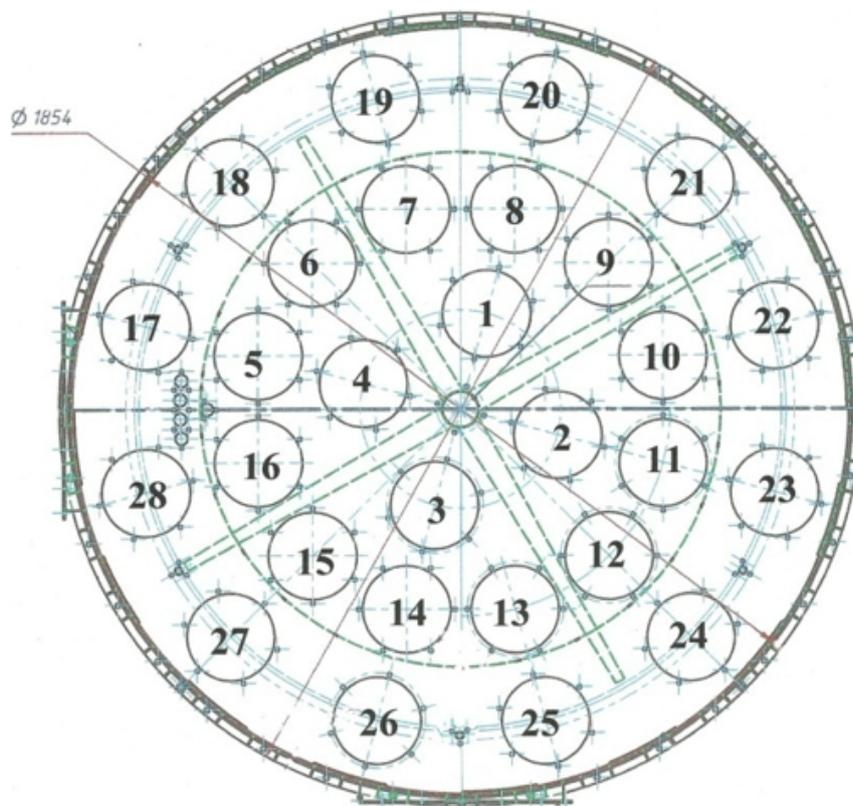


Рисунок 1.5 – Расположение ФЭУ в детекторе (вид сверху)

Следствием такой конструкции, выбранной из требований, предъявляемых к промышленному детектору (в их числе: простота, компактность, невысокая стоимость), является высокая неоднородность светособирания. Для её компенсации в конструкцию между ФЭУ и мишенью был введен прозрачный буфер, выравнивающий сбор фотонов люминесценции. Тем не менее, буфер не подавляет неоднородность светособирания полностью. Для ещё большей компенсации используется пленка из люмира, которой покрывается дно и стенки внутреннего бака.

# 2. АНАЛИЗ КАЛИБРОВОЧНЫХ ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА

## 2.1. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

В ходе калибровки использовались следующие источники гамма-квантов:  $^{207}\text{Bi}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{22}\text{Na}$ , схемы распада которых изображены на рисунках 2.1, 2.2, 2.3, 2.4. Источники помещались в герметичный контейнер из нержавеющей стали. Детектор имеет вертикальный канал для ввода источников излучения

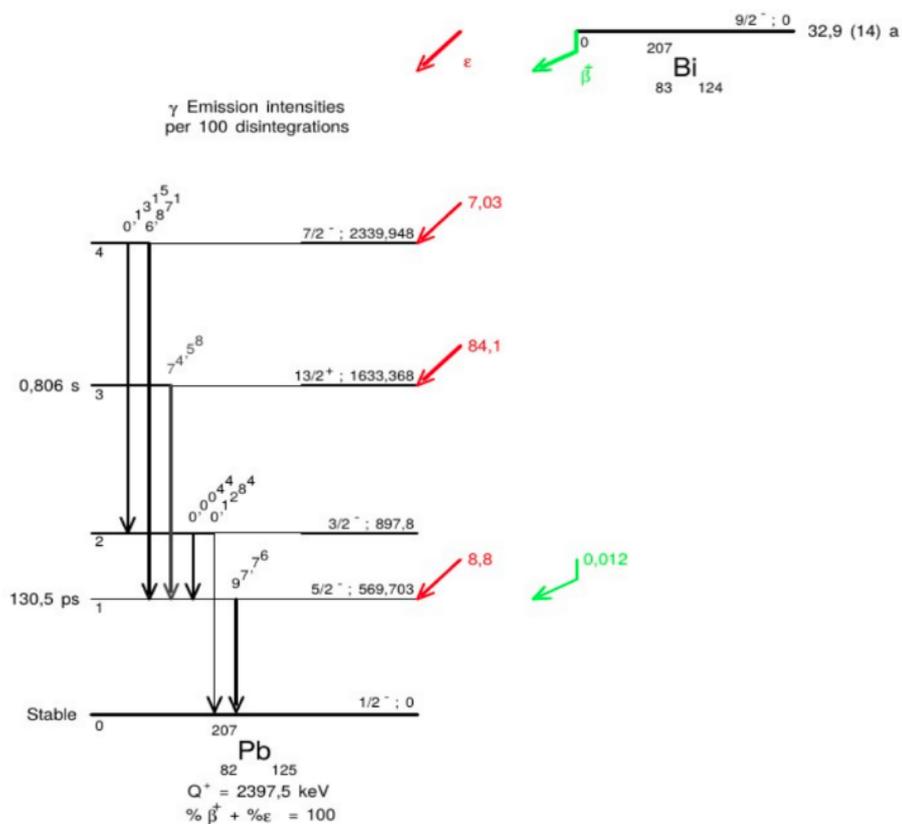


Рисунок 2.1 – Схема распада  $^{207}\text{Bi}$



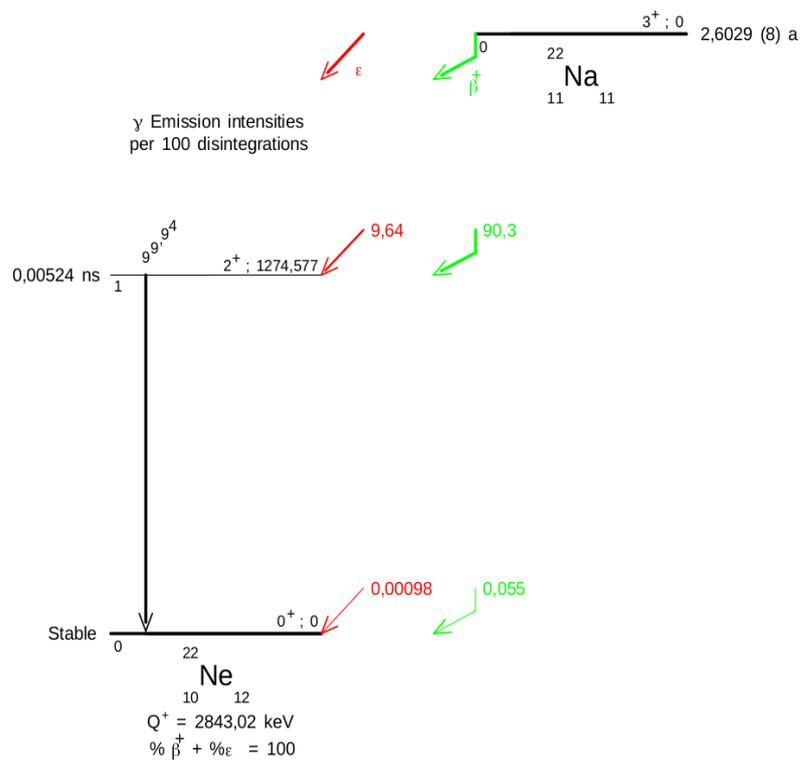
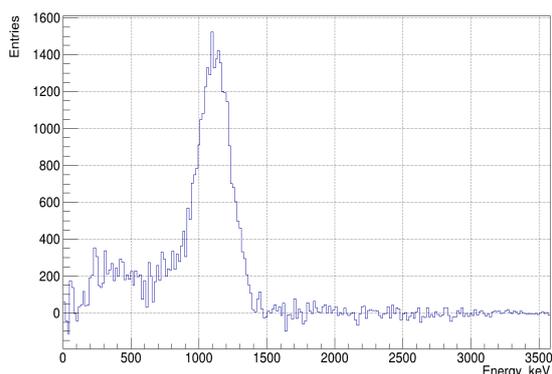


Рисунок 2.4 – Схема распада  $^{22}\text{Na}$

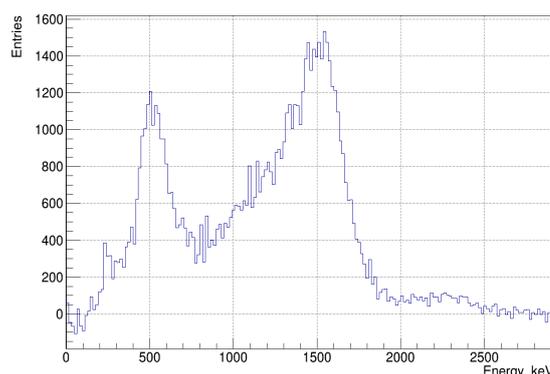
При проведении измерений источник находился в центре мишени. Замеры спектра источника проводились на протяжении 100 секунд. Также производились измерения спектра фона без источника, аналогично, на протяжении 100 секунд. Результаты измерений записывались в ROOT файлы.

## 2.2. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ОТ ЭНЕРГИИ ГАММА-КВАНТА

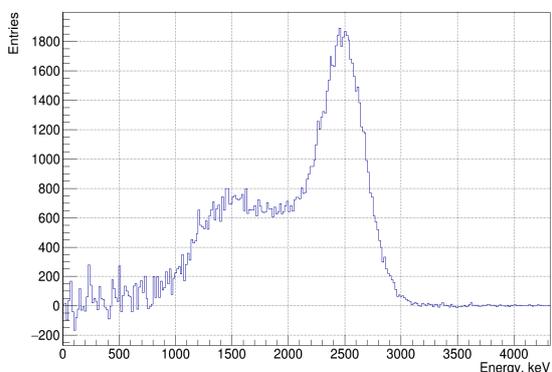
После обработки данных и вычисления зарегистрированных энергий были построены спектры излучений всех источников. (рис 2.5)



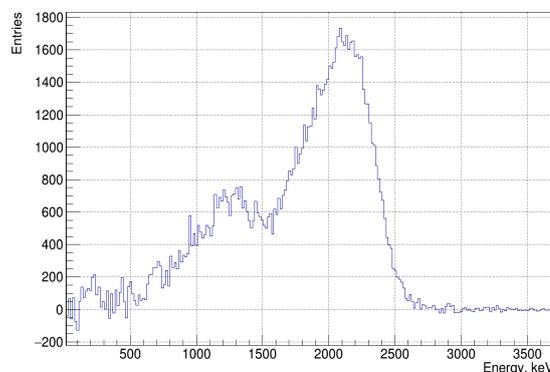
(а) Zn-65



(б) Bi-207



(в) Co-60



(г) Na-22

Рисунок 2.5 – Энергетические спектры излучения источников

По замеренным энергиям и среднеквадратическим отклонениям была построена зависимость  $\delta(E)$  и профитирована функцией вида  $\delta(E_\gamma) = a \cdot \frac{1}{\sqrt{E_\gamma}}$ , где  $a$  – коэффициент пропорциональности,  $E$  – зарегистрированная энергия гамма-кванта(-ов) (рис. 2.6).

В результате фитирования получено значение коэффициента  $a$

$$\langle a \rangle = 395.04 \sqrt{\text{кэВ}} \cdot \%$$

С учетом погрешности:

$$a = (3.95 \pm 0.05) \cdot 10^2 \sqrt{\text{кэВ}} \cdot \% = (12.50 \pm 0.15) \sqrt{\text{МэВ}} \cdot \%,$$

что в пределах погрешности примерно равно значению  $a$ , полученному в предыдущей работе. Напомним, что значение коэффициента  $a$ , полученное в предыдущей работе, составило:

$$a = (12.8 \pm 0.5) \sqrt{\text{МэВ}} \cdot \%$$

Таким образом, зависимость  $\delta(E)$  имеет вид:

$$\delta(E_\gamma) = 395 \cdot \frac{1}{\sqrt{E_\gamma(\text{кэВ})}} (\%)$$

Согласно рис. 2.6, энергетическое разрешение iDREAM ( $\sigma/E$ ) составляет  $(12.50 \pm 0.15)\%$  при энергии 1 МэВ (FWHM =  $(30.0 \pm 0.4)\%$ ).

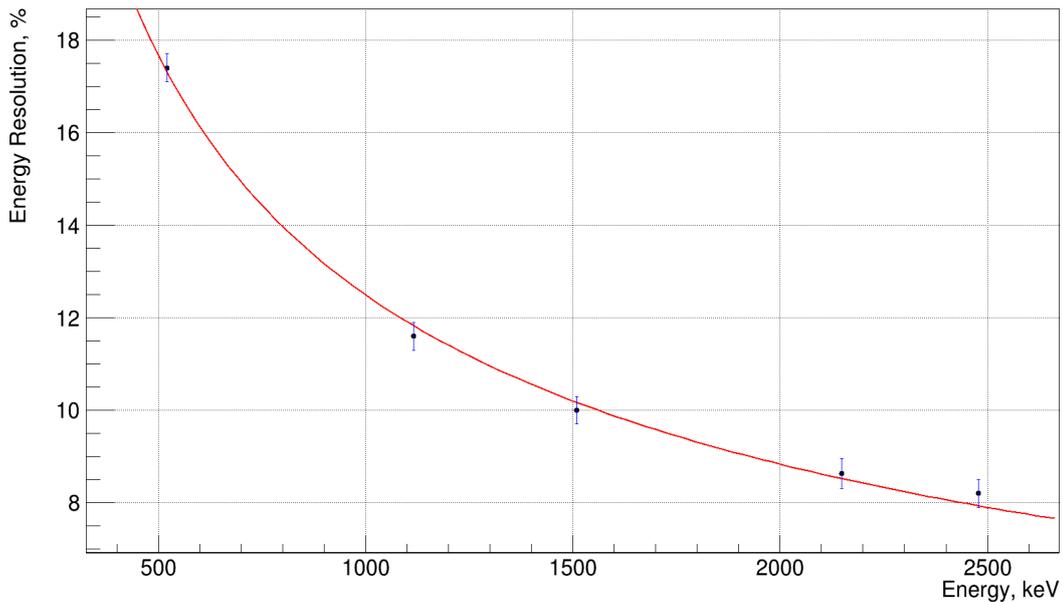


Рисунок 2.6 – Зависимость относительного энергетического разрешения детектора от энергии частицы

## 2.3. ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Предыдущие измерения проводились без светоотражающего покрытия на дне детектора iDREAM, была получена неоднородность относительно геометрического центра детектора (-15%, +22%).

После установки светоотражающего покрытия на дно детектора появилась необходимость в новых калибровках для вычисления нового значения пространственной неоднородности детектора. Это было сделано с помощью радиоактивного источника Zn-65. Данный источник был выбран поскольку его излучение представляет собой одиночный гамма-квант энергией 1115 кэВ, что является наибольшей энергией одиночного гамма-кванта из четырех доступных нам источников.

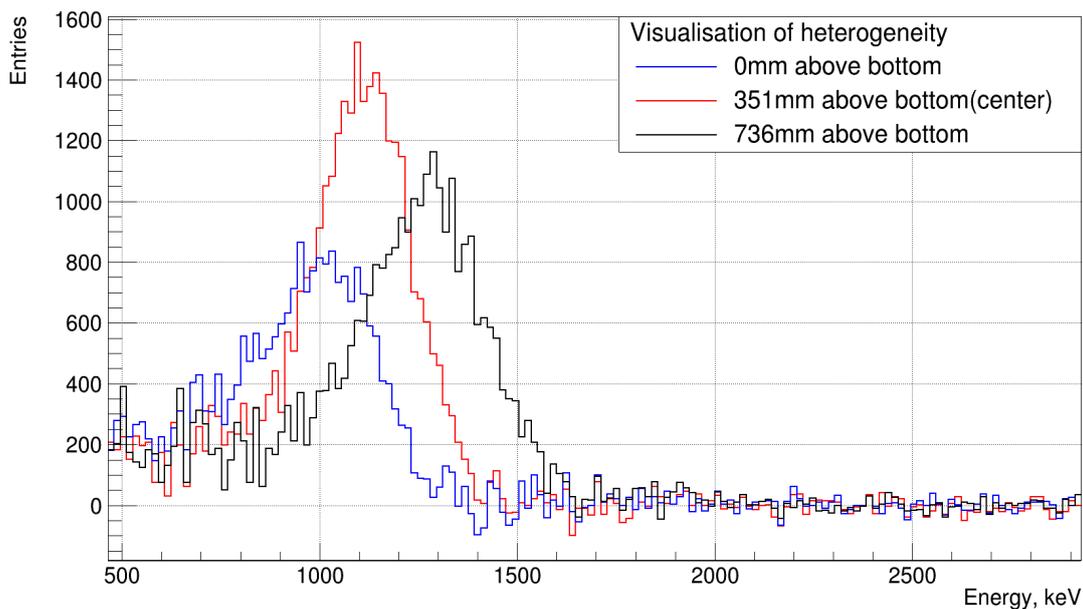


Рисунок 2.7 – Демонстрация неоднородности светособирания детектора iDREAM. Спектры источника Zn-65 на дне (синий), в центре (красный) и под крышкой мишени детектора (черный)

Энергии, полученные в ходе измерений спектра на дне, в центре и подверху мишени, составили  $(1017.0 \pm 1.2)$  кэВ,  $(1114.2 \pm 1.1)$  кэВ и  $(1278.6 \pm 0.8)$  кэВ соответственно. Зная эти энергии, находим новое значение неоднородности светособирания: (-9.5 %, +15%)

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы получены следующие основные результаты:

- Проведена калибровка детектора iDREAM источниками гамма-квантов  $^{207}\text{Bi}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{22}\text{Na}$
- Исследована зависимость относительного энергетического разрешения от регистрируемой энергии для детектора iDREAM, найдена функция, описывающая данную зависимость:

$$\delta(E_\gamma) = 395 \cdot \frac{1}{\sqrt{E_\gamma(\text{кэВ})}} (\%)$$

- Вычислено энергетическое разрешение на 1 МэВ выделившейся в детекторе энергии:

$$(\sigma/E) = (12.50 \pm 0.15) \%, \text{ FWHM} = (30.0 \pm 0.4)\%$$

Данный результат в пределах погрешностей совпадает со значением, полученным в предыдущей работе.

- На основе калибровочных данных получено новое значение неоднородности светособирания детектора относительно геометрического центра мишени, которое составило  $(-9.5\%, +15\%)$  – после установки светоотражающего покрытия на дно детектора неоднородность улучшилась в полтора раза.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерение энерговыработки энергетического реактора методом регистрации нейтрино / В. Коровкин [и др.] // Атомная энергия, Т.65, вып.3. — 1988. — сент.
2. The Bugey-3 neutrino detector / M. Abbes [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 1996. — т. 374. — с. 164—187.
3. *Strumia A., Vissani F.* Precise quasielastic neutrino/nucleon cross-section // Phys. Lett. B. — 2003. — т. 564. — с. 42—54. — arXiv: astro-ph/0302055.
4. Study of reactor anti-neutrino interaction with proton at Bugey nuclear power plant / Y. Declais [и др.] // Phys. Lett. B. — 1994. — т. 338. — с. 383—389.
5. Improved calculation of the energy release in neutron-induced fission / X. Ma [и др.] // Physical Review C. — 2013. — июль. — т. 88.
6. *Копейкин В., Микаэлян Л.* Анализ зависимости числа событий в реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$  // Препринт ИАЭ-6419/2. — 2006. — т. 9.
7. Жидкий сцинтиллятор на основе линейного алкилбензола / И. Немченко [и др.] // Письма в ЭЧАЯ. — 2011. — т. 9. — с. 218—227.
8. Промышленный детектор iDREAM для мониторинга режимов работы атомных реакторов нейтринным методом / М. Б. Громов [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — М., 2015. — № 3. — ISSN 0579-9392.
9. Техническое описание опытного образца детектора iDREAM / М. Б. Громов [и др.]. — 2016.