

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 ФОНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА
РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО IDREAM В УСЛОВИЯХ
3-ГО ЭНЕРГОБЛОКА КАЛИНИНСКОЙ АЭС

Студент _____ А. А. Растимешин

Научный руководитель,
к.ф.-м.н. _____ Е. А. Литвинович

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Введение | 3 |
| 1 Подготовка эксперимента | 5 |
| 1.1 Применение антинейтринного излучения в атомной энергетике для дистанционного контроля ядерного реактора | 5 |
| 1.2 Устройство детектора iDREAM | 9 |
| 2 Анализ фоновых событий | 15 |
| 2.1 Калибровка детектора | 15 |
| 2.2 Определение скорости счета детектора | 16 |
| 2.3 Определение времени жизни нейтронов в мишени | 20 |
| Заключение | 23 |
| Список использованных источников | 24 |

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы было изучение зависимости скорости счета детектора iDREAM от энергии порога и вычисление времени жизни¹ нейтронов в мишени детектора.

В настоящий момент детектор реакторных антинейтрино iDREAM располагается на третьем энергоблоке Калининской АЭС, реактор которого остановлен на перезагрузку топлива. Детектор iDREAM находится в полностью рабочем состоянии, ведётся ежедневный набор статистики фоновых событий при остановленном реакторе.

В отличие от испытаний в условиях в лаборатории Курчатовского института, детектор помещен в защиту от гамма- и нейтронного излучений. Также дополнительную защиту от космического излучения даёт корпус атомного энергоблока. Оценку вклада в подавление фона пассивной защиты детектора можно сделать зная зависимость скорости счёта детектором фоновых событий от энергии порога регистрации событий.

Анализ фонового излучения позволяет получить данные о состоянии мишени детектора iDREAM. Одним из её компонентов является гадолиний, который добавляется для улучшения регистрации нейтронов, образующихся в результате реакции обратного бета-распада ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$), по которой детектор и будет регистрировать реакторные антинейтрино. При концентрации гадолиния в 1 г/л в мишени детектора iDREAM ожидается соотношение количества захватов нейтронов на водороде к количеству захватов нейтронов на гадолинии 20:80. Однако, последние наблюдения не совпадают с ожидаемым значением, наблюдается "смещение" соотношения в сторону захватов на водороде (в центре мишени – 33:67).

Помимо вычисления соотношения захватов на водороде и гадолинии существует еще один способ проверки состояния гадолиния в мишени: измерение времени жизни нейтрона до захвата ядром. В случае если концентрация гадолиния составляет 1 г/л время жизни нейтрона должно составлять

¹Здесь и далее под временем жизни нейтрона подразумевается время до захвата нейтрона ядром

30 мкс, если гадолиний полностью отсутствует – 150 мкс.

Из-за временного отсутствия источника нейтронов ^{252}Cf , традиционно используемого для вычисления времени жизни нейтрона, для решения этой задачи было предложено использовать космическое излучение, а именно высокоэнергетические мюоны, которые, проходя через мишень, порождают нейтроны, называемые космогенными нейтронами.

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 3×10^{21} делений и излучению 1.8×10^{22} антинейтрино. Плотность потока антинейтрино Φ [антинейтрино/см²×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/см²×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 замерять 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 ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²³⁸U и ²⁴¹Pu, 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}U , ^{239}Pu , ^{238}U , ^{241}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.

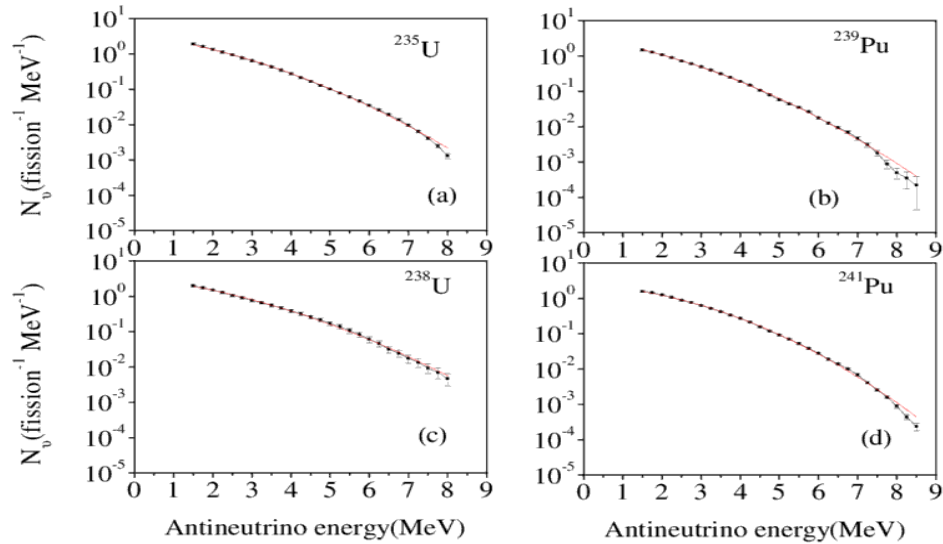


Рисунок 1.1 – Спектры электронных антинейтрино от изотопов ^{235}U (рис. а), ^{239}Pu (рис. b), ^{238}U (рис. с), ^{241}Pu (рис. d) [5]

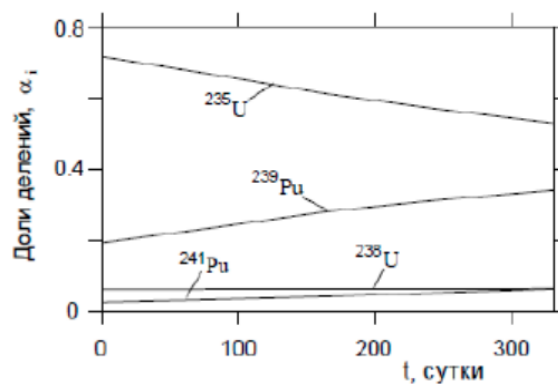


Рисунок 1.2 – Зависимость вклада изотопов α_i в число делений в течение годового цикла работы реактора ВВЭР-1000. Видно, что вклад изотопов меняется в ходе кампании реактора. В среднем вклад составляет 0.56 для ^{235}U , 0.31 для ^{239}Pu , 0.06 для ^{241}Pu и 0.07 для ^{238}U .

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 γ -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 МэВ до 10 МэВ на расстоянии 19 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 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 м^3 изолировано от общего объема детектора, заполняется ЖОС и является мишенью детектора. Пространство объемом 0.5 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.

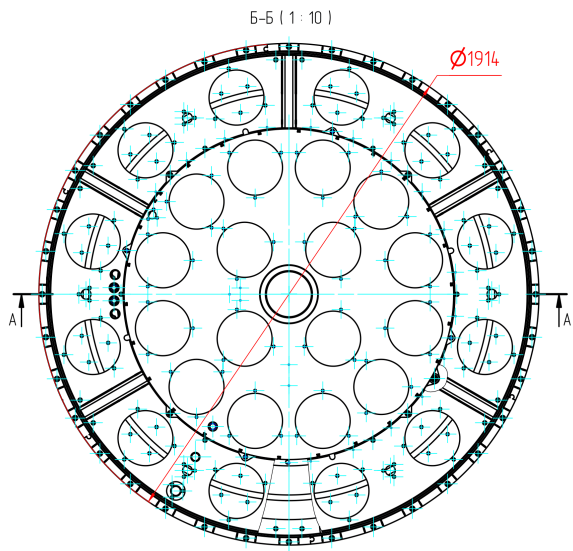
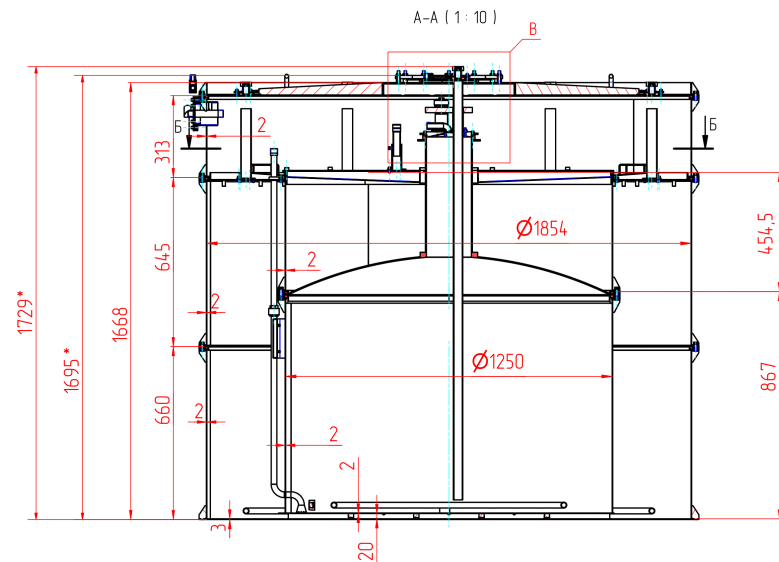


Рисунок 1.3 – Чертеж детектора iDREAM

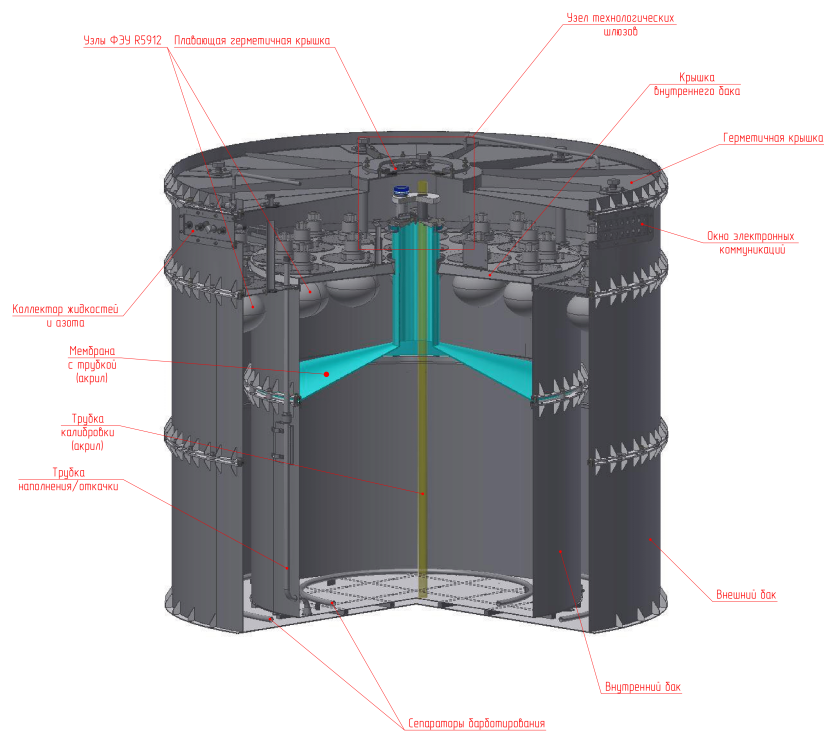


Рисунок 1.4 – Общий вид детектора iDREAM

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 м³ 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 (C₁₅ H₁₁ ON) и bis-MSB – 1.4-бис(2-метилстирил)бензол (C₂₄H₂₂) 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 ¹⁵⁷Gd, $\sigma_{155} \approx 60900$ бн для ¹⁵⁵Gd, $\sigma \approx 49000$ 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]

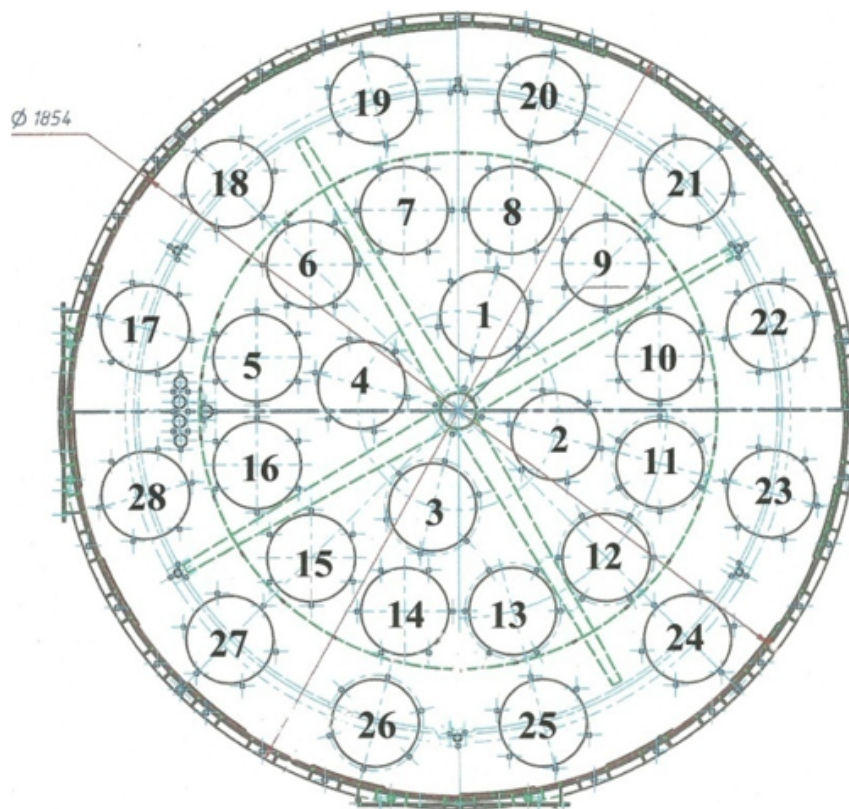


Рисунок 1.5 – Расположение ФЭУ в детекторе (вид сверху)

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.

В настоящее время детектор располагается на третьем энергоблоке Калининской АЭС под реактором на расстоянии 19 метров под активной зоной. Детектор помещен в пассивную защиту, предназначенную для подавления нейтронного излучения и гамма-излучения. Она состоит из 80 прямоугольных чугунных блоков, располагаемых над и под детектором. По бокам располагается защита от нейтронного излучения, состоящая из прямоугольных блоков бор-полиэтилена.

2. АНАЛИЗ ФОНОВЫХ СОБЫТИЙ

2.1. КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА

Перед началом анализа фоновых событий была проведена калибровка с использованием источника гамма-квантов ^{60}Co (1173 кэВ и 1332 кэВ), схема распада которого представлена на рисунке 2.1, а энергетический спектр на рисунке 2.2. По результатам этой калибровки была восстановлена энергетическая шкала детектора.

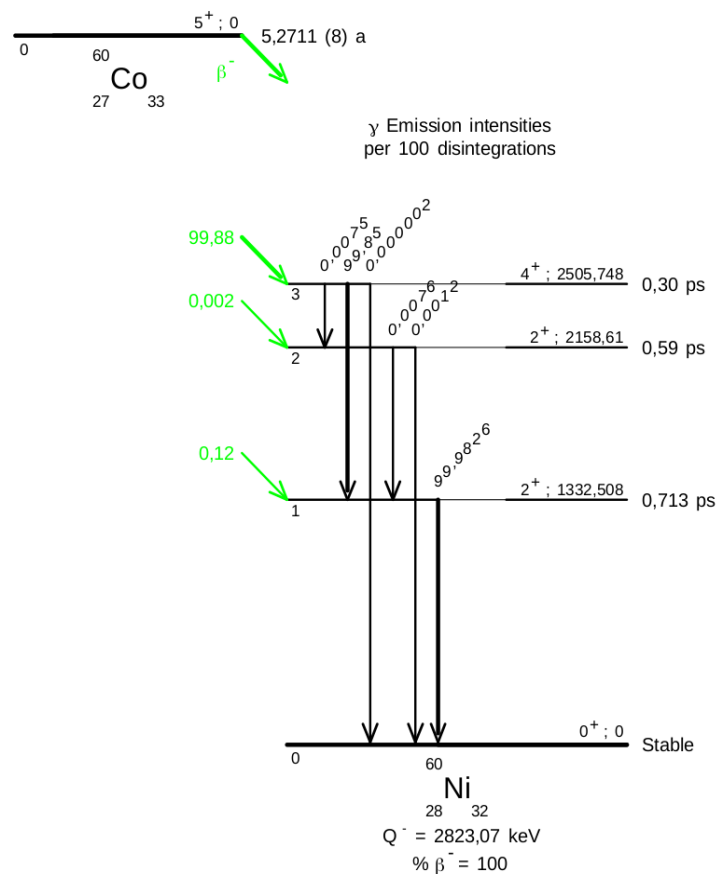


Рисунок 2.1 – Схема распада ^{60}Co

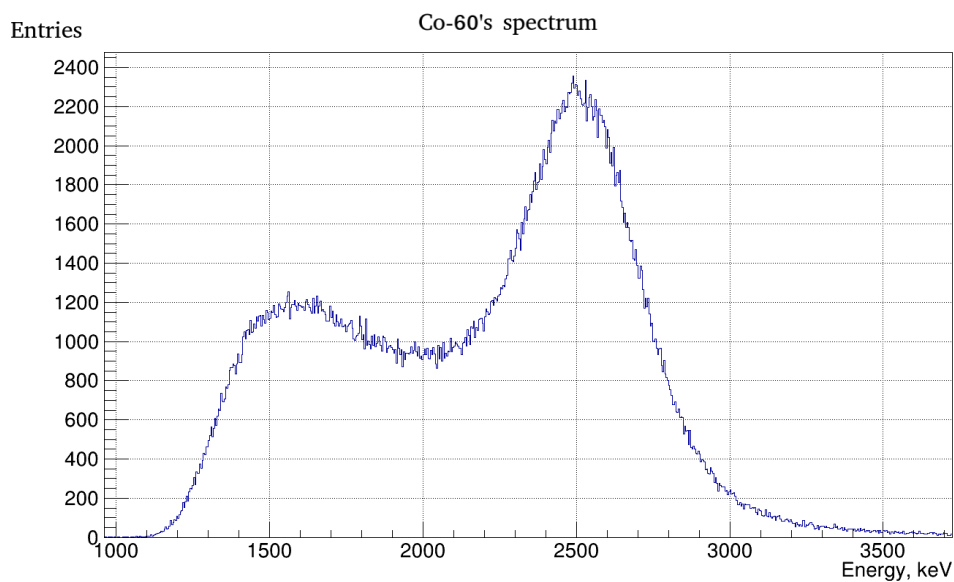


Рисунок 2.2 – Энергетический спектр ^{60}Co

2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СЧЕТА ДЕТЕКТОРА

Для исследования зависимости скорости счета детектора от энергетического порога регистрируемых событий была набрана 50-минутная статистика. По ней построен спектр фоновых событий (рис. 2.3)

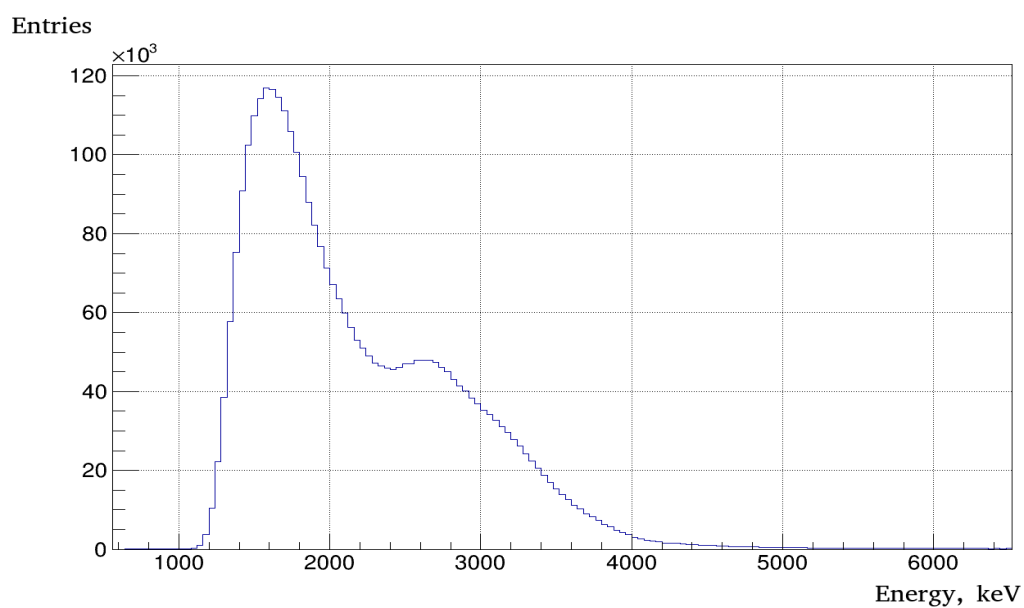


Рисунок 2.3 – Энергетический спектр фона

Используя данный спектр построим график зависимости скорости счета детектора от энергии порога. Для этого берем интеграл по гистограмме начиная от i -го события и заканчивая либо последним бином в гистограмме, причем « i » пробегает значения от нуля до номера последнего бина. Каждый результат интегрирования нормируется на время набора данных (в данном случае это 50 минут = 3000 секунд) и ему в соответствие ставится энергия, соответствующая i -ому бину. Таким образом, получается зависимость скорости счета детектора от энергии порога.

Поскольку на эксперименте, как правило, отсекаются события с энергией выше 10 МэВ (реакторные антинейтрино с энергией выше 10 МэВ практически отсутствуют), то в качестве верхнего предела интегрирования можно выбрать именно эту энергию.

Данные для исследования скорости были набраны как на Калининской АЭС, так и в Курчатовском институте. Для их сравнения графики были нанесены на одну картинку (рис. 2.4, рис. 2.5, без ограничения на 10 МэВ). Также построены аналогичные графики с ограничением на 10 МэВ (рис. 2.6., рис. 2.7)

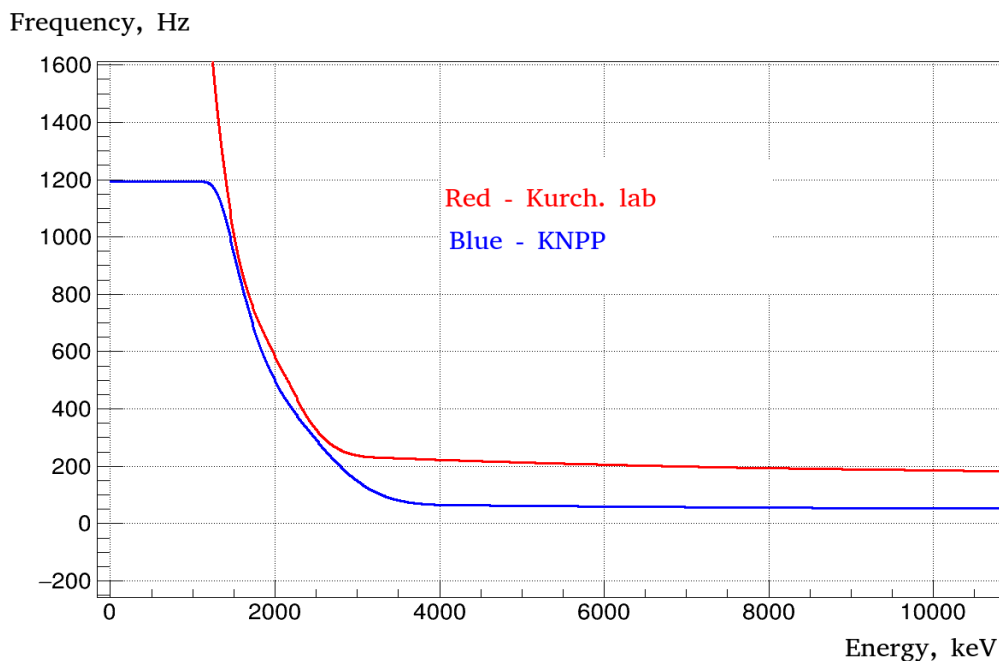


Рисунок 2.4 – Зависимость скорости счета от энергии порога

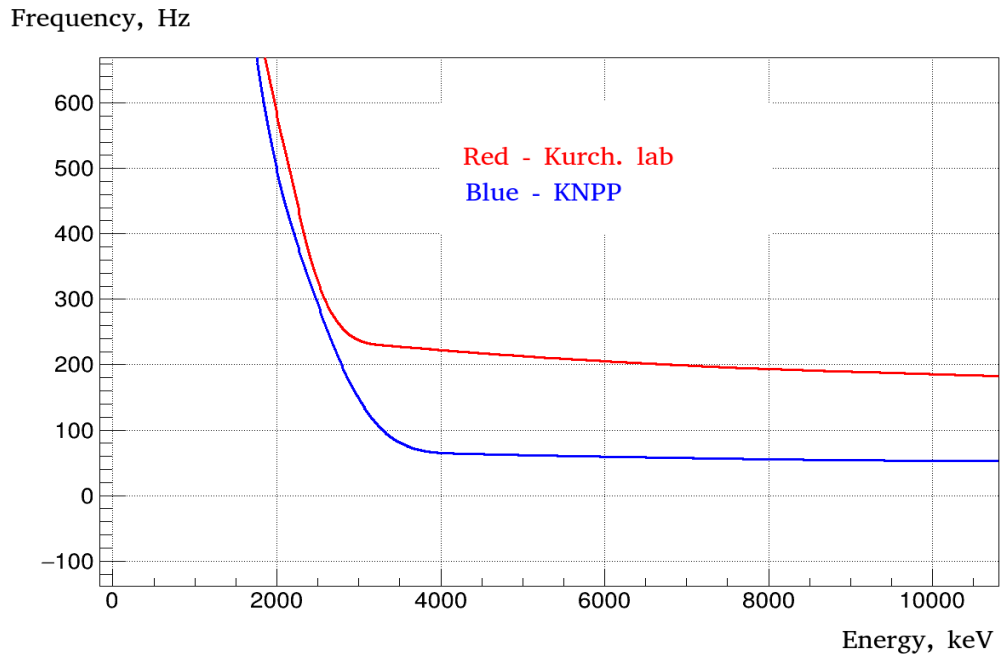


Рисунок 2.5 – Зависимость скорости счета от энергии порога в диапазоне 0 – 650 Гц

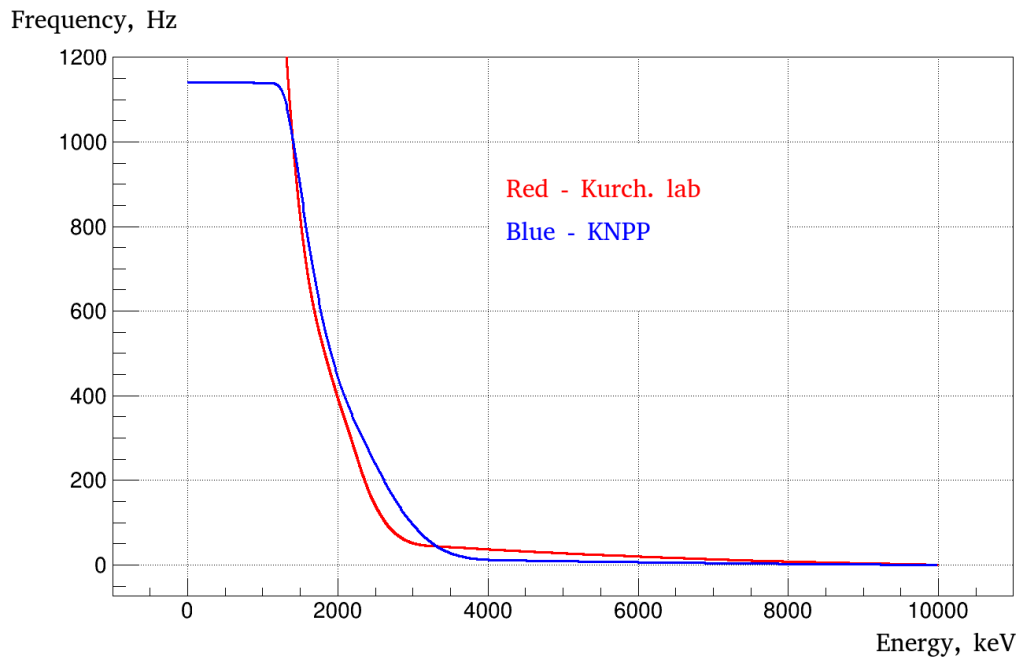


Рисунок 2.6 – Зависимость скорости счета от энергии порога с ограничением 10 МэВ

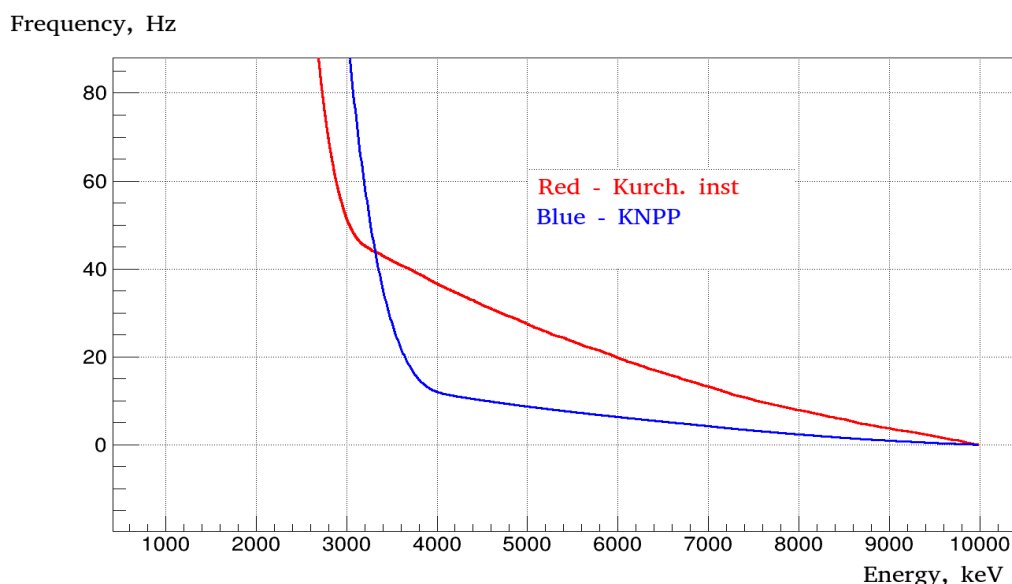


Рисунок 2.7 – Зависимость скорости счета от энергии порога с ограничением 10 МэВ в диапазоне 0 – 90 Гц

Из рисунков 2.4 и 2.5 следует, что скорость счета детектора с порога 2 МэВ составляет ~ 500 Гц. Также наблюдается подавление мюонного потока конструкцией атомного энергоблока (реактор, биологическая защита и т.д.) в 3 раза

Из рисунков 2.6 и 2.7 следует, что фон в области энергии от 1.7 до 3.4 МэВ, регистрируемый детектором на третьем энергоблоке КАЭС возрос по сравнению с фоном, регистрируемым в лаборатории Курчатовского института несмотря на пассивную защиту детектора. Это может свидетельствовать о том, что в данной области энергии:

- Значительная часть фона излучается конструкцией самого детектора.
- Уровень фона на КАЭС выше, чем в лаборатории НИЦ КИ.

В пользу первого предположения говорит и тот факт, что конструкция детектора содержит большое количество стальных конструкций, содержащих в своём составе в т.ч. изотопы урана и тория (содержание в земной коре $\sim 10^{-5}$ грамм на 1 грамм породы)

Вместе с тем наблюдается серьезное понижение фона на энергиях от 3.6 до 10 МэВ, что свидетельствует о вкладе в подавление фона пассивной защиты детектора.

2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕЙТРОНОВ В МИШЕНИ

Для вычисления времени жизни нейтронов в мишени использовалась статистика, набранная за 42 часа. Нейтроны отбирались по задержанным совпадениям: первый сигнал давал высокоэнергетический мюон, в качестве мюонов считались события с энергией более 10 МэВ (в данной области энергии большинство событий является мюонными). После получения сигнала от мюона открывалось временное окно 150 мкс. События, попавшие в данное временное окно, отбирались по энергии: в случае захвата нейтрона на ядре гадолиния излучается серия гамма-квантов с суммарной энергией 8.5 МэВ в случае захвата на ^{155}Gd и 7.9 МэВ в случае захвата на ^{157}Gd . С учетом неполного поглощения, а также некоторого разброса значения регистрируемой энергии (вследствие невысокого энергетического разрешения) отбирались гамма-кванты с энергией от 5 МэВ до 9 МэВ. В случае попадания мюона во временное окно блокировался отбор событий в течение 150 мкс после попадания (поскольку этот случайный мюон сам в свою очередь может породить нейтроны и, таким образом, невозможно определить от какого мюона появился нейтрон – от первого или от второго, а значит и нельзя будет измерить время его жизни)

Для выделения событий, не связанных с мюонами, использовалась следующая методика: после мюонного события через 300 мкс (это время достаточное для того, чтобы все нейтроны, возможно порожденные мюоном, захватились на водороде или гадолинии с очень высокой вероятностью) открывалось временное окно длительностью 150 мкс, которое также записывались события с отбором по энергии от 5 до 9 МэВ. В случае попадания мюона во временное окно последующие за мюоном события не записывались, а процедура повторялась вновь, стартуя от попавшего во временное окно мюона.

Для каждого события, попавшего во временное окно и прошедшего отбор по энергии, записывалось время задержки между регистрацией этого события и мюона, открывшего окно. Получившиеся распределения по времени представлены на рисунке 2.8.

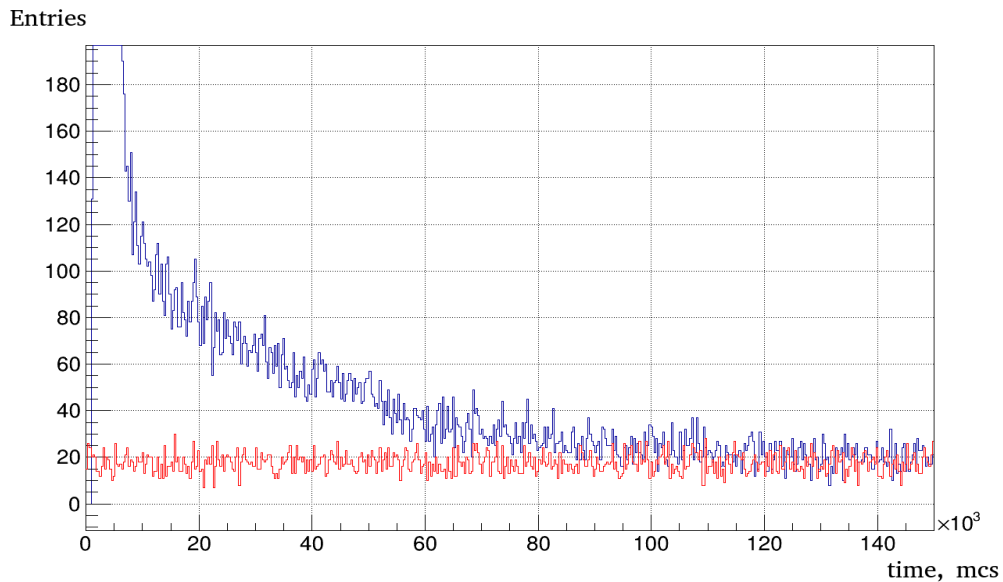


Рисунок 2.8 – Распределение времени задержки регистрации событий в послемюонном окне (синий) и распределение времени задержки случайных событий в окне с отступом в 300 мкс(красный)

Для определения времени жизни нейтрона рассмотрим промежуток от 20 мкс до 100 мкс. Рассматривать времена задержки до 20 мкс не имеет смысла поскольку нейтронные события в данной области подавляются т.н. afterpulse'ами – явлениями, возникающими в вакуумных ФЭУ при регистрации высокоэнергетических событий. В то же время при времени задержки большем 100 мкс гистограммы коррелированных+случайных (синий) и случайных (красный) событий выходят на один уровень, что свидетельствует о том, что большая часть нейтронов, рождающихся от мюонов, поглощается в течение этого времени.

Профитируем гистограмму коррелированных+случайных событий экспоненциальной функцией. Результат фита показан на рисунке 2.9.

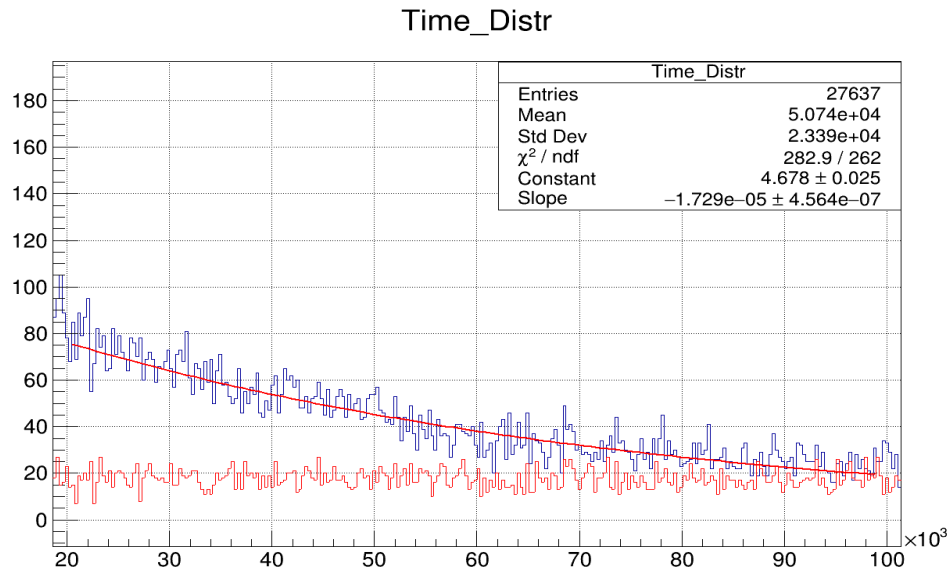


Рисунок 2.9 – Результат фитирования распределения времени задержки регистрации событий в послемюонном окне.

Зная показатель экспоненты, получаем время жизни нейтрона до захвата ядром:

$$\tau_{\text{life}} = (57.8 \pm 1.5) \text{ мкс} \quad (1.1)$$

Данный результат почти в два раза превышает ожидаемый (30 мкс), что свидетельствует о том, что гадолиний либо распределен по мишени неравномерно, либо его концентрация составляет менее 1 г/л

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы получены следующие основные результаты:

- Обработаны одни из первых статистических данных, полученных детектором iDREAM в условиях третьего энергоблока Калининской АЭС
- Получена зависимость скорости счета детектора от пороговой энергии регистрируемых событий. Показано, что конструкция атомного энергоблока подавляет мюонный фон в 3 раза, защита детектора в области энергий событий от 3.6 МэВ до 10 МэВ подавляет фон в среднем в 3 раза.
- Вместе с тем наблюдается повышение фона на энергиях меньше 3.4 МэВ, что может свидетельствовать о повышенном фоне на КАЭС по сравнению с лабораторией НИЦ КИ.
- С помощью фонового мюонного излучения проведена проверка состояния гадолиниевой добавки в мишени. Измерено время жизни космических нейтронов в сцинтилляторе IDREAM, которое составило

$$\tau_{\text{life}} = (57.8 \pm 1.5) \text{ мкс}$$

Данный результат может говорить о том, что концентрация гадолиниевого сцинтиллятора меньше предполагаемой (1 г/л) либо гадолиний неравномерно распределен по мишени. В дальнейшем будет проведена проверка состояния гадолиния с помощью источника нейтронов ^{252}Cf

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.