

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 531.3, 539.1.05

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЮОННОГО ВЕТО ДЕТЕКТОРА
IDREAM В ПАКЕТЕ GEANT4**

Студент

_____ Д. Н. Чернышов

Научный руководитель,
к.ф.-м.н., доц.

_____ Е. А. Литвинович

Москва 2020

РЕФЕРАТ

Отчет 21 с., 16 рис., 3 табл., 6 ист.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Мюон, iDREAM, вето, моделирование, GEANT4, эффективность.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Моделирование сцинтилляционной пластины мюонного вето детектора ядерных антинейтрино iDREAM.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ

- Программный пакет GEANT4.
- Программный пакет ROOT.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Создана модель пластины мюонного вето, получен отклик пластины на поток мюонов с заданным спектром и угловым распределением. Проведена оценка эффективности регистрации мюонов пластиной при наличии гамма-фона.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЮОННОГО ВЕТО ДЕТЕКТОРА
IDREAM В ПАКЕТЕ GEANT4**

Студент	_____ Д. Н. Чернышов
Научный руководитель, к.ф.-м.н., доц.	_____ Е. А. Литвинович
Рецензент, к.ф.-м.н.	_____ О. А. Титов
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Детектор iDREAM	5
1.1 Конструкция	5
1.2 Принцип работы детектора	6
1.3 Мюонное вето детектора	8
1.3.1 Назначение	8
1.3.2 Конструкция	8
1.3.3 Принцип работы	9
2 Моделирование в GEANT4	10
2.1 Математическая модель пластины	10
2.2 Эффективность регистрации мюонов при наличии гамма-фона	14
3 Заключение	20
Список использованных источников	21

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы являлось компьютерное моделирование сцинтилляционной пластины мюонного вето детектора ядерных антинейтрино iDREAM с последующим определением эффективности регистрации мюонов данной пластины.

В топливе атомных реакторов происходит реакция деления изотопов урана и плутония, которая приводит к образованию нейтроно-избыточных ядер. Эти ядра испытывают бета-распад, дающий антинейтринное излучение. С помощью детектора антинейтрино можно дистанционно контролировать режимы работы реактора и проводить независимую оценку накопления плутония.

Создание детекторов реакторных антинейтрино до настоящего времени было направлено, в основном, на исследовательские задачи. Внедрение такого метода контроля атомных реакторов как нейтринный требует подходов, связанных с разработкой индустриальных методов построения детектора как автономного прибора, соответствующего всем требованиям его эксплуатации на АЭС [1], [2]. Первые шаги в этом направлении были сделаны с целью создания опытного образца первого промышленного детектора iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring). Основные усилия на первом этапе были направлены на создание конструкции детектора, который бы эффективно регистрировал антинейтрино, но при этом был бы промышленным изделием, позволяющим его легко изготавливать, устанавливать, тиражировать и обслуживать. Дальнейшая задача работы — проведение демонстрационного эксперимента в реальных условиях на Калининской АЭС, показывающего возможности автономного контроля режимов работы реактора нейтринным методом.

1. ДЕТЕКТОР iDREAM

1.1. КОНСТРУКЦИЯ

Детектор iDREAM представляет собой компактный детектор, оптимизированный для регистрации реакторных антинейтрино по реакции обратного бета-распада.

Конструкция детектора (Рисунок 1.1) выполнена в виде двух концентрических баков из нержавеющей стали, накрытых общей герметичной крышкой. Внутренний бак разделен выпуклой прозрачной мембраной из оргстекла и просматривается 16 ФЭУ. Пространство внутреннего бака под мембраной объемом 1 м^3 заполняется гадолинизированным ЖОС. Это пространство является мишенью детектора. Чтобы обеспечить доступ к мишени есть вертикальная трубка, вклеенная в центр мембраны, верхний конец этой трубки выходит за пределы бака. Пространство внутреннего бака над мембраной заполняется линейным алкилбензолом (ЛАБ), оно защищает мишень от гамма-фона материала ФЭУ и служит для увеличения светосбора. Кольцевой объем заполняется ЖОС, он повышает общую эффективность за счет регистрации гамма-квантов, вышедших за пределы мишени и служит активной защитой мишени детектора. Кольцевой объем просматривают 12 ФЭУ. Между буферными кольцевыми объемами имеется светозащитный барьер с нижней стороны крышки. С помощью системы трубок и кольцевых сепараторов на дне внутреннего и кольцевого объема осуществляется заполнение и откачка ЖОС, а также через коллектор осуществляется барботирование ЖОС азотом в мишени и в кольцевом объеме. Внутренние стенки основного чувствительного объема и буферного объема покрыты светоотражающим материалом «Lumirror E6SRc» с коэффициентом отражения до 90% для спектра сцинтилляции используемого ЖОС. Более подробная информация содержится в работе [3].

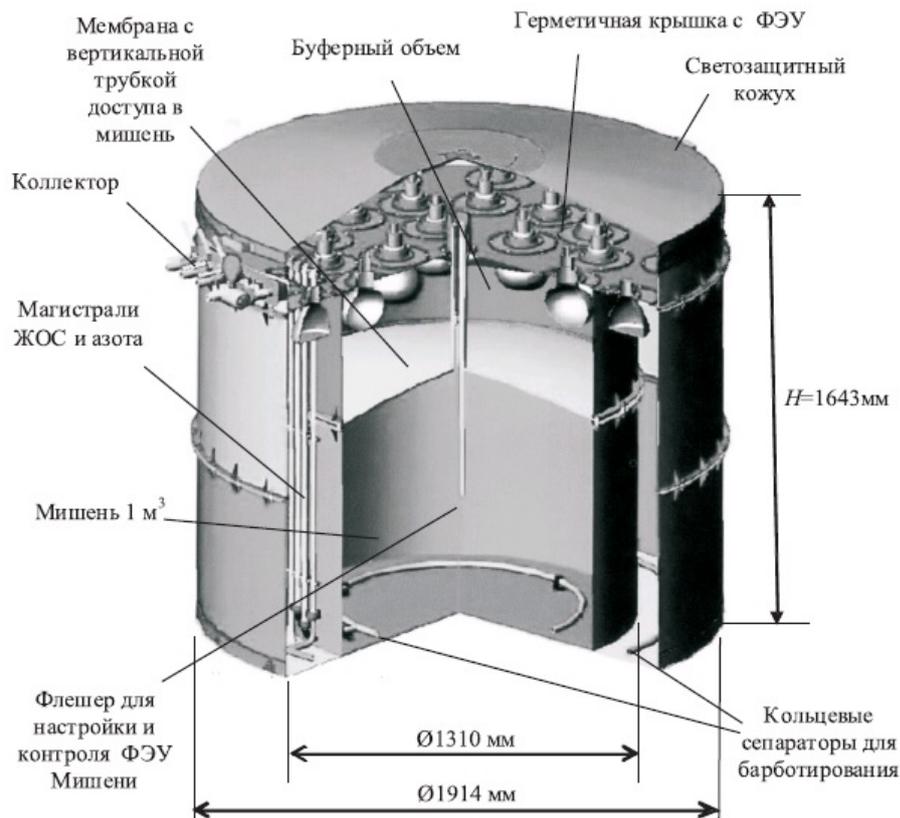


Рисунок 1.1 — Конструкция детектора iDREAM

1.2. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА

Для регистрации антинейтрино используется реакция обратного бета-распада с образованием позитрона и нейтрона. Пороговая энергия данной реакции составляет 1.8 МэВ, поэтому регистрируется только 25% от общего количества излучаемых реактором антинейтрино, обладающих энергией выше порога.



Отслеживание данной реакции осуществляется благодаря технике задержанных совпадений. Антинейтрино захватывается протоном и образуется позитрон и нейтрон. Позитрон ионизирует среду и аннигилирует с образованием двух γ -квантов с энергией $E_\gamma = 511$ КэВ каждый, это первый детектируемый импульс. Водородо-насыщенные прозрачные пластиковые или жидкие органические сцинтилляторы (ЖОС) являются наиболее подходящими средами для создания мишени. Затем в течение $\Delta t = 100$

мкс происходит захват нейтрона мишенью с излучением гамма-квантов. Это ничто иное, как второй импульс. В данном случае мишенью является гадолиний, элемент с большим сечением захвата нейтронов ($\sim 250\,000$ барн), которым допируют ЖОС. Регистрация нейтронов в этом случае осуществляется по нескольким гамма-квантам с суммарной энергией около 8 МэВ, испускаемым возбужденными в результате захвата нейтрона ядрами гадолиния. Вероятность захвата и соответственно время жизни нейтронов в мишени определяется концентрацией гадолиния в сцинтилляторе, которое составляет 1 г/л.

1.3. МЮОННОЕ ВЕТО ДЕТЕКТОРА

1.3.1. НАЗНАЧЕНИЕ

Фундаментальная задача активного вето — защита детектора iDREAM в реальном времени, которая будет работать в единой системе с детектором. Мюонное вето служит для подавления фона космических и атмосферных мюонов.

Одна из пагубных реакций, в которых участвует мюоны, - это взаимодействие с веществом, в следствие которого происходят рассеяния на ядрах, продуктом которых будут являться нейтроны, создающие фон, что крайне нежелательно для детектора.

1.3.2. КОНСТРУКЦИЯ

Активная защита детектора представляет собой сцинтилляционную пластину 2000 мм x 1200 мм x 33 мм (Рисунок 1.2), изготовленную из полиметилметакрилата (ПММА) с добавлением нафталина, РОРОР и РРО. В качестве основы выступает ПММА благодаря хорошей прозрачности, лёгкой формируемости и малой хрупкости. В качестве первичных сцинтилляторов (активаторов) используется нафталин и 2,5-дифенилоксазол (РРО). Первичные сцинтилляторы предназначены для обеспечения световыхода. В качестве вторичного сцинтиллятора (шифтера) для смещения спектра используется 1,4-бис (4-метил 5-фенил 2-оксозолил) бензол (РОРОР). Такая смесь позволяет сместить спектр флюорисценции в область длин волн 415-420нм, в которой чувствительность фотоприёмника максимальна при сохранении прозрачности пластины.

Для улучшения светосбора пластины используется явление полного внутреннего отражения, для этого пластина покрыта алюминизированным майларом $(C_{10}H_8O_4)_n$ по боковой поверхности. С двух сторон площадью 2000мм x 1200мм пластина покрыта слоем белой бумаги, выступающей в качестве диффузного отражателя. Далее идёт слой чёрного полиэтилена, который препятствует проникновению света снаружи, и, наконец, вся пластина обёрнута кожзаменителем для защиты от внешних механических воз-

действий. С двух противоположных торцов пластины установлены по три фотоэлектронных умножителя ФЭУ-85.

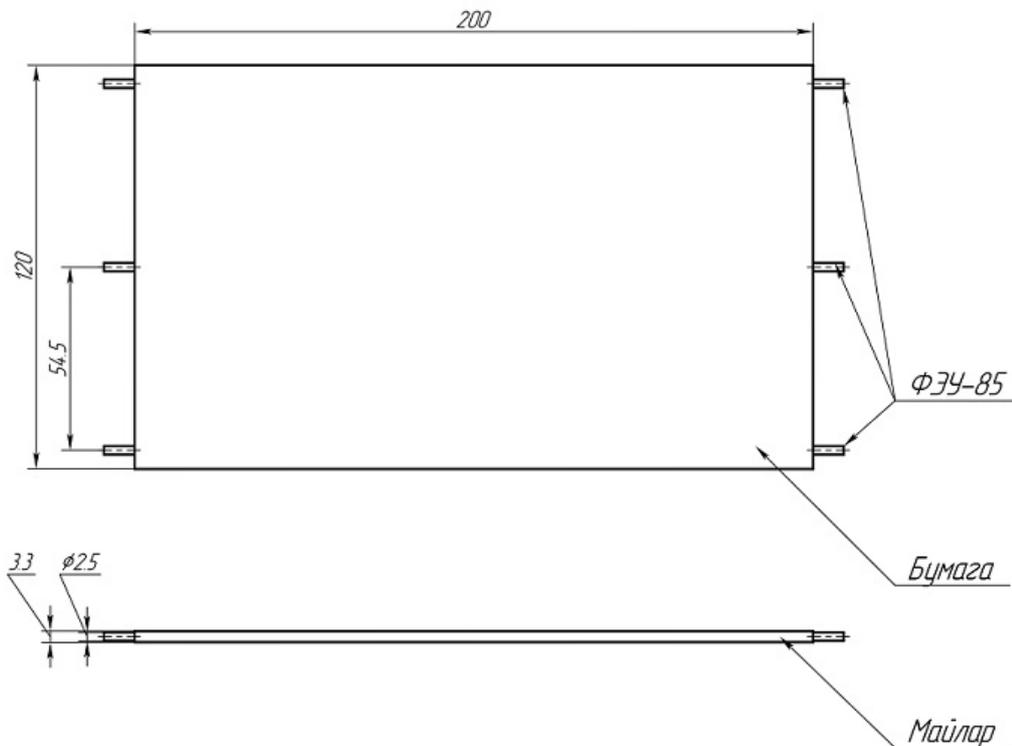


Рисунок 1.2 — Конструкция мюонного вето детектора iDREAM

1.3.3. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Сквозь сцинтилляционную пластину под различными углами пролетают мюоны. Через площадь покрытия пластины ($2,4\text{ м}^2$) пролетает порядка 300 мюонов в секунду. При прохождении мюонов через рабочий объём в нём образуется короткая вспышка света, состоящая из $10^3 - 10^5$ фотонов, которые регистрируются шестью ФЭУ-85.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ В GEANT4

2.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАСТИНЫ

При моделировании была использована стандартная библиотека физических процессов "*QVCS.hh*" и также "*G4OpticalPhysics.hh*". Определяющие физические параметры были выбраны следующим образом.

Таблица 2.1 — Параметры конструкции.

Коэффициент отражения бумаги	0,4
Коэффициент отражения майлара	0,8
Квантовая эффективность ФЭУ-85	15%
Световыход	8000 фотонов/МэВ

В ходе работы было смоделировано прохождение одного мюона с энергией 1ГэВ перпендикулярно конструкции через её центр. Были получены распределение фотоэлектронов по времени (Рисунок 2.3) и число зарегистрированных фотоэлектронов при регистрации одного мюона с энергией 1 ГэВ (Рисунок2.4). Следующим этапом работы стало равномерное распределение координаты прохождения моноэнергетического мюона через пластину. Было получено число зарегистрированных фотоэлектронов при регистрации потока перпендикулярных мюонов с энергией 1 ГэВ (Рисунок 2.5). Затем в модель было добавлено распределение по зенитному углу и энергетический спектр мюонов на уровне моря(Рисунок2.1)[4]. Распределение по углу было выбрано на основе результатов работы детектора DANSS (Рисунок2.2)[5]. Детектор был размещен под промышленным реактором Калининской АЭС, в том же помещении, где будет проходить тестирование iDREAM. Измерения зенитного угла проходили в разных положениях детектора. Красные точки - это данные в нижнем положении,

зеленые точки - в средней позиции, а синие точки - это в верхней позиции.

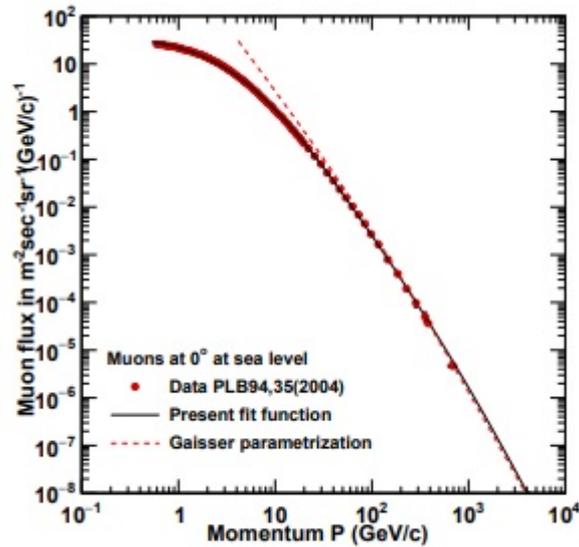


Рисунок 2.1 — Распределение импульса мюона на уровне моря. [4]

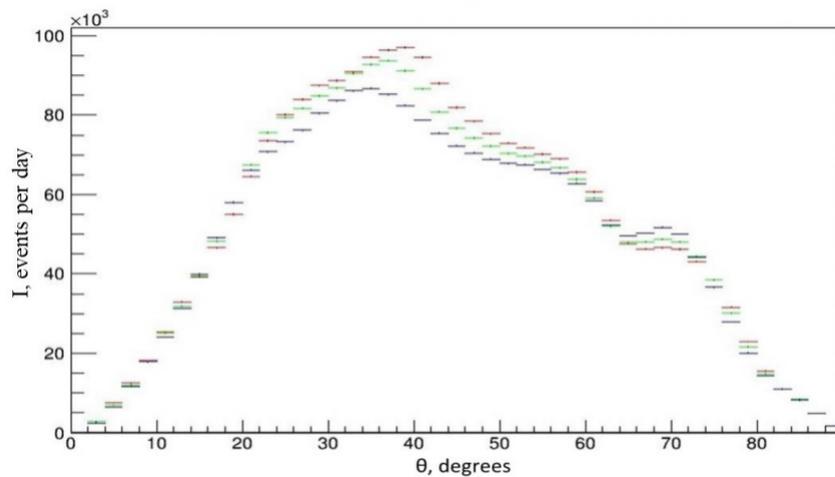


Рисунок 2.2 — Гистограмма зенитного угла. [5]

Мною были использованы данные обозначенные красным цветом, так как работа детектора iDREAM будет проходить глубже под реактором, чем DANSS. Для проверки точности работы модели было получено распределение количества зарегистрированных фотоэлектронов от угла под которым в конструкцию влетел мюон (Рисунок 2.6). Из распределения видно, что количество фотоэлектронов растёт с увеличением угла, что совпадает с теоретическим предсказанием. Нулевое значение зенитного угла соответствует вертикальному прохождению мюона через пластину. В этом случае трек оставленный частицей в объёме сцинтиллятора будет минимальным.

С ростом угла будет увеличиваться путь пройденный мюоном внутри объема пластины, что гарантирует большие значения энергии оставленные мюоном внутри и большее количество образованных фотоэлектронов.

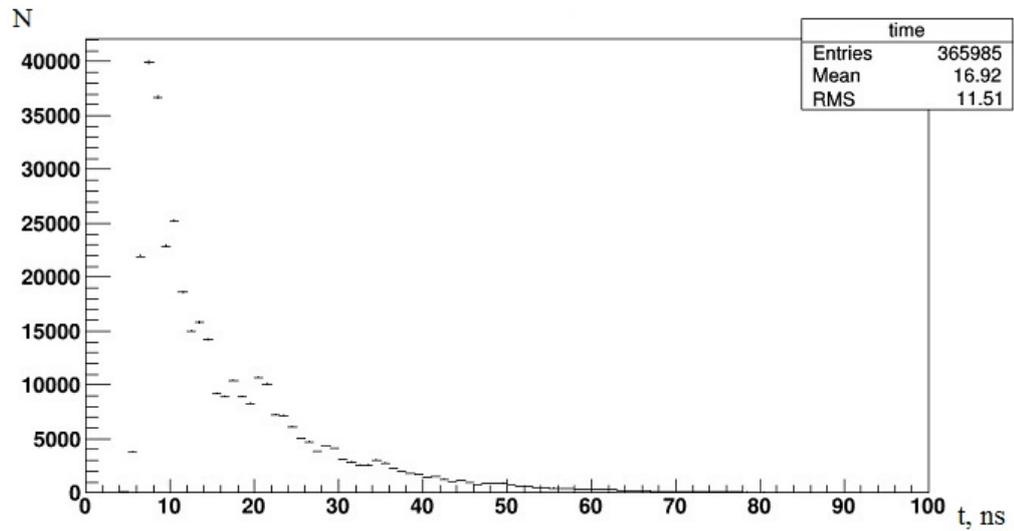


Рисунок 2.3 — Распределение фотоэлектронов по времени, момент времени $t=0$ соответствует времени влета мюона в рабочую область.

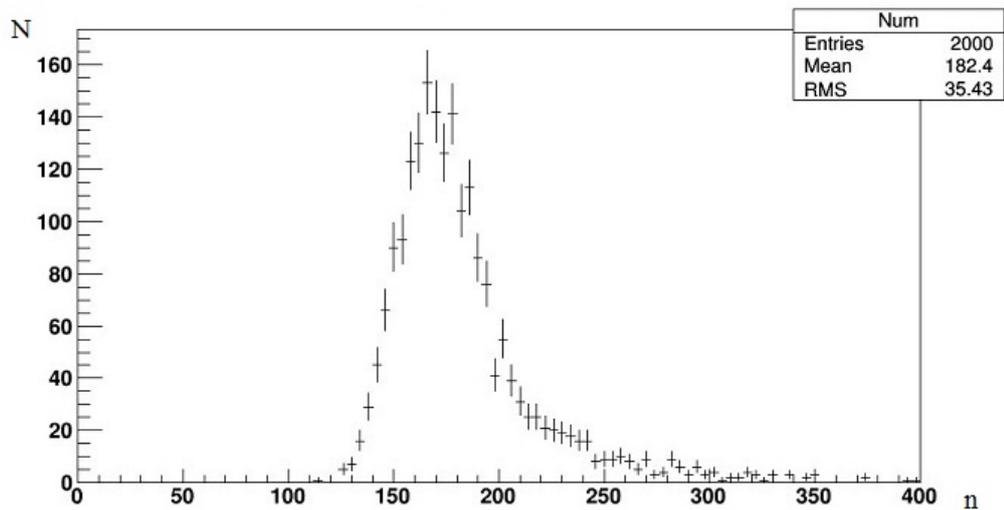


Рисунок 2.4 — Число зарегистрированных фотоэлектронов при регистрации мюона с энергией 1ГэВ.

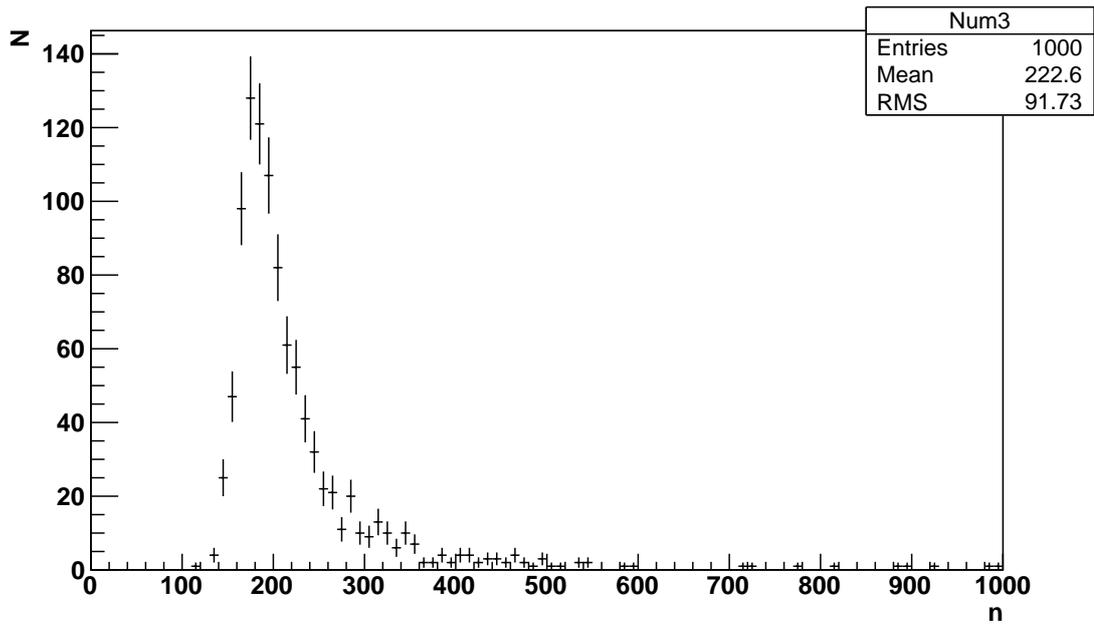


Рисунок 2.5 — Число зарегистрированных фотоэлектронов при регистрации мюона с энергией 1ГэВ при равномерном распределении координаты пролёта мюона.

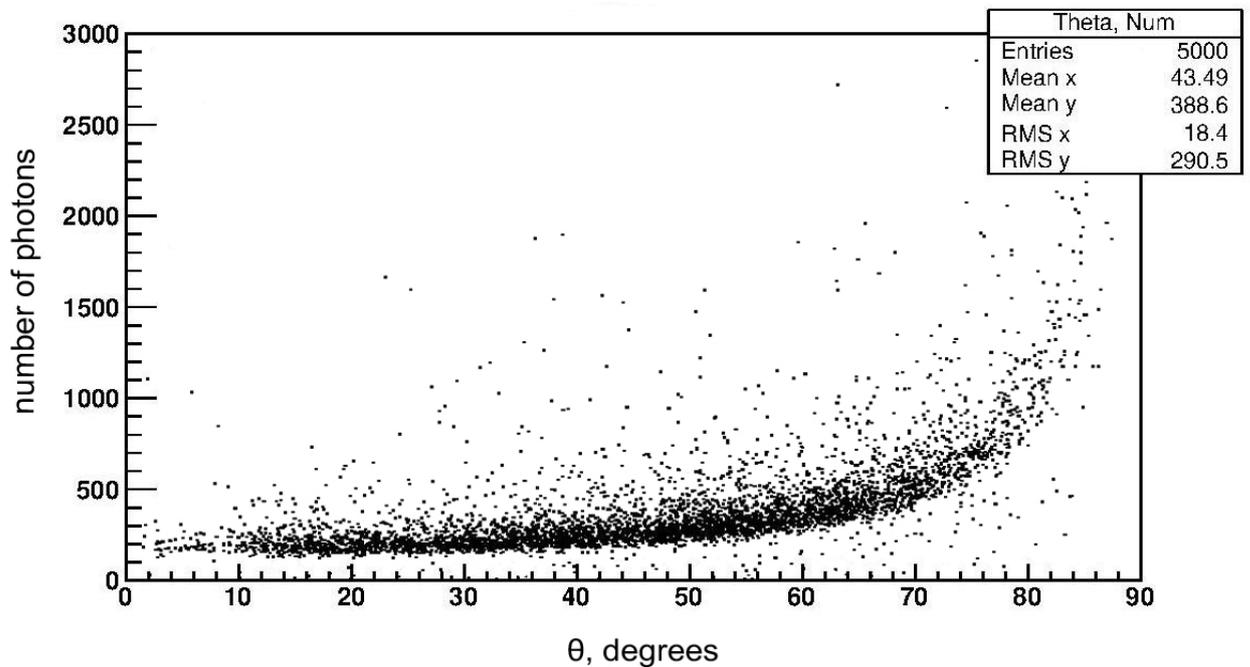


Рисунок 2.6 — Зависимость числа зарегистрированных фотоэлектронов от зенитного угла падения мюона на пластину.

2.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ МЮОНОВ ПРИ НАЛИЧИИ ГАММА-ФОНА

Работая в нормальных лабораторных условиях, пластина регистрирует не только мюоны, но и гамма-фон. Поток гамма-квантов через пластину намного больше, чем поток мюонов, поэтому гамма-фон может полностью перекрыть сигнал от мюонов.

Для моделирования потока гамма-квантов был использован спектр с детектора DANSS (Рисунок 2.7) [6].

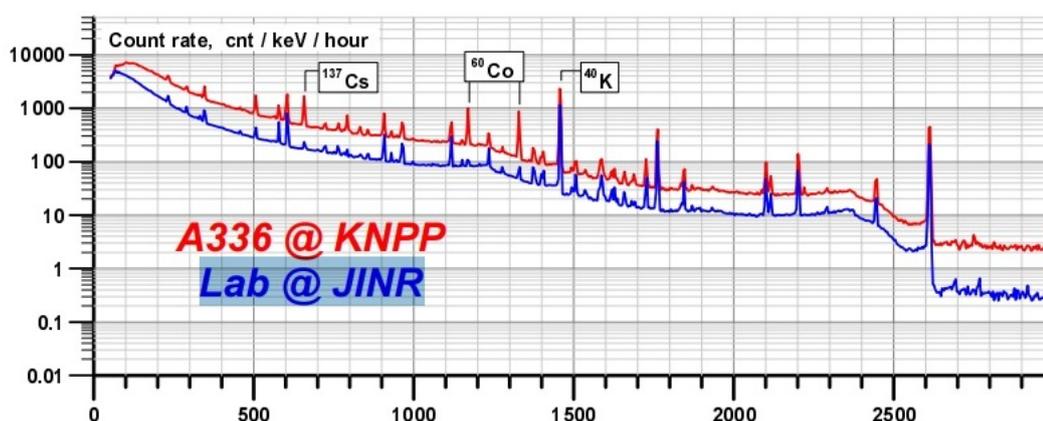


Рисунок 2.7 — Спектр гамма-квантов[6].

Было получено распределение числа зарегистрированных фотоэлектронов от суммы потоков гамма квантов и мюонов (Рисунок 2.8), а также каждого в отдельности (Рисунок 2.9).

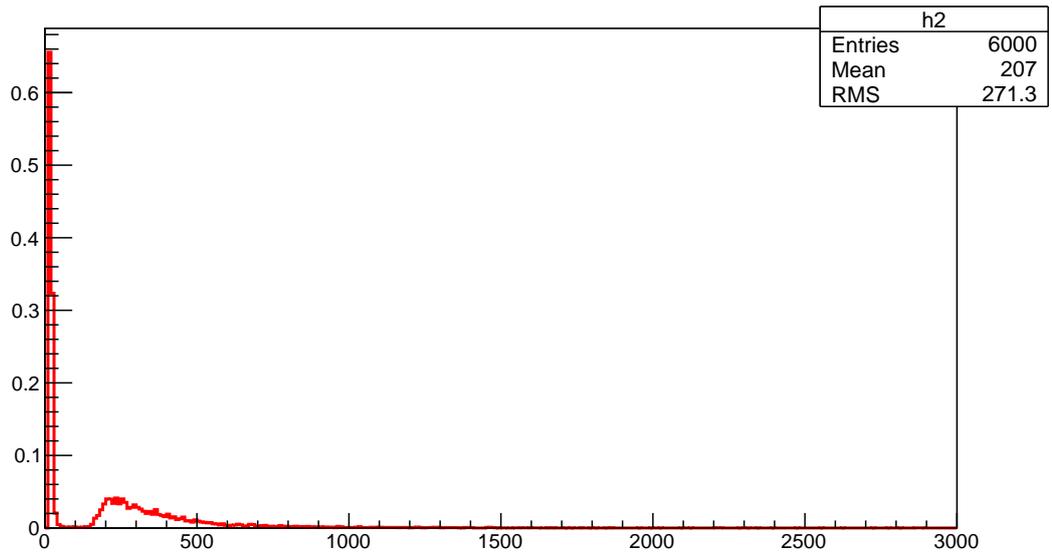


Рисунок 2.8 — Число зарегистрированных фотоэлектронов от суммы потоков гамма-квантов и мюонов.

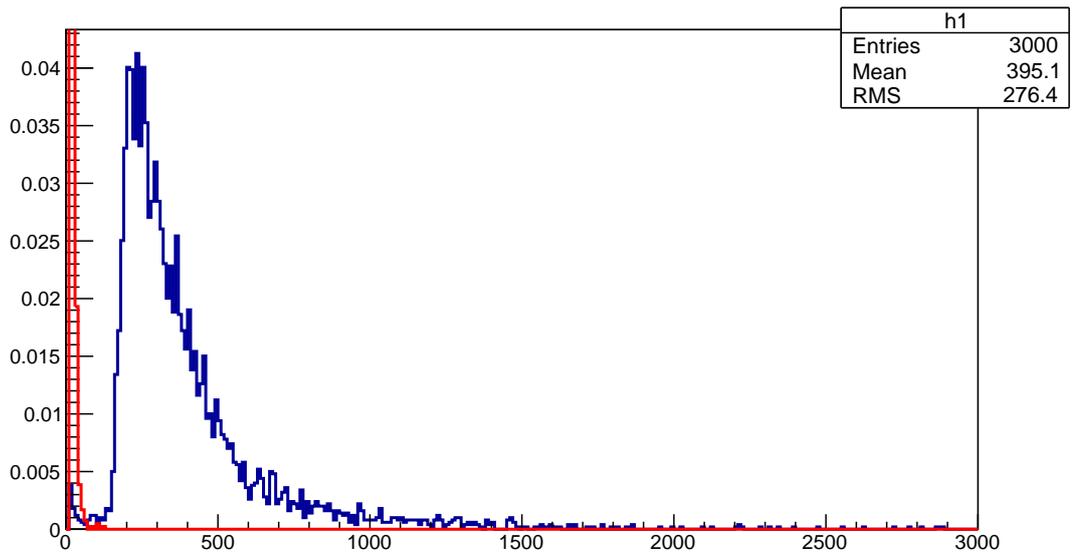


Рисунок 2.9 — Число зарегистрированных фотоэлектронов от мюонов(синий) и гамма-квантов(красный).

Из полученной зависимости видно, что простым способом избавления от гамма-фона может стать введение порога на суммарное количество зарегистрированных фотоэлектронов всеми шестью ФЭУ (Рисунок 2.10).

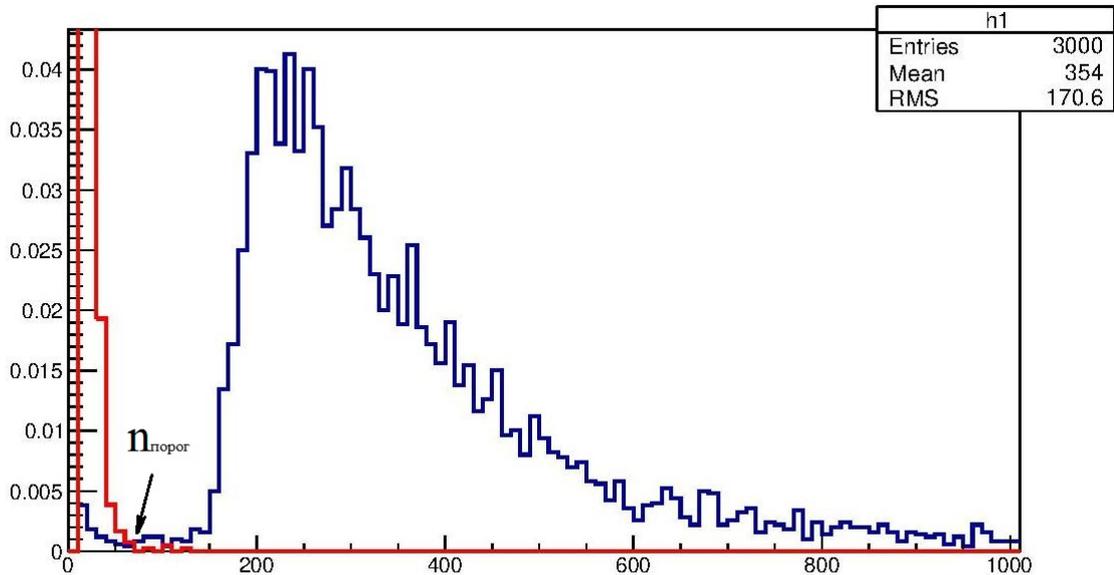


Рисунок 2.10 — Определение порогового значения суммы зарегистрированных фотоэлектронов.

Оптимальным значением такого порога будет $n_{\text{порог}} = 70$ фотоэлектронов. При таком выборе порога эффективность регистрации мюонов равна 99,12 %, а эффективность подавления гамма-фона 99,83%. Чтобы таким образом подавить гамма-фон на 100% потребуется ввести $n_{\text{порог}} = 130$ фотоэлектронов, что приведёт к снижению эффективности регистрации мюонов до 98.59%.

Особую опасность представляют гамма-кванты, пролетающие вблизи ФЭУ. Было смоделировано прохождение гамма-кванта энергии 662 кэВ вблизи одного из центральных ФЭУ. Получено число фотоэлектронов зарегистрированное всеми шестью ФЭУ (Рисунок 2.11), число фотоэлектронов с ФЭУ, вблизи которого пролетел гамма-квант (Рисунок 2.12) и число с остальных пяти (Рисунок 2.13).

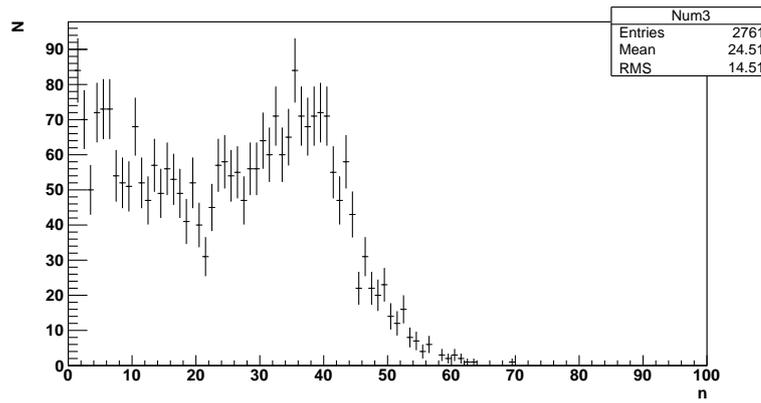


Рисунок 2.11 — Число фотоэлектронов зарегистрированных всеми ФЭУ при пролете гамма-кванта вблизи одного из центральных.

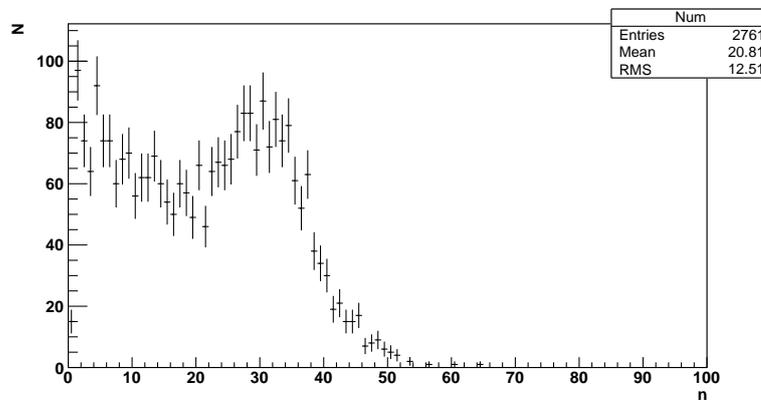


Рисунок 2.12 — Число фотоэлектронов зарегистрированных ФЭУ вблизи которого пролетел гамма-квант.

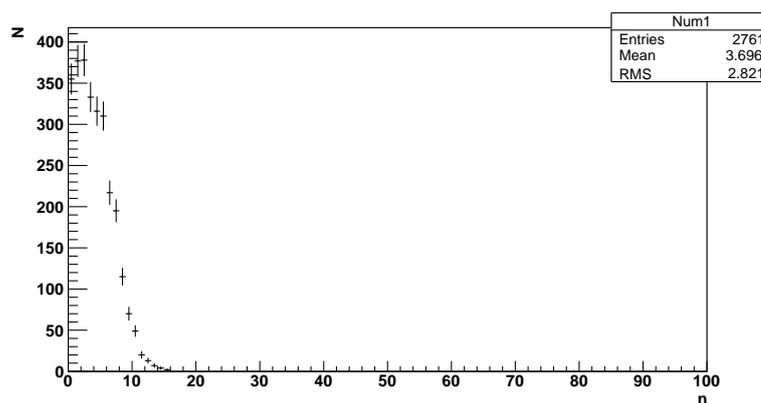


Рисунок 2.13 — Число фотоэлектронов зарегистрированных остальными пятью ФЭУ.

Из представленных графиков видно, что большая часть фотоэлектронов (83%) регистрируется тем ФЭУ, вблизи которого пролетел гамма-квант. Это значит, что для исключения такого рода событий лучше ввести не просто порог на суммарный сигнал со всех ФЭУ, а систему совпадений между ними, которая позволит максимально подавить гамма-фон и при этом обеспечит максимальную эффективность работы вето.

Было рассмотрено два варианта логического соединения ФЭУ в группы. Первый, при котором объединены ФЭУ 1, 2, 3 и 4, 5, 6, в дальнейшем будем называть его "Тройки". И второй 1,3,5 и 4,2,6 - "Треугольники" (Рисунок 2.14).

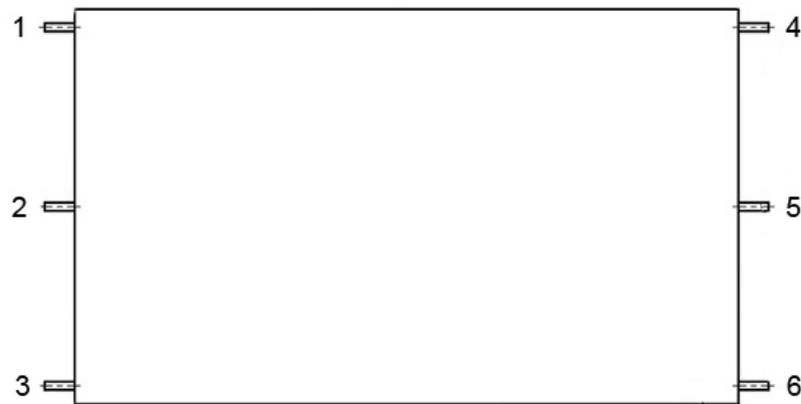


Рисунок 2.14 — Нумерация ФЭУ.

Условием триггера такой системы будет превышение обеими группами ФЭУ заданного порога регистрируемых фотоэлектронов.

Было проведено измерение эффективности подавления гамма фона в зависимости от выставяемого порога для двух логических схем.

Таблица 2.2 — Подавление гамма-фона и эффективность регистрации мюонов для Логики 1 - "Тройки".

Порог	4	6	8	10	11	12
Подавление фона	73.39%	93.3%	99.21%	99,92%	100%	100%
Эффективность	99.98%	99.79%	99.67%	99.31%	99.13%	99.03%

Таблица 2.3 — Подавление гамма-фона и эффективность регистрации мюонов для Логики 2 - "Треугольники".

Порог	4	6	8	10	11	12
Подавление фона	70.78%	91.79%	98.69%	99,88%	99.97%	100%
Эффективность	99.98%	99.82%	99.75%	99.36%	99.31%	99.25%

Проанализировав полученные значения было определено, что лучшим соотношением между подавлением гамма-фона и эффективностью регистрации мюонов обладает объединение ФЭУ "Треугольники" с порогом в 12 фотоэлектронов. При такой комбинации фон от гамма-излучения подавляется на 100%, а эффективность регистрации составляет 99,25%.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы получены следующие основные результаты:

- С помощью пакета GEANT4 создана математическая компьютерная модель пластины мюонного вето детектора iDREAM.
- Смоделирован отклик пластины на поток космических мюонов с энергетическим спектром на уровне Земли и угловым распределением, ожидаемым в месте установки детектора на КАЭС.
- Смоделирован отклик пластины на поток гамма-квантов со спектром, ожидаемым на КАЭС.
- Для разных конфигураций триггера пластины рассчитана эффективность регистрации пластиной мюонов в присутствии потока фоновых гамма-квантов.
- Определена наилучшая конфигурация триггера пластины и порог его срабатывания, при которых гамма-фон подавляется на 100%, а эффективность регистрации составляет 99,25%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Mikaelyan L.* Neutrino laboratory in the atomic plant (Fundamental and Applied Researches) // Proc. Int. Conf. “Neutrino-77”. — 1978. — т. 2. — с. 383.
2. *A.Borovoi L.* The possibility of practical usage of neutrino // Atomic Energy. — 1978. — т. 44. — с. 508.
3. The industrial iDREAM detector for neutrino monitoring of the operating modes of nuclear reactors / M. Gromov [и др.] // Moscow University Physics Bulletin. — 2015. — т. 70. — с. 190–194.
4. *Shukla P., Sankrith S.* Energy and angular distributions of atmospheric muons at the Earth // Int. J. Mod. Phys. A. — 2018. — т. 33, № 30. — с. 1850175. — arXiv: [1606.06907 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1606.06907).
5. *Samigullin E.* Cosmic muons measurements in the DANSS experiment // J. Phys. Conf. Ser. — 2019. — т. 1390, № 1. — с. 012072.
6. DANSS: Detector of the reactor AntiNeutrino based on Solid Scintillator / I. Alekseev [и др.] // JINST. — 2016. — т. 11, № 11. — P11011. — arXiv: [1606.02896 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1606.02896).