

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме

**ИЗУЧЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ
СВЕТОСОБИРАНИЯ ГАММА-КЕТЧЕРА
ДЕТЕКТОРА iDREAM НА
КАЛИНИНСКОЙ АЭС**

Научный руководитель

(доц., к.ф.-м.н.)

_____ Е. А. Литвинович

Студент

_____ В. К. Жабин

Москва, 2026

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Детектор iDREAM	5
1.1 Система калибровки детектора	7
2 Анализ калибровочных данных детектора	9
2.1 Используемый источник	9
2.2 Проведение измерений	9
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	12
ЛИТЕРАТУРА	13

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционные детекторы играют важнейшую роль в экспериментальной физике. Принцип их работы основан на сборе света от событий, происходящих в объёме детектора. Заряженная частица взаимодействует с веществом сцинтиллятора, вызывая испускание фотонов люминисценции, которые затем регистрируются фотоумножителями. Величина зарегистрированного сигнала, обычно, прямо пропорциональна энергии регистрируемой частицы.

В работе исследуется детектор iDREAM, основной задачей которого является удалённый мониторинг состояния реактора, измерение тепловой мощности и энерговыработки по потоку антинейтрино из активной зоны. Регистрация реакторных антинейтрино осуществляется по реакции обратного бета-распада на протоне (ОБР) ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$) в жидком органическом сцинтилляторе (ЖОС) на основе линейного алкилбензола, с добавкой гадолиния 1 г/л. Отбор реакций происходит по задержанным событиям.

Сразу после реакции ОБР происходит аннигиляция позитрона с рождением двух гамма-квантов. Общее энерговыделение мгновенного сигнала, с учётом кинетической энергии позитрона, составляет $E_{\text{ИЗМ}} = E_{\bar{\nu}_e} - T_{\text{пор}} + 2m_e c^2 = E_{\bar{\nu}_e} - 0.78 \text{ МэВ}$, где $T_{\text{пор}} = 1.8 \text{ МэВ}$ – пороговая энергия реакции. Примерно через 30 мкс происходит захват нейтрона ядром гадолиния с последующим испусканием каскада гамма-квантов с суммарной энергией около 8 МэВ.

В конструкции детектора iDREAM имеется кольцевой объём (гамма-кетчер, ГК), заполненный ЖОС без гадолиния, который является активной защитой мишени, а также служит для регистрации гамма-квантов, вылетающих за пределы мишени. Учёт энергий гамма-квантов, поглощённых в гамма-кетчере, позволяет улучшить спектрометрию событий и эффективность регистрации $\bar{\nu}_e$.

Сцинтилляционные детекторы имеют ряд недостатков. В частности, количество собираемого света сильно варьируется от координаты возникающего события. Оптические характеристики сцинтиллятора и конструктивные особенности детектора вносят определяющий вклад в погрешность измеряемой энергии частицы и определяют энергетическое разрешение детек-

тора. Таким образом, неоднородность светособирания является значимым источником систематической ошибки экспериментальных результатов, что обуславливает необходимость её исследования как важной задачи спектрометрии.

Цель работы: изучить зависимость эффективности светосбора в гамма-кетчере нейтринного детектора iDREAM от вертикальной координаты события.

Задачи:

- 1) Получить энергетические спектры калибровочного гамма-источника ^{60}Co , перемещаемого вдоль оси z ГК детектора iDREAM;
- 2) Получить кривую неоднородности светосбора в ГК вдоль оси z .

1 Детектор iDREAM

Нейтринный детектор iDREAM [1, 2] (industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring) расположен на расстоянии 19,5 м от центра активной зоны (АЗ) реактора ВВЭР-1000 ($P_{th} = 3000$ МВт) энергоблока №3 Калининской атомной электростанции. Задача детектора состоит в дистанционном контроле работы реактора по потоку антинейтрино из АЗ.

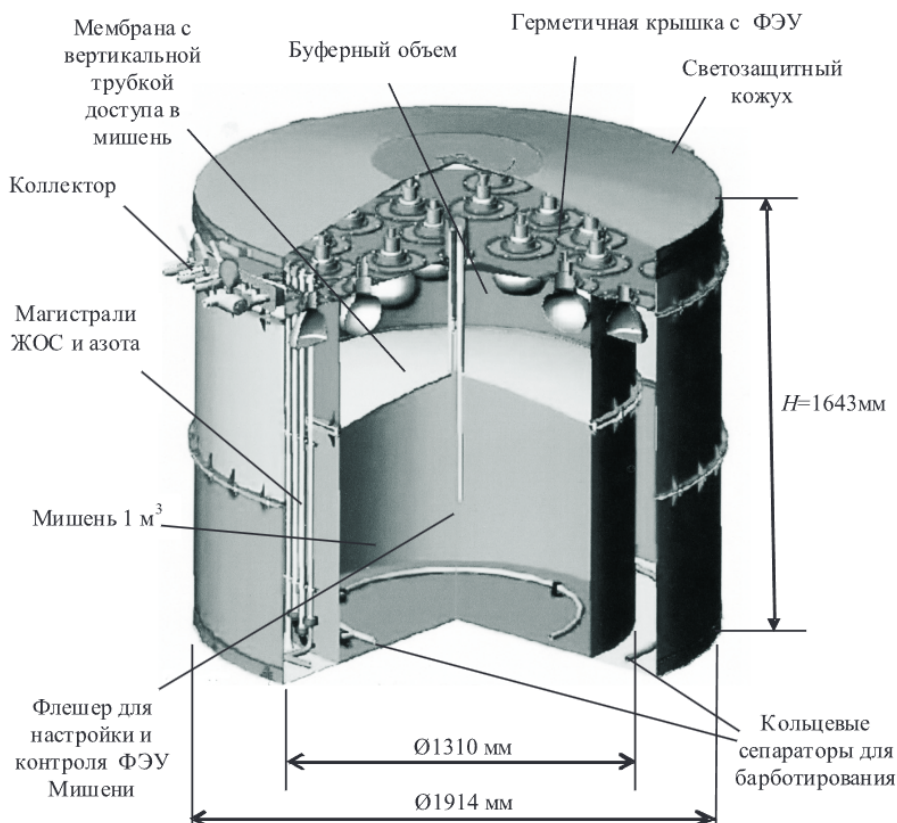
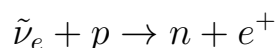


Рис. 1: Схема внутреннего устройства детектора iDREAM

Внутреннее устройство детектора изображено на рисунке 1. Он состоит из двух отсеков цилиндрической формы, жёстко закреплённых друг относительно друга. Внешний отсек имеет диаметр 1914 мм и высоту 1643 мм. Внутренний бак диаметром 1310 мм и высотой 1305 мм разделён на две части выпуклой перегородкой из акрила. Пространство под ней заполнено жидким органическим сцинтиллятором (ЖОС) с добавлением гадолиния 1 г/л и является мишенью детектора. Объём над перегородкой заполняется линейным алкилбензолом, который служит буфером для увеличения светосбора и защищает мишень от фонового излучения от 16 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), расположенных на верхней крышке бака. Для

увеличения светосбора дно и стенки покрыты светоотражающей плёнкой. Пространство между стенками внутреннего и внешнего объёмов детектора заполнено ЖОС без гадолиния и выполняет роль активной защиты (гамма-кетчер или ГК), а также служит для регистрации гамма-квантов, покинувших мишень. Для этого в ГК расположены ещё 12 ФЭУ. Для повышения эффективности светосбора дно и стенки также покрыты светоотражающей плёнкой.

Регистрация антинейтрино в мишени осуществляется посредством реакции обратного бета-распада, происходящего в объёме жидкого органического сцинтиллятора в результате захвата реакторного антинейтрино [3, 4]:



Пороговая энергия реакции – 1.8 МэВ. Отбор событий осуществляется по задержанным сигналам. Непосредственно после реакции ОБР происходит аннигиляция позитрона с испусканием двух гамма-квантов. Спустя приблизительно 30 мкс происходит захват нейтрона ядром гадолиния, сопровождающийся испусканием каскада гамма-квантов с суммарной энергией около 8 МэВ.

1.1 Система калибровки детектора

Для калибровки детектора предусмотрена специальная система на основе шагового двигателя и зубчатого ремня (рисунок 2). На рисунке обозначены: 1 – зубчатый ремень, 2 – верхний концевой выключатель, 3 – челнок с радиоактивным источником, 4 – нижний концевой выключатель, 5 – сухой калибровочный канал, расположенный по центру внутри мишени, 6 – нижний кронштейн со шкивом, 7 – держатель шагового двигателя, 8 – фланец двигателя.

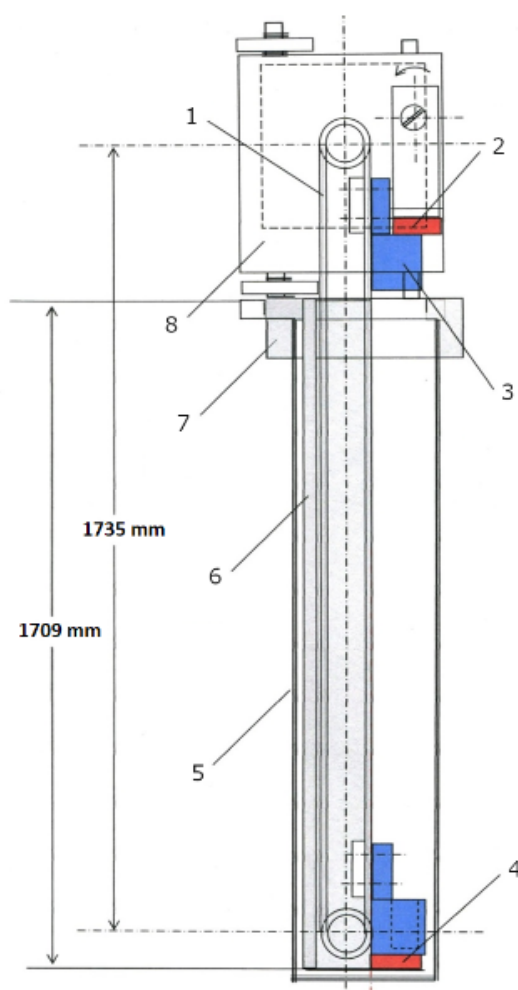


Рис. 2: Схема калибровочной системы детектора iDREAM.

Система позволяет определять положение источника по вертикальной оси z с точностью до 2 мм. Источник, заключённый в челнок, закреплён на замкнутом зубчатом ремне, перекинутом через два шкива (верхний и нижний).

Управление системой дистанционное. Предусмотрено два режима: калибровка в фиксированной точке, задаваемой оператором, и автоматическое сканирование диапазона высот до 1200 мм с шагом от 50 до 150 мм. Серединой детектора по калибрующей шкале считается уровень 350 мм.

Калибровочная система по умолчанию работает в канале мишени, но при необходимости может быть перемещена в любой из калибровочных каналов гамма-кетчера.

2 Анализ калибровочных данных детектора

2.1 Используемый источник

В качестве калибровочного источника в работе использовался ^{60}Co с периодом полураспада $T_{\frac{1}{2}} = 5,27$ года. Распад ^{60}Co с вероятностью 99,7% происходит с образованием возбуждённого ядра ^{60}Ni , электрона и электронного антинейтрино:



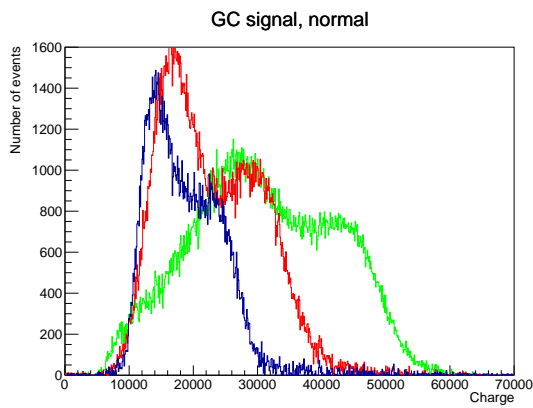
Возбуждённое ядро ^{60}Ni переходит в основное состояние, испуская каскадом два гамма-кванта с энергиями 1,17 МэВ и 1,33 МэВ. Регистрация гамма-квантов происходит за счёт комптоновского рассеяния и фотоэффекта в сцинтилляторе. Детектор iDREAM регистрирует суммарную энергию, переданную гамма-квантами.

2.2 Проведение измерений

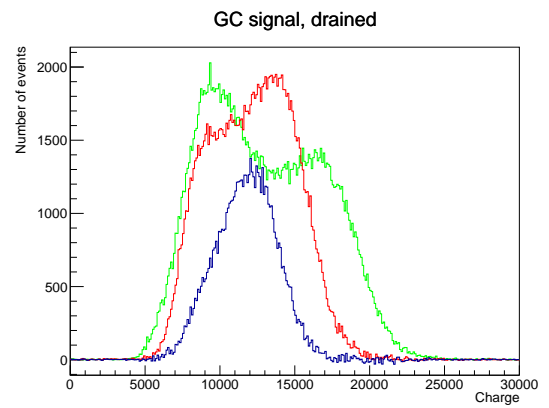
Источник последовательно помещался в ГК в точки с вертикальными координатами от 0 до 1000 мм с шагом 100 мм. Набор статистики в каждой точке проводился в течение 100 секунд. Измерения выполнялись для двух конфигураций детектора: при полном заполнении ГК сцинтиллятором и при пониженном уровне жидкости, когда фотокатоды ФЭУ переставали быть покрытыми сцинтиллятором.

На рисунке 3 приведён пример энергетических спектров событий от источника, помещённого в один из калибровочных каналов ГК в точке $z = 0$ мм (синий), $z = 400$ мм (красный) и $z = 800$ мм (зелёный). Правый пик в каждом спектре соответствует полному поглощению энергии обоих гамма-квантов: 1.17 и 1.33 МэВ. Левый пик – энергии одного из двух гамма-квантов, когда второй вылетел за пределы ГК.

Из графиков видно, что при перемещении источника вверх спектр смещается в сторону больших энергий, что свидетельствует об увеличении количества света, собираемого ФЭУ. Чтобы определить зависимость светосбора от высоты источника, для каждого спектра было произведено



(a) Нормальный режим работы



(b) После слития сцинтиллятора

Рис. 3: Зарядовые спектры, снятые гамма-кетчером, для различных положений источника: синий для координаты 0 мм, красный – 400 мм, зелёный – 800 мм.

фитирование правого края функцией Гаусса (см. рисунок 4).

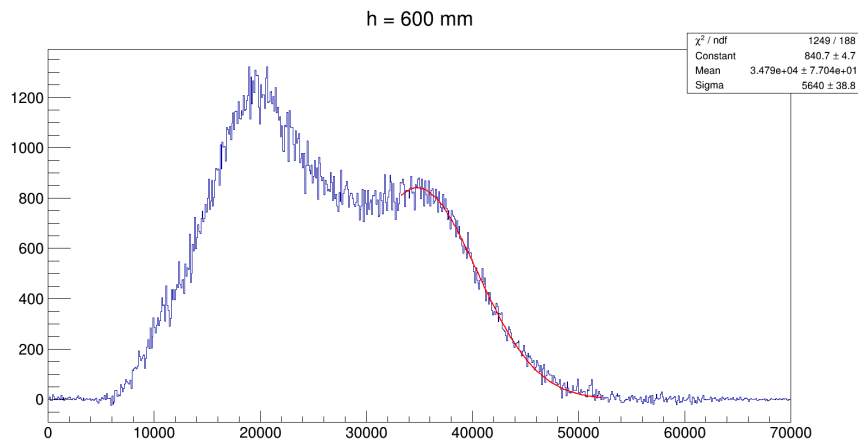


Рис. 4: Принцип фитирования правого края.

По результатам аппроксимации была найдена зависимость положения правого пика от положения источника в калибровочном канале. Полученная зависимость изображена на рисунке 5. За единицу по шкале ординат был принят уровень Q_{500} , соответствующий положению источника в геометрическом центре ГК ($h = 500$ мм).

Из графиков видно, что наибольший разброс наблюдается при полностью залитом сцинтилляторе (красная кривая) и он составляет $[-24\%, +56\%]$. Количество собранного света уменьшается по мере удаления источника от ФЭУ ГК и растёт по мере приближения к ФЭУ.

Слив 150 л ЖОС из ГК улучшает неоднородность до $[-12\%, +22\%]$. Вместе с тем, это приводит к появлению границы двух сред ЖОС-воздух и

двукратному падению светособирания из-за эффекта полного внутреннего отражения.

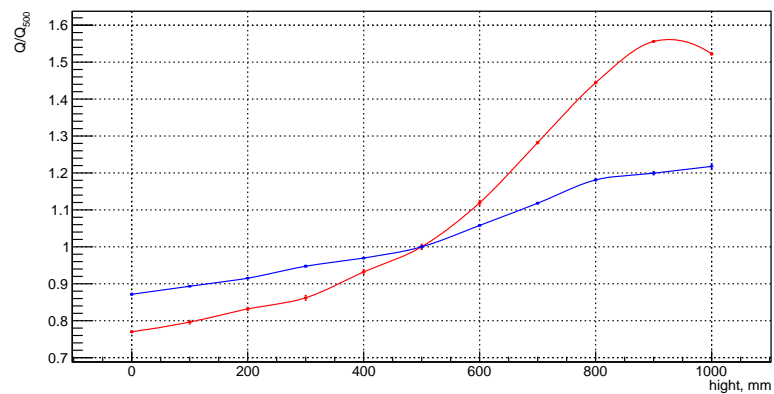


Рис. 5: Кривые неоднородности светособирания для нормального (красная) и слитого (синяя) состояния детектора. В качестве единицы по оси ординат был выбран заряд Q_{500} , соответствующий светосбору при положении источника в середине ГК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы была экспериментально изучена неоднородность светосбора в гамма-кетчере детектора iDREAM. С использованием калибровочного источника ^{60}Co были получены энергетические спектры для 11 координат источника в диапазоне от 0 до 1000 мм. Измерения проведены для двух конфигураций детектора: штатной (полное заполнение сцинтиллятором) и при сливе 150 л сцинтиллятора (без покрытия ФЭУ).

Установлено, что светосбор в гамма-кетчере существенно зависит от вертикальной координаты события. Относительная неоднородность в штатном режиме составила от -24% до $+56\%$ относительно центра ГК (координата 500 мм), что свидетельствует о значительном изменении условий сбора света по высоте детектора. Наблюдаемое при больших высотах отклонение от монотонного возрастания сигнала объясняется попаданием источника в область между ФЭУ.

Показано, что слитие 150 л ЖОС из ГК приводит к улучшению геометрической неоднородности светособирания с $[-24\%, +56\%]$ до $[-12\%, +22\%]$.

Список литературы

- [1] Abramov A. et al. iDREAM: industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant //Journal of Instrumentation. – 2022. – Т. 17. – №. 09. – С. P09001.
- [2] Громов М. Б. и др. Промышленный детектор iDREAM для мониторинга режимов работы атомных реакторов нейтринным методом //Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2015. – №. 3. – С. 26-31.
- [3] Strumia A., Vissani F. Precise quasielastic neutrino/nucleon cross-section //Physics Letters B. – 2003. – Т. 564. – №. 1-2. – С. 42-54.
- [4] Declais Y. et al. Study of reactor antineutrino interaction with proton at Bugey nuclear power plant //Physics Letters B. – 1994. – Т. 338. – №. 2-3. – С. 383-389.