

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

РЕФЕРАТ
ДЛЯ УНИВЕРСИАДЫ "ЛОМОНОСОВ"

ПО ТЕМЕ
ОПТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА НЕЙТРИННОГО
СПЕКТРОМЕТРА iDREAM

Выполнил студент 413 группы Замогильный К.Р.
Научный руководитель: Чепурнов А.С.

Москва, 2020.

1 Введение

Промышленный детектор iDREAM [1] предназначен для мониторинга режимов работы (тепловой мощности и режима остановки) атомных реакторов нейтринным методом [2], а также для проведения независимой оценки накопления плутония в топливе. Измерения на детекторе ведутся непрерывно в течении всей кампании реактора, которая длится около трех лет. В связи с этим необходимо быть уверенным, что все компоненты детектора находятся в рабочем состоянии, а физические характеристики стабильны. Для контроля функционирования детектора была разработана калибровочная система на основе генератора ультрафиолетовых импульсов.

2 Промышленный детектор iDREAM

Промышленный нейтринный детектор iDREAM представляет собой сцинтилляционный спектрометр на основе жидкого органического сцинтиллятора. Конструкция детектора (рис. 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. Детектирование реакторных антинейтрино осуществляется через реакцию обратного бета-распада. Регистрация данной реакции осуществляется по последовательности двух событий: от позитрона (ионизация среды с последующей аннигиляцией) и нейтрона (захват в мишени с излучением гамма-квантов). Техника задержанных совпадений позволяет сильно подавить фон [3].

Пространство внутреннего бака под мембраной объемом 1 м^3 заполняется гадолинизированным жидким органическим сцинтиллятором (ЖОС)[2] и является мишенью детектора. Доступ к мишени обеспечивается через вертикальную трубку из ПММ, вклеенную в центр мембраны, верхний конец которой выходит за пределы бака. Сцинтиллятор разработан на основе российского линейного алкилбензола (ТУ 2414-028-05766480-2006) с введенными в него шифтером РРО(3 г/л) и флером РОРОР (0.03 г/л) [4,5]. Добавки предназначены для смещения излучаемого сцинтиллятором спектра в зону максимальной квантовой эффективности ФЭУ. Для повышения эффективности захвата нейтрона ЖОС допирован гадолинием с большим сечением захвата нейтронов ($\sim 250\ 000$ барн для ^{57}Gd).

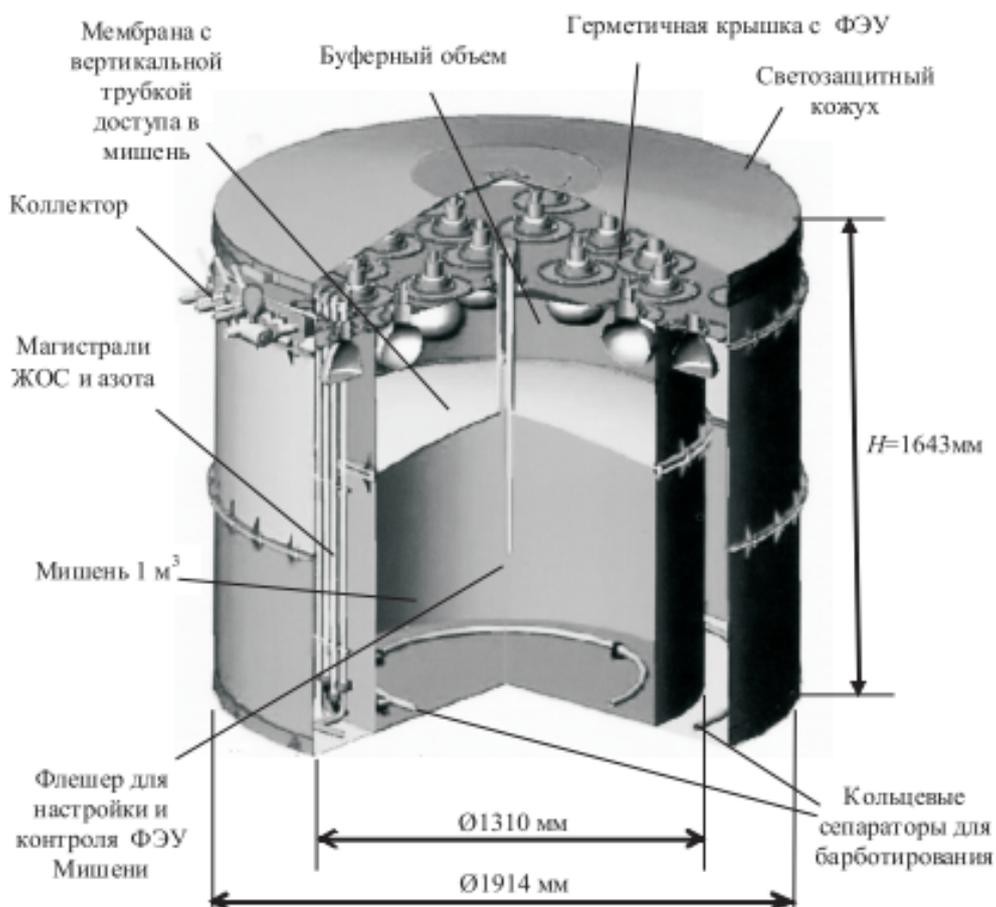


Рис. 1: Конструкция детектора iDREAM

3 Система калибровки на основе генератора УФ импульсов

Можно проверить стабильность детектора, применяя традиционный способ, который включает в себя использование радиоактивных источников, но для iDREAM во время эксплуатации на АЭС, режимном объекте, данный способ не подходит, так как доступ на АЭС с радиоактивными источниками существенно ограничен. Во вторых, детектор герметичен и для избежания контакта сцинтиллятора с кислородом детектор держится под азотной атмосферой, то есть смена или извлечение радиоактивного источника может потребовать снятия на время азотной атмосферы, что представляет повышенную опасность для сцинтиллятора. В качестве альтернативного варианта в НИЯФ МГУ была разработана система калибровки с помощью генератора ультрафиолетовых импульсов, позволяющая имитировать реальные физические события от радиоактивного источника с помощью ультрафиолетового светодиода, излучающего на длине волны возбуждения сцинтиллятора.

При взаимодействии заряженной частицы со сцинтиллятором внутри детектора происходит образование фотонов видимого диапазона. С другой сто-

роны, большинство сцинтилляторов возбуждаются ультрафиолетовой компонентой излучения с дальнейшим переизлучением оптических фотонов. Так как спектр излучения сцинтиллятора не зависит от способа его возбуждения, и измерение энергии события осуществляется через интегрирование собранного фотодатчиком заряда, то через механизм флюоресценции можно симитировать механизм сцинтилляции с образованием идентичного числа фотонов. В связи с тем, что временные характеристики сцинтилляционных процессов по порядку величин составляют наносекунды, на подаваемый ультрафиолетовый импульс накладывается условие идентичной длительности.

В связи с этим система была собрана на основе наносекундного светодиодного импульсного генератора [6]. Длительность импульса и длина волны позволяют достоверно имитировать сцинтилляцию, но с определенными ограничениями: сцинтиллятор поглощает ультрафиолет на расстоянии меньшем 0.1 миллиметра, соответственно, достоверная имитация возможна лишь для "точечных" событий, то есть для заряженных частиц с малым пробегом. Таким образом, можно достоверно осуществить, к примеру, имитацию аннигиляции позитрона или радиационного захвата нейтрона, так как в масштабах детектора процессы можно считать "точечными". Имитация событий с участием заряженных частиц порядка 10 МэВ, к примеру электронов бета-распада, не обладающих малым пробегом, окажется не совсем правдивой с геометрической точки зрения, но с точки зрения продуцированных фотонов и собранного заряда будет близка к реальному событию.

Система спроектирована в двухканальном исполнении [7]. Также можно регулировать независимо амплитуду импульсов на каждом из каналов, задержку между каналами и частоту повторений. Данные принципы позволяют расширить метод для имитации двухчастичных событий, например, для реакции обратного бета-распада. Также система позволяет сдвигать два импульса к друг другу для изучения разрешающей способности детектора в случае наложения сигналов и для отработки алгоритмов режекции наложений в тракте обработки сигнала.

Для наблюдения за стабильностью работы калибровочной системы и характером зависимости энергии УФ сигналов от поданного на светодиоды напряжения в режиме реального времени используется линия контроля мощности, реализованная на основе ФЭУ Hamamatsu H7732P-01 с боковым фотокатодом. Уровень гарантированной стабильности линии контроля в ходе предварительных испытаний с высокостабильным источником (лазером) оказался около 1%.

3.1 Структурная схема светодиодной системы энергетической калибровки

Общая схема [8] представлена на рис.2. Модуль управления вырабатывает сигналы запуска, передаваемые на двухканальный флэшер, а также в триггерные устройства систем сбора данных. Флэшер создаёт световые вспышки, подаваемые на оптический сумматор-делитель 2x2. В последнем

Калибровочная система на основе управляемого двухканального светодиодного генератора наносекундных ультрафиолетовых импульсов

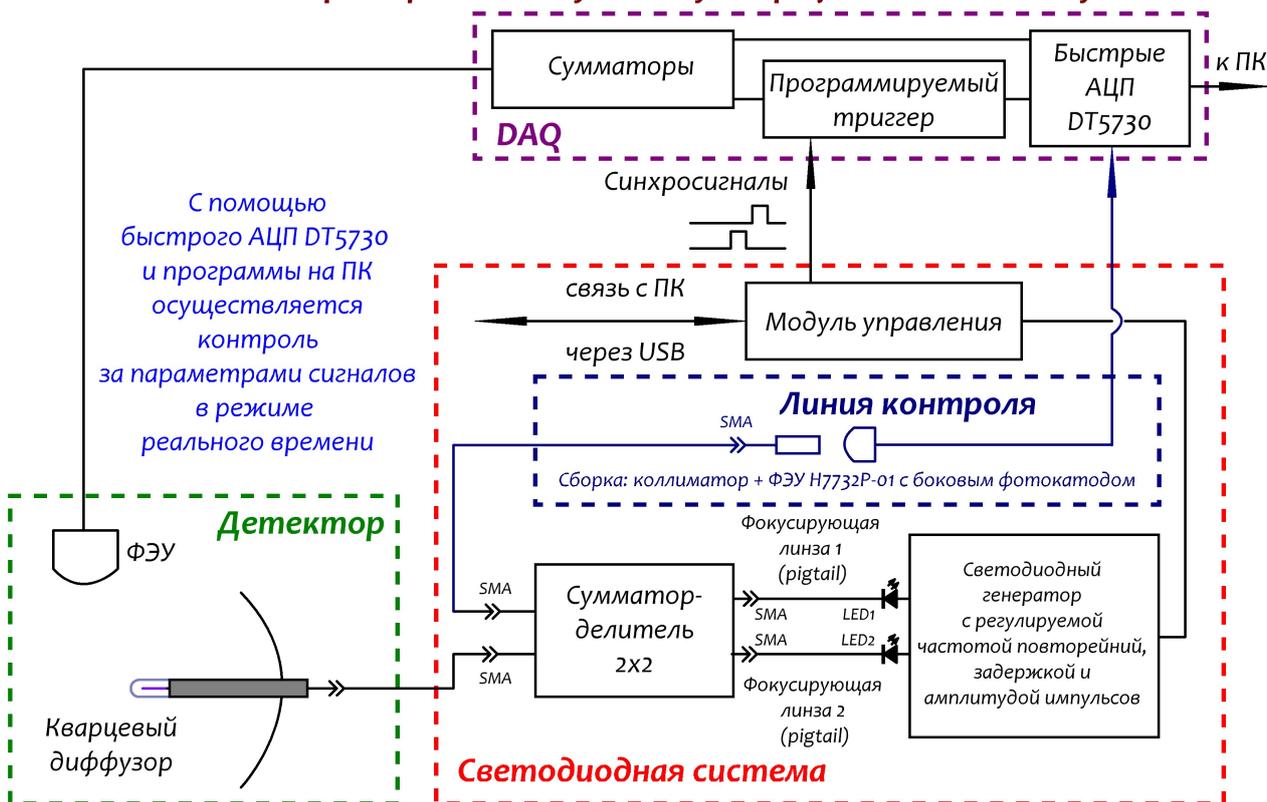


Рис. 2: Структурная схема калибровочной системы

происходит объединение двух сигналов в один с учётом временных задержек и последующее деление полученного сигнала на два одинаковых сигнала, выдаваемых на два выхода сумматора-делителя. Один сигнал по длинному оптоволокну с рассеивателем на конце передаётся напрямую в детектор в заданную точку, другой по короткому оптическому волокну поступает на линию контроля, связанную с измерительным трактом для наблюдения за параметрами УФ сигналов в режиме реального времени [9].

4 Измерения стабильности калибровочной системы

Первоочередно были проведены исследования стабильности с целью убедиться, что уровень стабильности калибровочной системы [10] выше уровня стабильности детектора.

Для этого конец оптоволоконка, находящийся внутри кварцевой колбы, был погружен в центр детектора. Данные снимались с трех каналов АЦП: нулевой - суммарный сигнал от восьми ФЭУ в детекторе, так называемый первый массив ФЭУ, первый канал - суммарный с остальных восьми, массив ФЭУ №2, второй - с линии контроля. На протяжении нескольких часов снимались трехминутные спектры (180 000 событий) для заданного напряжения на светодиоде. Измерения повторялись через заданный промежуток времени, в течение всего эксперимента все параметры системы оставались неизменными.

Примеры полученных спектров и соответствующей обработки результатов измерений для напряжения на светодиоде в 50% (7.5 В) с использованием ультрафиолетового светодиода представлены на рисунках 3 и 4 соответственно. Рис. 3 представляет собой спектр, полученный после 256 минут с момента включения калибровочной системы. На нем изображены

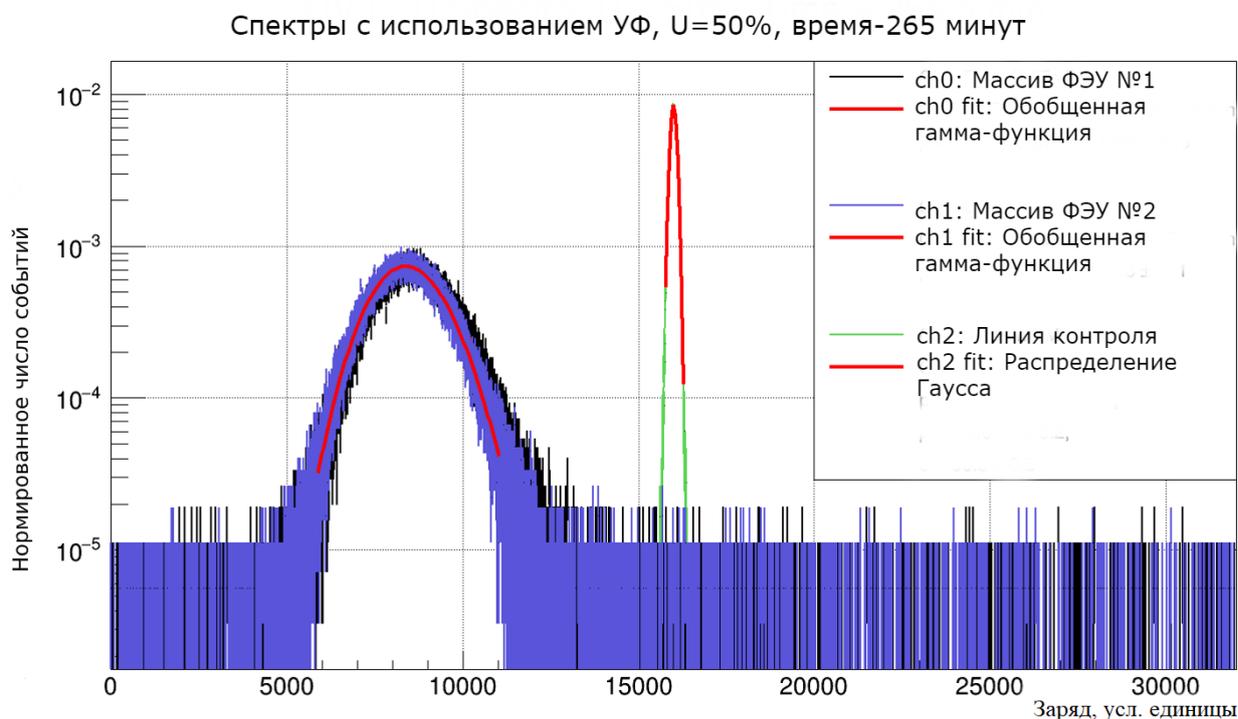


Рис. 3: Спектры с массивов ФЭУ и линии контроля

результаты с нулевого, первого и второго каналов. Длительность измерений составила чуть больше 4 часов. По оси X представлен заряд в условных еди-

ницах, по оси Y число событий, нормированное на полное число событий (180 000).

Спектр на втором канале наиболее узкий, так как данные на него поступают с линии контроля, куда свет попадает непосредственно со светодиода. Спектры со второго канала аппроксимировались распределением Гаусса, затем значения средних для каждого трехминутного эксперимента сравнивались между собой и аппроксимировались прямой. Так как ФЭУ с линии контроля, как говорилось в пункте 3 параграфа 3, обладает стабильностью порядка 1%, то в связи с тем, что идентичную точность можно наблюдать и на рис.4, можно сделать вывод об уровне стабильности калибровочной системы порядка 1%.

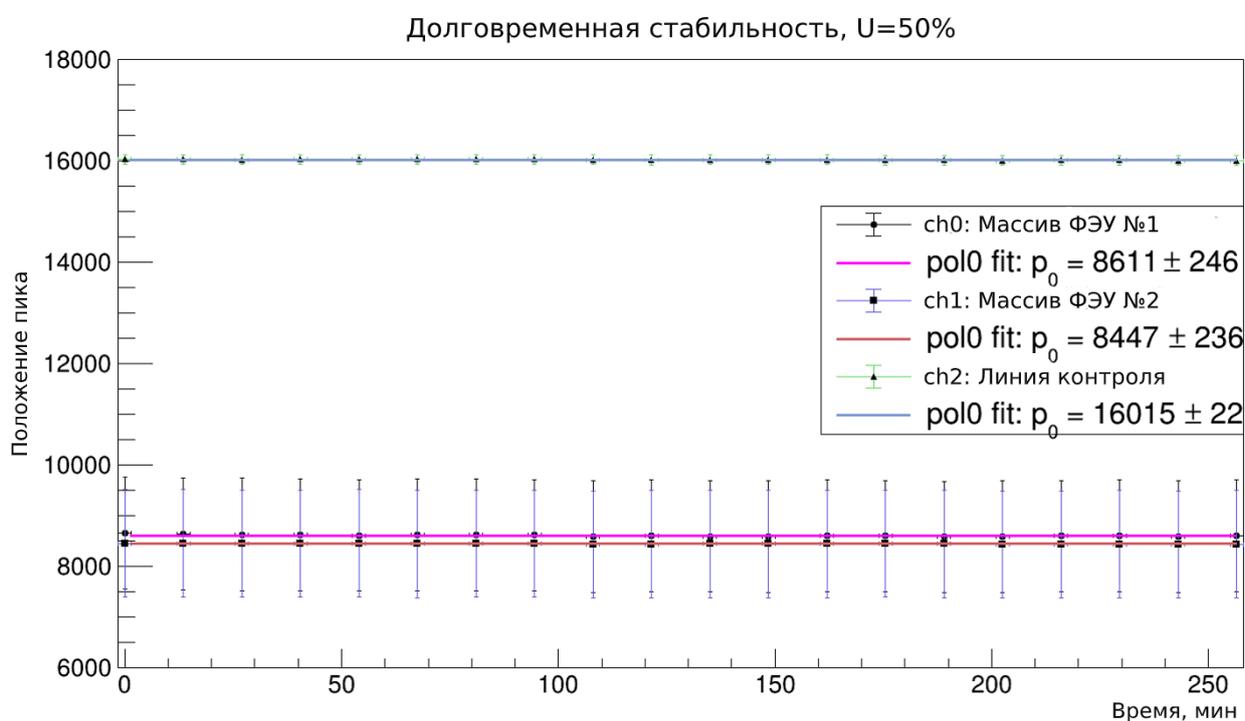


Рис. 4: График стабильности

Спектры с нулевого и первого каналов характеризуются идентичной шириной и небольшим смещением относительно друг друга. Полученные в различные моменты времени спектры аппроксимировались обобщенной гамма-функцией [11]. Данная функция была выбрана по причине того, что наилучшим образом аппроксимирует спектр, правда дает большую погрешность среднего значения. Распределение Гаусса же давало меньшую погрешность, но существенно хуже аппроксимацию. Данные из аппроксимации также сравнивались между собой и аппроксимировались прямой (рис.4). Уровень стабильности детектора оказался около 3%.

На самом АЭС измерения стабильности будут носить периодический характер за короткое время порядка нескольких недель. Короткий промежу-

ток времени позволяет допустить, что характеристики детектора не успели измениться. Данные, снятые в различные дни, с одним и тем же напряжением на светодиоде сравниваются между собой. В случае, если данные с линии контроля стабильны, а данные с массивов ФЭУ оказываются нестабильны, можно сделать вывод о выходе из строя или ухудшении характеристик какой-либо части детектора: сцинтиллятора, электронно-измерительного тракта и т.д.

5 Заключение

Полученные результаты показали стабильность работы детектора и калибровочной системы. Проведенные эксперименты дают возможность утверждать, что данная система может быть встроена в детектор iDREAM, способна заменить калибровки с использованием радиоактивных источников и обеспечить необходимый на АЭС автоматизированный режим работы в течение всей кампании.

Список литературы

- [1] М. Б. Громов, Г. А. Лукьянченко, Д.С. Марков, Г.Я.Новикова, Б.А. Обиняков, А.Ю. Оралбаев, М. Д. Скорохватов, С.В. Сухотин, А. С. Чепурнов, А. В. Этенко// Промышленный детектор iDREAM для мониторинга режимов работы атомных реакторов нейтринным методом.
- [2] Borovoi A., Mikaelyan L. // Atomic Energy. 1978. 44. P. 508.
- [3] Reines F. // Science. 1979. 203, N 4375. P. 11.
- [4] Скорохватов М.Д., Нурахов Н.Н., Сухотин С.В., Этенко А. // Докл. РАН. 2011. 436, № 6. С. 1.
- [5] Бакулина Н.И., Безруков Л.Б., Волжанина А.Б. и др.// Препринт ИЯИ РАН 1387/2014.
- [6] J. S. Kapustinsky et al. // NIMPA. 1985. Vol. 241, No 2–3. Pp. 612–13.
- [7] A. Chepurnov et al. // J. Phys.: Conf. Series. 2017. Vol. 798, No 1. P. 012118.
- [8] Chepurnov A. S., Gromov M. B., Shamarin A. F. // J. Phys.: Conf. Series. 2016. Vol. 675, No 1. P. 012008.
- [9] Громов М. Б.//Кандидатская Диссертация "Регистрация нейтрино с энергиями от 1 до 50 МэВ с помощью детектора Borexino."
- [10] Lubsandorzhiiev B. K., Vyatchin Y. E.// Stability studies of nanosecond light sources based on blue ultra bright LEDs. 2004.
- [11] O. Ju.Smirnov//Nucl.Instrum.Meth.A595:410-418,2008.