

НЕЙТРИННЫЙ СПЕКТРОМЕТР DANSS: КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА, СТАБИЛЬНОСТЬ ОТКЛИКА И ИЗУЧЕНИЕ СВЕТОВОХОДА

*И. Г. Алексеев^{a, б, в}, В. В. Белов^г, М. В. Данилов^{б, в, д}, И. В. Житников^{г, 1},
А. С. Кобякин^{а, б}, А. С. Кузнецов^г, И. В. Мачихильян^{а, б, 2}, Д. В. Медведев^г,
В. Ю. Русин^а, Д. Н. Свирида^{а, б}, Н. А. Скробова^{а, б, д}, А. С. Старостин^{а, б},
Е. И. Тарковский^а, М. В. Фомина^г, Е. А. Шевчик^г, М. В. Ширченко^г*

^a Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

^б Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

^в Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

^г Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^д Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

Нейтринный эксперимент DANSS предназначен для мониторинга параметров ядерного реактора и поиска стерильных нейтрино на основе прецизионного анализа отношения спектров реакторных антинейтрино, измеренных на различном расстоянии от центра горения. Детектор имеет дуальную систему фотоприема, включающую в себя вакуумные фотоумножители (ФЭУ) и кремниевые фотоумножители (КФЭУ). Подробно обсуждаются методики, разработанные для калибровки отклика каждого типа фотодетекторов. Приводятся результаты измерения долговременной стабильности критических параметров установки и их зависимости от внешней температуры. Описаны исследования световых выходов детектора, произведенные независимыми методами для КФЭУ и ФЭУ.

The DANSS neutrino experiment is aimed at monitoring of a nuclear reactor and searches of a hypothetical sterile neutrino state by means of the precise analysis of the ratio of antineutrino spectra measured at different distances from the reactor core. The detector has a dual light readout system employing vacuum photomultipliers (PMT) and silicon photomultipliers (SiPm). The techniques developed to calibrate a response of each type of photodetector are discussed in detail. The measurements of the long-term stability of crucial spectrometer parameters and their temperature dependencies are presented. The studies on the detector light yield, conducted independently by means of the SiPm and PMT systems, are described.

PACS: 29.40.Mc; 29.40.Vj; 85.60.-q; 07.05.Kf

¹E-mail: i.zhitnikov@gmail.com

²E-mail: machikhiliyan@itep.ru

1. ЭКСПЕРИМЕНТ DANSS

Компактный нейтринный спектрометр DANSS [1] расположен под активной зоной одного из промышленных реакторов Калининской АЭС. Структура установки оптимизирована для отбора и реконструкции событий обратного β -распада $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. В отличие от предыдущих экспериментов подобного типа, чувствительный объем детектора выполнен из пластмассового сцинтиллятора, что позволило избежать использования горючих и токсичных материалов. Это дало возможность разместить установку всего в нескольких метрах от центра горения, чтобы в полной мере воспользоваться преимуществом высокой плотности потока антинейтрино.

Тело детектора представляет собой куб, собранный из отдельных пластин сцинтиллятора (или стрипов) длиной 1 м с поперечным сечением 4×1 см. Каждая пластина

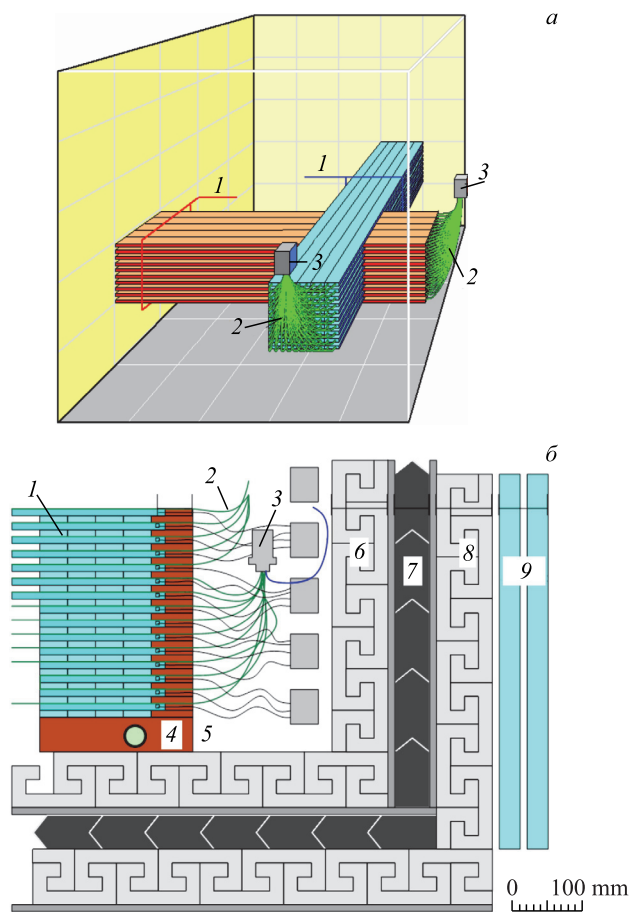


Рис. 1. а) Схема устройства детектора: 1 — стрипы одного модуля; 2 — спектросдвигающие волокна; 3 — фотоумножитель. б) Структура защитного экрана: 1 — чувствительный объем; 2 — спектросдвигающие волокна; 3 — фотоумножитель; 4 — медные рамы; 5 — зазор фотодетекторов; 6 — внутренний экран из борированного полиэтилена; 7 — слой свинца; 8 — внешний экран из борированного полиэтилена; 9 — счетчики ВЕТО

имеет специальное покрытие, в состав которого входит гадолиний с высоким сечением радиационного захвата тепловых нейтронов. Один горизонтальный слой спектрометра составлен из 25 стрипов. Слои уложены друг на друга таким образом, что каждый следующий повернут относительно предыдущего на 90° , как показано на рис. 1, *а*. Жесткость конструкции обеспечивается медными рамами, каждая из которых удерживает по две плоскости взаимно перпендикулярных стрипов. Двадцать последовательных слоев формируют секцию — базовую структурную единицу установки. Полный детектор собран из пяти смонтированных друг на друга секций с добавлением верхней и нижней медных пластин. Общий чувствительный объем составляет 1 м^3 .

Благодаря своему расположению установка хорошо защищена сверху от космического излучения толстыми массивами бетона, телом реактора и резервуарами с технологическими жидкостями. Порядка 50 м эквивалентного слоя воды практически ликвидируют вклад быстрых нейтронов от дальних источников и уменьшают мюонную компоненту фона примерно в шесть раз. Детектор также окружен многослойным экраном пассивной и активной защиты, чья структура проиллюстрирована рис. 1, *б*. Пассивная защита служит для подавления гамма-фона, равно как и тепловых и надтепловых нейтронов. Ее составляют медные рамы детектора (толщина 5 см), внутренний экран из борированного полиэтилена (8 см), слой свинца (5 см) и внешний экран из борированного полиэтилена (8 см). Поверх последнего установлены 32 прямоугольные сцинтилляционные пластины активной защиты, два слоя которых покрывают верхнюю и боковые грани куба. Дополнительные 8 сцинтилляционных счетчиков перекрывают мертвые зоны боковых ребер. Эта система ВЕТО предназначена для дальнейшего подавления мюонной компоненты космического фона.

Вся экспериментальная установка размещена на подъемнике, дающем возможность набирать данные на различных расстояниях от центра реактора. Для уменьшения систематических ошибок смена положения детектора производится каждые два-три дня. Данные набираются в трех позициях: верхней (10,7 м от центра реактора), нижней (12,7 м) и средней (11,7 м). Такой охват предоставляет прекрасную возможность для поиска нейтринных осцилляций в гипотетическое стерильное состояние в широком диапазоне параметров смешивания. Позиция детектора измеряется автоматически и записывается вместе с данными. На время смены положения набор статистики останавливается.

Выработка триггерного сигнала на события обратного β -распада производится по суммарному мгновенному энерговыделению в детекторе, которое должно превышать порог 0,7 МэВ. В дополнение к этому записываются все события с активностью в системе ВЕТО. Общая частота набора данных составляет 1 кГц. Отобранные события сохраняются в файлах с уникальной нумерацией. В нормальном рабочем режиме работы детектора запись одного файла длится 25–30 мин, при этом каждый из них содержит около 1,5 млн событий. Это дает возможность реконструировать порядка 5000 реакций обратного β -распада в день в ближайшем к реактору положении. Остаточный вклад космических фонов составляет менее 1 %.

2. СИСТЕМЫ СВЕТОСБОРА И ФОТОПРИЕМА

Система светосбора стрипа состоит из трех спектросмещающих оптических волокон Y11 производства Kuraray диаметром 1,2 мм. Они клеены в канавки глубиной 2,5 мм, прodelанные сверху на пластине сцинтиллятора вдоль ее длины на равных расстояниях

друг от друга и от продольных боковых граней. Волокна выводятся к двум типам фотоприемников, которые установлены на двух соседних боковых сторонах детекторного куба: кремниевым фотоумножителям (КФЭУ) и обычным вакуумным фотоумножителям (ФЭУ). Пары крайних волокон сводятся вместе для каждых 50 пластин одинаковой ориентации, которые составляют часть секции шириной в пять стрипов (см. рис. 1, а). Полученный пучок выводится к фотокатоду ФЭУ. КФЭУ осуществляют индивидуальное считывание каждой пластины через центральное волокно. В дальнейшем считываемый торец стрипа будет называться ячейкой детектора, а группа из 50 ячеек, обслуживаемых одним ФЭУ, будет называться модулем. Размеры модуля были выбраны на основе пространственных характеристик типичного нейтринного события, которое в условиях DANSS ограничено сферой диаметром около 30 см.

Описанная выше дуальная система фотоприема базируется на следующей мотивации. В условиях высокой сегментации детектора и ограниченного пространства для размещения фотодетекторов КФЭУ имеют оптимальное соотношение цены и малого размера для организации индивидуального считывания каждой ячейки. Последнее позволяет детализировать пространственную и энергетическую структуру события, что является одним из ключевых факторов при реконструкции реакции обратного β -распада. Тем не менее такие недостатки КФЭУ, как неустранимый низкоамплитудный темновой шум и температурная нестабильность, сильно затрудняют их использование для выработки быстрого и надежного триггерного сигнала. Здесь предпочтение отдано системе традиционных ФЭУ с ее более точной оценкой общих энерговыделений и слабой зависимостью характеристик от внешних условий, но с худшим пространственным разрешением, обусловленным большим размером модуля по отношению к ячейке. В анализ накопленных данных вовлечены показания как КФЭУ, так и ФЭУ, что позволяет использовать сильные стороны каждого типа фотодетекторов и производить разнообразные перекрестные проверки, тем самым улучшая точность и качество измерения спектров реакторных антинейтрино.

Что касается системы ВЕТО, то здесь светосбор осуществляется с двух продольных боковых граней пластин сцинтиллятора. Оптические спектросмещающие волокна выводятся к обычному вакуумному ФЭУ, размещенному у одного из торцов счетчика.

Всего в детекторе DANSS задействованы 2500 КФЭУ, 50 ФЭУ для считывания модулей и 40 ФЭУ системы ВЕТО. Все фотоприемники произведены компанией Hamamatsu Photonics. На детектор установлены компактные ФЭУ R7600U-300 с эффективной зоной фотокатода 18×18 мм и КФЭУ MPPC S12825-050C с чувствительной площадкой $1,3 \times 1,3$ мм, содержащей 667 пикселей. В системе ВЕТО используются фоторегистрирующие модули H10720-20.

Фотодетекторы (исключая систему ВЕТО) и сервисная электроника размещаются в зазоре между медными рамами и внутренним экраном из борированного полиэтилена, образуя две считывающие плоскости. Каждая плоскость обслуживает 1250 ячеек и 25 модулей.

Поскольку пассивная защита сильно затрудняет теплообмен с внешней средой, в зазор введены трубки системы водяного охлаждения. Считывающие плоскости оборудованы набором из 36 температурных датчиков, равномерно распределенных по обеим граням куба. Их показания записываются каждые пять минут программным обеспечением мониторинга, что позволяет контролировать температуру T в местах расположения КФЭУ. Типичные температурные карты плоскостей представлены на рис. 2 с интерполяцией T

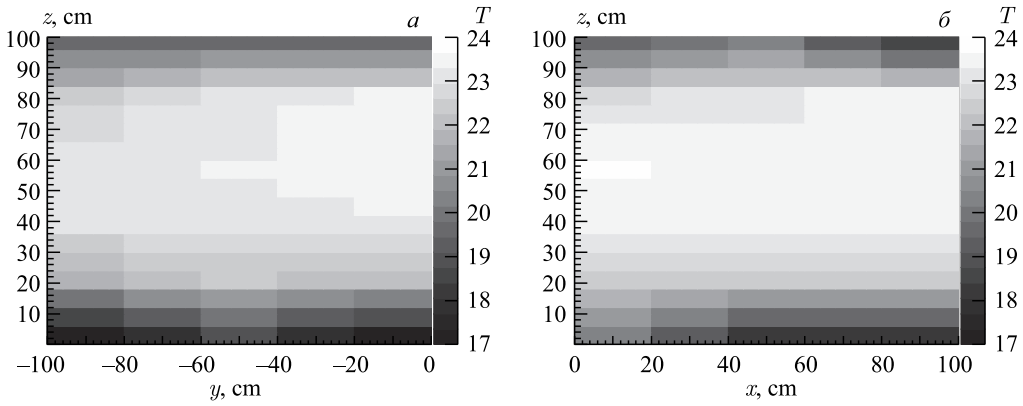


Рис. 2. Характерные температурные карты считывающих плоскостей

в зонах между датчиками. Градиенты температур определяются, в основном, расположением трубок системы охлаждения. Абсолютные значения T варьируются от 17 до 24 °C.

Помимо системы охлаждения в зазор введены 50 тестовых оптических волокон, при помощи которых можно раздавать на фотокатоды ФЭУ свет от внешнего светодиода. Светодиод включается только на время специальных тестовых наборов данных для изучения характеристик ФЭУ (см. разд. 8).

3. ОЦИФРОВКА СИГНАЛА ФОТОДЕТЕКТОРОВ

Считывание фотодетекторов производится системой 64-канальных модулей UWFD64, разработанных в Институте теоретической и экспериментальной физики (Москва) специально для эксперимента DANSS. В их функции входит формирование сигналов, компенсация смещения базовой линии, оцифровка при помощи 12-битных аналогово-цифровых преобразователей (АЦП), буферизация данных и выработка триггерного сигнала. Система КФЭУ обслуживается 44 модулями, еще два дополнительных модуля отведены под считывание ФЭУ детектора и ФЭУ системы ВЕТО соответственно.

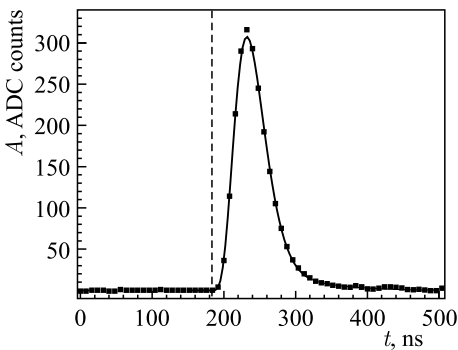


Рис. 3. Типичная временная форма сигнала КФЭУ. Вертикальная линия отмечает время прихода сигнала t_0

Одна из особенностей системы сбора данных эксперимента DANSS состоит в том, что в качестве отклика индивидуального канала записывается не одно показание АЦП, а временная форма сигнала, оцифрованного с шагом 8 нс в окне 512 нс. Последнее формируется вокруг максимума сигнального импульса после выработки триггера на данное событие. Пример типичной временной формы представлен на рис. 3. В небольшом проценте случаев временная форма может быть искажена шумами КФЭУ или паразитными импульсами

Временная форма сигнала, оцифрованного с шагом 8 нс в окне 512 нс. Последнее формируется вокруг максимума сигнального импульса после выработки триггера на данное событие. Пример типичной временной формы представлен на рис. 3. В небольшом проценте случаев временная форма может быть искажена шумами КФЭУ или паразитными импульсами

от физических частиц, случайно попавшими во временное окно. Программное обеспечение первичной обработки производит распознавание сигнального импульса и вычисление его параметров, самыми важными из которых являются время прихода t_0 и интеграл I (нормированный на ширину временного бина 8 нс). Величина I используется как оценка энерговыделения в ячейке, модуле или счетчике ВЕТО. Дополнительный отбор сигналов по величине t_0 способствует подавлению вклада случайных импульсов при реконструкции параметров продуктов реакции обратного β -распада.

4. ОРГАНИЗАЦИЯ КАЛИБРОВОЧНОЙ ПРОЦЕДУРЫ

Энергетическая калибровка призвана установить связь между энерговыделением в ячейке/модуле детектора или счетчике ВЕТО и интегральной величиной I , полученной после первичной обработки временной формы сигнала. Цифровой отклик системы на прохождение частицы зависит от множества факторов: эффективностей преобразования потерянной энергии в сцинтилляционные фотоны и захвата излучения спектросмещающим волокном, затухания светового импульса в процессе его транспортировки к чувствительной области фотоприемника, характеристик последнего при преобразовании света в электрический ток, а также особенностей аналогово-цифрового тракта системы сбора данных. Такие составляющие, как свойства сцинтиллятора и оптических волокон стрипов, хоть и могут различаться для разных каналов детектора, но являются неизменными параметрами. В отличие от них, характеристики фотоприемников могут достаточно сильно зависеть от внешних условий, выбора рабочих настроек, времени непрерывного засвечивания и прочих подобных обстоятельств.

Более чем годичный опыт работы DANSS показал, что из всех внешних факторов наибольшее влияние на стабильность детектора оказывают изменения температуры. Хотя система пассивной защиты и выступает в роли термостата, в зазоре, где расположены фотоприемники, всегда наблюдаются остаточные вариации значения T , связанные, например, с подъемом и опусканием установки. На рис. 4 представлено поведение средней температуры считывающих плоскостей за период долгого непрерывного набора данных с 17 мая по 9 июля 2017 г. с наложением на график движения детектора (штриховая линия). Чем выше положение установки, тем сильнее нагрев считывающих плоскостей.

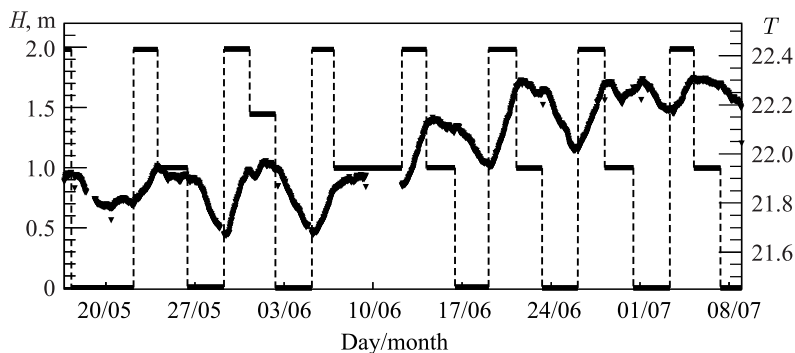


Рис. 4. График изменения средней температуры считывающих плоскостей, наложенный на график движения детектора (штриховая линия) за период с 17 мая по 9 июля 2017 г.

Кроме того, видна общая тенденция к росту температуры, по-видимому, связанная с сезонным потеплением в экспериментальном зале.

Таким образом, одной из важнейших задач становится разработка надежной процедуры, позволяющей производить точную калибровку индивидуального канала детектора как минимум один раз в два-три дня. Наибольшую сложность здесь представляют КФЭУ из-за нелинейной зависимости выходного сигнала от числа регистрируемых фотонов и температурной нестабильности параметров. Помимо этого, в системе КФЭУ возможен небольшой температурный дрейф напряжений питания, который может вносить дополнительный вклад в общие вариации откликов кремниевых фотоумножителей.

Специально для КФЭУ был введен промежуточный этап предварительной калибровки, после которого становится возможным сделать поправки на нелинейность и компенсировать существенную часть температурных эффектов. При разработке методики этой процедуры основным требованием была возможность быстрого вычисления необходимых параметров КФЭУ на основе статистики, сохраненной в одном файле данных.

На следующем этапе производится общая калибровка всех каналов детектора и системы ВЕТО с использованием энерговыделений мюонов. Из-за ограниченного количества космических частиц данная процедура требует анализа значительного объема статистики, эквивалентного нескольким часам накопления данных. Как будет показано в разд. 7, возможные изменения характеристик детектора в данном временном масштабе пренебрежимо малы: температурный дрейф каналов КФЭУ в значительной степени компенсируется на этапе предварительной калибровки, а характеристики ФЭУ, как уже упоминалось выше, в целом отличаются более стабильным поведением.

Подробные описания методик предварительной калибровки КФЭУ и общей калибровки приводятся в разд. 5 и 6 соответственно.

5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ КАЛИБРОВКА КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Кремниевый фотоумножитель [2] представляет собой компактную матрицу p - n -переходов (пикселей), работающих в режиме ограниченного гейгеровского разряда. Падающий на фоточувствительную площадку фотон с некоторой вероятностью генерирует свободный носитель заряда (электрон или дырку), который достигает области умножения и провоцирует лавину в каком-либо p - n -переходе. Пиксель работает в бинарном режиме, т. е. величина его выходного сигнала не зависит от количества свободных носителей, спровоцировавших разряд. Полное показание КФЭУ есть суммарный сигнал пикселей и поэтому при слабых засветках пропорционально числу падающих фотонов. Линейность КФЭУ сохраняется, пока пренебрежимо мала вероятность срабатывания p - n -перехода от двух или более электронно-дырочных пар. С ростом плотности светового потока это условие нарушается и наступает так называемый эффект насыщения. Кривая насыщения КФЭУ описывается следующей зависимостью:

$$N_{\text{pix}} = N_{\text{tot}} \left[1 - \exp \left(\frac{-N_c}{N_{\text{tot}}} \right) \right]. \quad (1)$$

В формуле (1) N_{tot} обозначает полное число пикселей КФЭУ, N_c — среднее количество свободных носителей, способных вызвать гейгеровские разряды, а N_{pix} — начальное число спровоцированных ими лавин. $N_c = N_{\text{ph}} \times \text{PDE}$, где N_{ph} — количество фотонов,

попавших на чувствительную площадку, а PDE — эффективность регистрации света. В определенной мере N_c является аналогом количества фотоэлектронов, испущенных фотокатодом обычного вакуумного ФЭУ.

КФЭУ, используемые в эксперименте DANSS, имеют квадратную чувствительную площадку, к которой подведено оптическое волокно круглого сечения и несколько меньшего диаметра. По этой причине часть пикселей не засвечивается, и в формулу (1) в качестве N_{tot} необходимо подставлять не полное их число, а некоторое меньшее эффективное количество $N_{\text{tot}}^{\text{eff}}$.

Параметр $N_{\text{tot}}^{\text{eff}}$ был измерен экспериментально на самом детекторе при помощи реконструированных треков минимально ионизирующих частиц (МИП). Истинное энерговыделение в детекторе E_{dep} определялось геометрически по длине отрезка трека в пределах одной ячейки. Наиболее вероятная величина удельных потерь энергии МИП была получена посредством детального математического моделирования детектора на основе программного пакета Geant4 [3]. Число лавин N_{pix} вычислялось из интегрального сигнала I с помощью параметров КФЭУ, полученных в ходе предварительной калибровки, которая будет обсуждаться ниже в этом разделе.

Измеренная кривая насыщения представлена на рис. 5. По оси x отложена величина E_{dep} , по оси y — N_{pix} . Аппроксимирующая кривая, показанная штриховой линией, имеет два параметра: $N_{\text{tot}}^{\text{eff}}$ и наклон прямой пропорциональности $N_{\text{pix}} \sim E_{\text{dep}}$ в области малых энергий. Эта прямая $N_{\text{pix}} \sim E_{\text{dep}}$ представлена на рисунке сплошной линией и демонстрирует ожидаемое число пикселей в отсутствие эффекта насыщения. Энергии позитрона в реакции обратного β -распада достигают 8 МэВ, и в этой области вклад эффекта насыщения становится весьма ощутимым. Измеренная величина $N_{\text{tot}}^{\text{eff}}$ составила 512 ± 19 , что существенно отличается от полного числа пикселей $N_{\text{tot}} = 667$.

Еще одной важной особенностью КФЭУ является оптическая связь между пикселями. Гейгеровский разряд приводит к излучению вторичных фотонов, которые, в свою очередь, могут спровоцировать лавины в соседних p - n -переходах. Количественной мерой оптической связи может служить такой параметр, как коэффициент размножения гейгеровских разрядов X , который определяется как среднее число сработавших пиксельных промежутков, приходящихся на одну начальную лавину.

Таким образом, чтобы вычислить из интегрального сигнала I начальное количество сработавших пикселей и получить из него N_c при помощи обратной кривой насыщения, необходимо знать а) коэффициент усиления КФЭУ K в форме вклада в интегральный сигнал лавины в одном p - n -переходе и б) величины X , чтобы пересчитать число зарегистрированных лавин в количество начальных разрядов. Предварительная калибровка кремниевых фотоумножителей состоит в вычислении этих двух параметров индивидуально для каждого канала КФЭУ при помощи анализа спектра его темновых шумов.

В отсутствие внешнего освещения и с приложенным напряжением питания КФЭУ производит импульсы темнового тока малых амплитуд, обусловленные спонтанным воз-

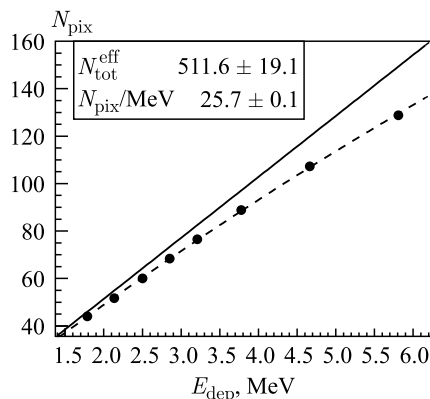


Рис. 5. Кривая насыщения КФЭУ

никновением гейгеровской лавины в пиксельном промежутке. Частота такого шума обычно составляет десятки кГц, варьируясь в зависимости от напряжения питания и внешней температуры. Шумовой импульс ничем не отличается от сигнала, порожденного внешним фотоном. Оптическая связь между пикселями может стать причиной вторичных разрядов, поэтому спектр темновых шумов выглядит как гребенка равноотстоящих пиков убывающей амплитуды.

Пример типичного шумового спектра индивидуального КФЭУ DANSS приведен на рис. 6. Положения пиков P_1, P_2, P_3 и т.д. пропорциональны числу сработавших пикселей. Для получения точных значений P_N шумовой спектр аппроксимируется суммой распределений Гаусса. Коэффициент усиления K дается значением P_1 . Статистика в пиках соотносится как вероятности развития лавин в соответствующем количестве пикселей фотодетектора, что позволяет измерить X . Для вычислений используется аналитическая модель оптической связи КФЭУ, описанная в [4].

Для осуществления предварительной калибровки КФЭУ в систему сбора данных DANSS добавлен так называемый калибровочный триггер, который вырабатывается по наличию ненулевого сигнала в произвольном канале КФЭУ. Из-за высокой частоты темновых шумов сохраняется лишь малая доля отобранных этим триггером событий. Коэффициент прореживания был выставлен таким образом, чтобы статистики шумовых спектров, записываемых в одном файле с данными, хватало для предварительной калибровки каждого канала КФЭУ.

Во время запуска эксперимента вышеописанный метод был использован для выработки карты рабочих напряжений КФЭУ, т.е. для аппаратной калибровки детектора. Начальные напряжения КФЭУ были грубо подобраны так, чтобы иметь примерно одинаковые потребления по току во всех каналах. Далее были набраны два образца данных при разных значениях напряжений V_1 и V_2 . Для каждого КФЭУ были получены параметры прямых $P_1(V)$ и с их помощью были выставлены номинальные напряжения. В качестве рабочей точки было выбрано значение $P_1^{nom} = 70$ каналов АЦП. На рис. 7

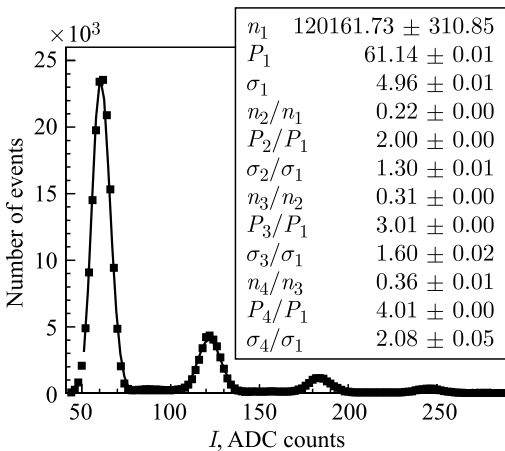


Рис. 6. Пример шумового спектра КФЭУ, аппроксимированный суммой распределений Гаусса (сплошная линия)

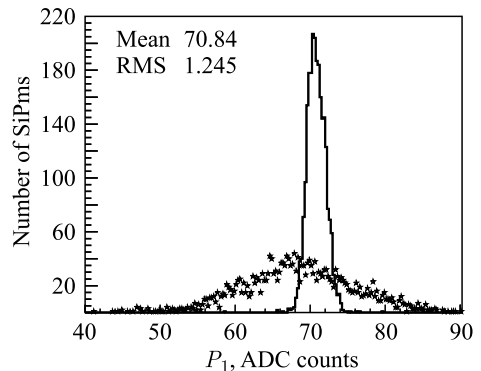


Рис. 7. Распределение P_1 до (звездочки) и после (сплошная линия) аппаратной калибровки КФЭУ

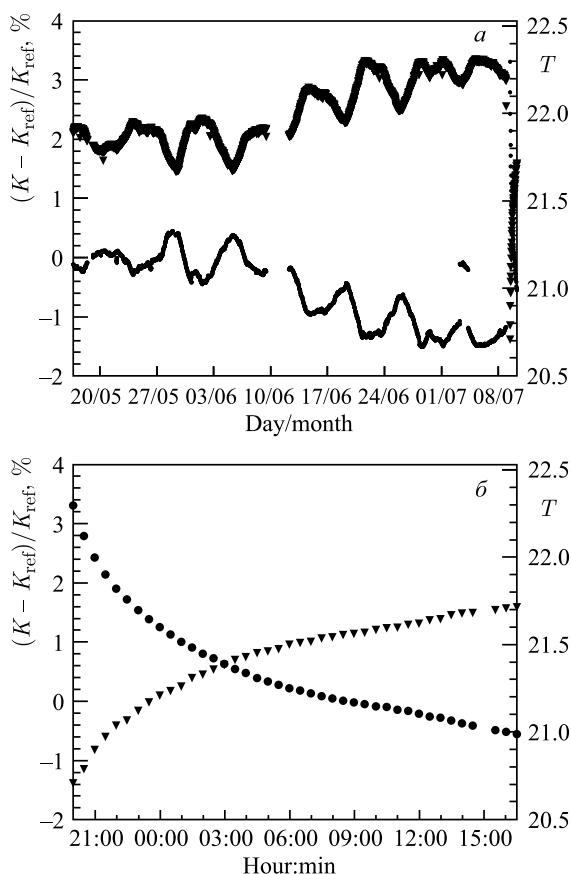


Рис. 8. Среднее относительное изменение коэффициента усиления КФЭУ K за период с 17 мая по 10 июля 2017 г. (кружки, нижние графики). Верхние кривые (треугольники) показывают наложенный график средней температуры. Рис. *a* соответствует всему периоду, рис. *б* показывает в увеличенном масштабе стабилизацию K после отключения электричества

показаны распределения P_1 при номинальных напряжениях до аппаратной калибровки (звездочки) и после нее (сплошная линия). Разброс P_1 был улучшен с 10,6 до 1,8 %, что было заведомо достаточно для начала массового набора физической статистики.

Стабильность параметров K и X за период с 17 мая по 10 июля 2017 г. представлена на нижних графиках (кружки) рис. 8, *a* и 9, *a* соответственно. По оси x отложена дата, по оси y — относительное изменение параметра по отношению к контрольной величине (в процентах), усредненное по всем каналам КФЭУ. Здесь и в дальнейшем в качестве контрольного образца используется файл 20289, набранный 19 мая 2017 г. в районе полудня и относящийся к середине периода относительно стабильных температур, когда детектор не двигался несколько дней (см. рис. 4). Верхние кривые (треугольники) показывают наложенный график T . Видна явная связь изменений величин K и X с вариациями средней температуры. Диапазон времен расширен по сравнению с рис. 4 на 1,5 сут, чтобы захватить первые часы включения установки после десятичасового ава-

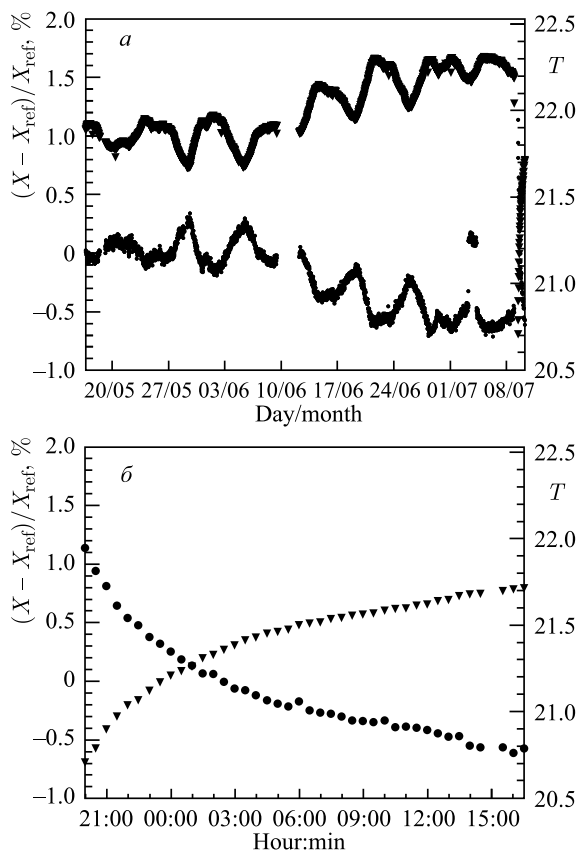


Рис. 9. Среднее относительное изменение коэффициента размножения гейгеровских разрядов X за период с 17 мая по 10 июля 2017 г. (кружки, нижние графики). Верхние кривые (треугольники) показывают наложенный график средней температуры. Рис. *a* соответствует всему периоду, рис. *б* показывает в увеличенном масштабе стабилизацию X после отключения электричества

рийного обесточивания экспериментального зала, когда считывающие плоскости успели заметно охладиться. Рис. 8, *б* и 9, *б* показывают в увеличенном масштабе процесс стабилизации K и X после подачи питания на КФЭУ.

Также обращает на себя внимание выпавшая из графика последовательность точек, соответствующих 3–4 июля 2017 г. Причиной является уникальный случай сбоя в настройке рабочих напряжений нескольких карт питания КФЭУ, который был затем автоматически исправлен программным обеспечением мониторинга.

6. ОБЩАЯ КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА ПО ФИЗИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ

После предварительной калибровки КФЭУ интегральный сигнал I пересчитывается в величину N_c с введением поправки на эффект насыщения. Привязка N_c к физическим единицам производится путем анализа спектров энерговыделений космических мюонов.

Для обычных фотоумножителей, включая фотоприемники системы ВЕТО, аналогичные спектры строятся непосредственно на базе величин I . Рассматриваются только частицы, чье направление движения перпендикулярно сцинтилляторным пластинам, чтобы минимизировать путь, который они проходят внутри ячейки/модуля/пластины счетчика ВЕТО. Особую важность это имеет для ФЭУ, где даже такие сигналы находятся в верхней трети динамического диапазона считывающих АЦП.

Примеры индивидуальных спектров энерговыделений мюонов для КФЭУ и ФЭУ представлены на рис. 10, *a* и *b* соответственно. Четко выраженный пик соответствует сигналу минимально ионизирующей частицы. Резкий обрыв верхнего хвоста распределения в случае ФЭУ объясняется уходом сигнала за верхнюю границу динамического диапазона АЦП. Такие показания исключаются из анализа.

Пики МIP аппроксимируются сверткой распределений Ландау и Гаусса, из которых первое описывает потери частицы при прохождении ее через сцинтиллятор, а второе —

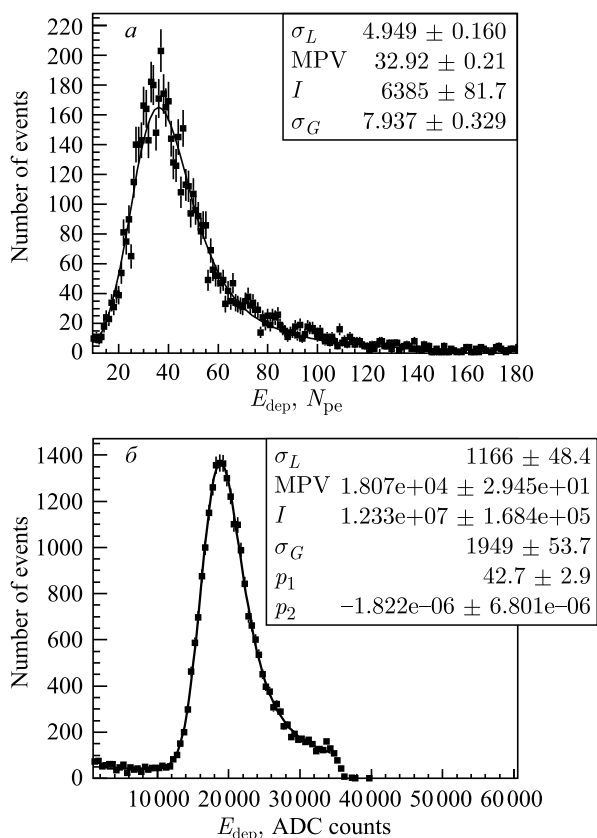


Рис. 10. Примеры распределений МIP для индивидуальных каналов: *a*) КФЭУ; *b*) ФЭУ. Сплошная линия соответствует аппроксимирующей функции. В случае КФЭУ это — свертка распределений Ландау и Гаусса с ширинами σ_L и σ_G соответственно, наиболее вероятным значением MPV и интегралом I . В случае ФЭУ к свертке добавлена экспонента $p_1 \times e^{p_2 \times E_{dep}}$, описывающая фоновую подложку

вероятности генерации фотонами свободных носителей/фотоэлектронов на чувствительной площадке фотодетектора. В случае ФЭУ у пика МIP имеется небольшая фоновая подложка. Для ее описания к аппроксимирующей функции добавляется экспонента.

В качестве калибровочного параметра используется наиболее вероятное значение энергетических потерь MPV_{MIP} . Оно сопоставляется с аналогичной величиной, полученной путем подробного математического моделирования установки DANSS. Данные, моделирующие прохождение космических мюонов, обрабатываются тем же программным кодом, что используется для калибровки детектора. Наиболее вероятное значение энергетических потерь, перпендикулярных МIP, составляет 1,57 МэВ/ячейку, 18,5 МэВ/модуль и 7–12 МэВ/счетчик ВЕТО в зависимости от геометрии последнего.

Один цикл калибровки всех каналов детектора по МIP требует статистики космических частиц, эквивалентной как минимум 30 файлам данных. Это соответствует 13–15 ч стандартного набора. Поскольку, как будет показано в разд. 7, существенная часть температурных эффектов компенсируется на стадии предварительной калибровки КФЭУ, такой частоты циклов более чем достаточно для надежной калибровки детектора и мониторинга стабильности его отклика.

7. ИЗУЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ СЧИТЫВАЮЩЕГО ТРАКТА И КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Изучение стабильности считывающего тракта детектора было произведено на базе статистики, набранной с 17 мая по 10 июля 2017 г. В качестве критерия стабильности использовалось среднее относительное изменение MPV_{MIP} вертикальных МIP по отношению к контрольной величине. Усреднение производилось по всем каналам фотоприемников одинакового типа. Те же самые данные были обработаны двумя способами.

1. Для исследования исходной стабильности был задействован только один набор индивидуальных параметров КФЭУ K и X , выработанный на основе контрольного файла 20289. Результаты этой обработки для КФЭУ представлены на рис. 11. Среднее относительное изменение MPV_{MIP} показано кружками. По оси x отложена средняя дата набора группы из 30 файлов, которые использовались для получения одного набора

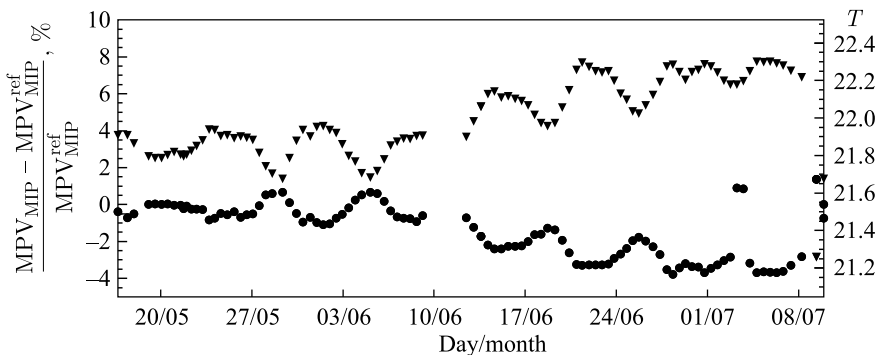


Рис. 11. Стабильность считывающего тракта в отсутствие пофайловых коррекций, КФЭУ (кружки). Треугольники показывают наложенный график средней температуры

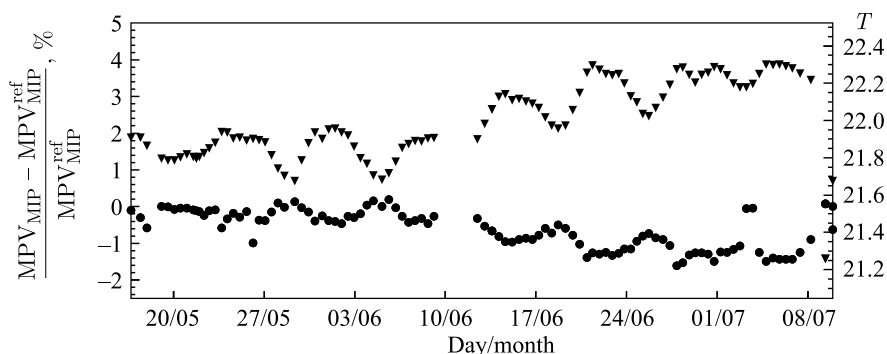


Рис. 12. Стабильность считывающего тракта при введении пофайловых коррекций, КФЭУ (кружки). Треугольники показывают наложенный график средней температуры

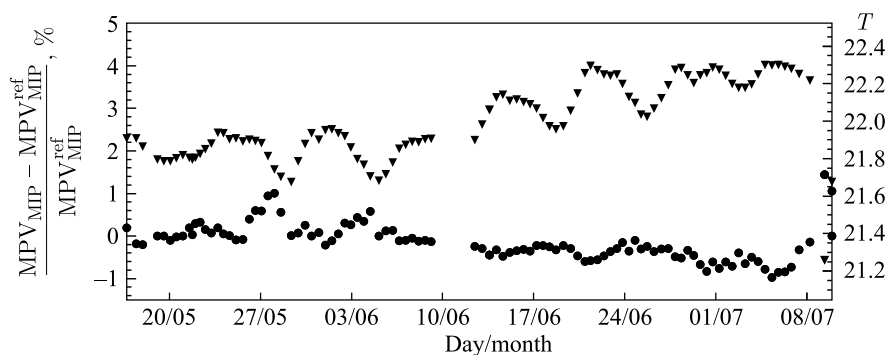


Рис. 13. Стабильность считывающего тракта, ФЭУ (кружки). Треугольники показывают наложенный график средней температуры

спектров энерговыделений космических мюонов. Треугольниками обозначен наложенный график средних температур. В качестве T для группы файлов бралась температура, соответствующая среднему файлу группы, поэтому вариации T выглядят несколько сглаженными по сравнению с пофайловыми графиками, которые приводились выше. В целом можно заключить, что средние вариации MPV_{MIP} КФЭУ достигают почти 5% даже в условиях долговременной непрерывной работы установки.

2. Чтобы оценить, насколько предварительная калибровка КФЭУ компенсирует температурные эффекты, был использован стандартный способ обработки, при котором наборы индивидуальных параметров КФЭУ K и X производятся независимо для каждого файла данных. Результирующие графики показаны на рис. 12. Остаточные вариации не превышают 1,7%. Их наличие можно приписать изменениям эффективности регистрации света PDE, в которую входит температурозависимый множитель, описывающий вероятность возникновения гейгеровского разряда.

Средняя стабильность ФЭУ представлена на рис. 13. В рабочем режиме набора данных средние вариации MPV_{MIP} не превышают $\pm 1\%$. Остаточные изменения характеристик считывающего тракта своевременно компенсируются калибровкой по MIP на подготовительном этапе, предшествующем физическому анализу данных.

8. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВЫХОДА И ЕГО ПРОДОЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Предварительная калибровка КФЭУ дает возможность вычислить такой важный параметр, как световыход ячейки Y , непосредственно из набираемых данных. Световыход определяется как среднее число фотонов, излучаемых сцинтиллятором при поглощении единичного количества энергии. В реальных условиях зачастую не является необходимым разграничивать сам сцинтиллятор, систему светосбора и фотоприемник, поэтому величина Y приводится в терминах количества фотоэлектронов (или свободных носителей заряда).

В условиях DANSS знание Y в основном необходимо для корректного математического моделирования установки, а также для понимания вклада статистических флуктуаций в фотоприемниках в энергетическое разрешение детектора.

Значение Y возможно получить индивидуально для каждой ячейки детектора в процессе калибровки по физическому сигналу как $Y = N_c^{\text{MIP}} / \text{MPV}_{\text{MIP}}$, где MPV_{MIP} есть наиболее вероятное значение энергетических потерь вертикальных MIP в МэВ, а N_c^{MIP} — соответствующее ему число свободных носителей N_c .

Распределение Y для всех рабочих каналов КФЭУ представлено на рис. 14. Оно получено на основе статистики порядка 400 файлов на стабильном участке температурного

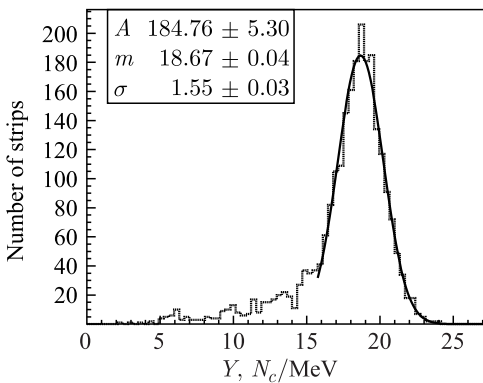


Рис. 14. Световыход стрипов, измеренный с участием КФЭУ

графика при среднем значении T в считывающих плоскостях $21,8^\circ$. Разброс световыхода от ячейки к ячейке обусловлен, в основном, качеством оптического контакта между спектросмещающим волокном и чувствительной площадкой КФЭУ. Небольшое количество каналов с малыми значениями Y возникло из-за нарушения контакта при монтаже одной из нижних секций детектора. Остальные ячейки показывают хорошую однородность световыхода со средним значением 18,67 свободных носителей/МэВ и RMS распределения 8%.

Аналогичная величина световыхода модулей была получена путем засветки ФЭУ короткими импульсами внешнего светодиода (LED). С этой целью было записано несколько образцов данных, набранных при разных амплитудах светового сигнала. Напряжение питания светодиода варьировалось в широких пределах, чтобы перекрыть весь динамический диапазон считывающих АЦП.

При достаточно больших количествах света и фиксированном напряжении на светодиоде выходной спектр сигналов LED представляет собой гауссов пик со средним значением I_{LED} и шириной σ_{LED} . Количество фотоэлектронов N_{pe} определяется по статистической формуле:

$$N_{\text{pe}} = \left(\frac{I_{\text{LED}}}{\sigma_{\text{LED}}} \right)^2. \quad (2)$$

Типичная зависимость N_{pe} от I_{LED} для одного из каналов ФЭУ показана на рис. 15, а. Значения I_{LED} пересчитаны в эквивалент выделенной энергии. Подобные зависимости

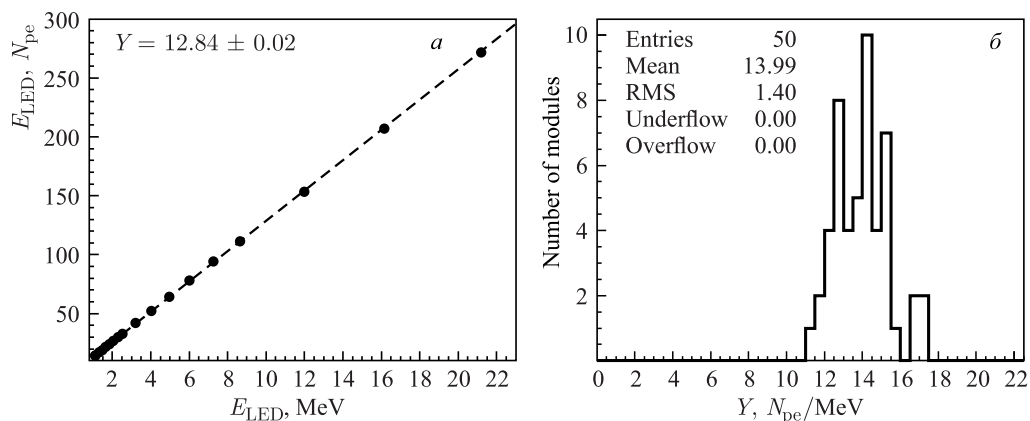


Рис. 15. а) Типичная зависимость количества фотоэлектронов от среднего сигнала LED. б) Световыход модулей, измеренный при помощи ФЭУ

были получены для каждого канала ФЭУ. После этого была произведена аппроксимация каждой из них прямой пропорциональностью, чей коэффициент дал искомую величину Y . Итоговое распределение Y для всех модулей DANSS представлено на рис. 15, б. Среднее значение световыхода составляет 14 ф.э./МэВ с RMS 10%.

При вычислениях N_{pe} по формуле (2) неявно подразумевается, что ширина σ_{LED} определяется только флуктуациями числа электронов, испущенных фотокатодом. Это не совсем верно, так как определенный вклад вносят флуктуации коэффициентов умножения динодов ФЭУ, особенно первого. В условиях DANSS этот вклад ожидается равным 20–30% и может быть устранен, например, анализом однофотоэлектронных процессов. Подобные измерения планируются в будущем. Тем не менее следует подчеркнуть, что с точки зрения математического моделирования важно знать именно общую разрешающую способность ФЭУ.

При распространении света по спектрсмещающему волокну наблюдается его заметное затухание, которое определяется только свойствами этого волокна и одинаково для всех пластин детектора. Из-за этого величина Y зависит от продольного расстояния между местом взаимодействия и чувствительной площадкой фотоприемника.

В значительной доле событий, наблюдаемых в детекторе, регистрируемая частица дает сигнал в каждом из соседних перпендикулярных стрипов, что позволяет определить пространственные точки ее прохождения через пластины и произвести коррекцию продольной неоднородности световыхода. Кривая затухания была измерена при помощи реконструированных треков космических мюонов, которые пересекают множество стрипов и позволяют

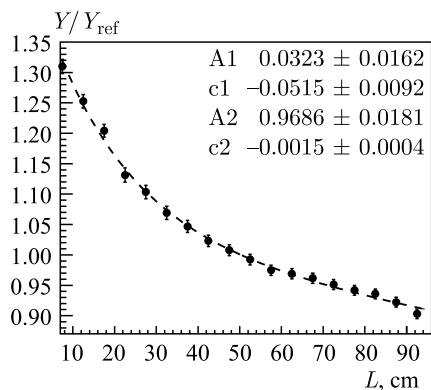


Рис. 16. Продольная неоднородность световыхода стрипа. Штриховая линия соответствует аппроксимации суммой двух экспонент

получить точные оценки пространственных координат. Результат измерений представлен на рис. 16. По оси x отложено продольное расстояние L до КФЭУ, по оси y — отношение MPV_{MIP} к контрольной величине, в качестве которой берется MPV_{MIP} частицы, прошедшей на расстоянии половины длины стрипа. Зависимость аппроксимирована суммой двух экспонент (штриховая линия). Точки, близкие к торцам стрипов, отброшены из-за краевых эффектов. Затухание на всей длине пластины составляет 30 % (по отношению к точке с минимальным L).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нейтронный спектрометр DANSS был введен в эксплуатацию в марте 2016 г. После интенсивного тестового периода, который длился с апреля по сентябрь 2016 г., установка уже год работает в режиме накопления физической статистики. Разработанные калибровочные процедуры с самого начала позволили обеспечить оперативную коррекцию изменений характеристик детектора, в основном обусловленных вариациями внешней температуры. Измеренные величины светосбора стрипов использованы для улучшения математической модели детектора, имеющей решающее значение для изучения эффективности регистрации антинейтрино и оптимизации алгоритмов реконструкции реакции обратного β -распада. Информация о предварительных измерениях спектров реакторных антинейтрино и ограничениях на параметры смешивания стерильных нейтрино неоднократно докладывалась на научных конференциях и опубликована в [5].

С октября 2016 г. установка DANSS ведет мониторинг мощности реактора P . На рис. 17 показан график изменения мгновенного значения P четвертого энергоблока Калининской АЭС за период с октября 2016 г. по середину мая 2017 г., предоставленный сотрудниками АЭС (штриховая линия). Наложенные точки изображают аналогичные измерения DANSS по событиям обратного β -распада. Для нормировки двух графиков

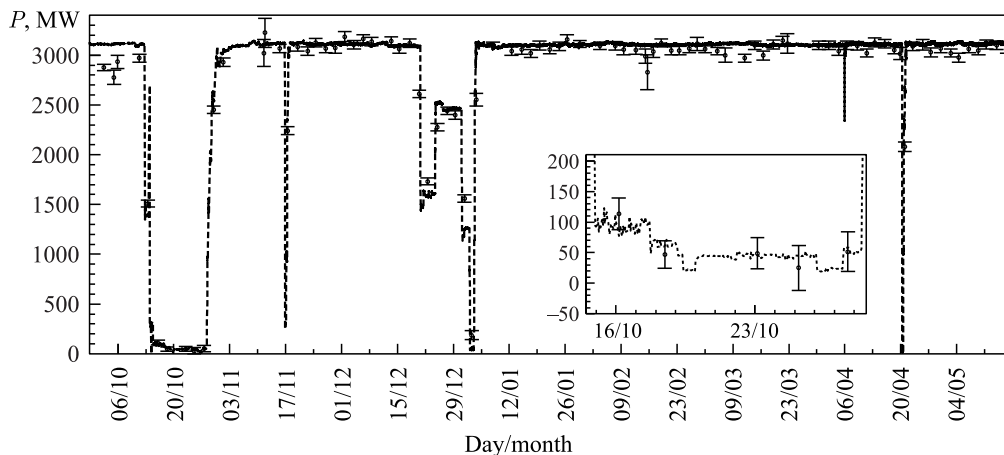


Рис. 17. График изменения мощности четвертого энергоблока за октябрь 2016 г. – май 2017 г. (штриховая линия) с наложенными измерениями DANSS (точки). Врезанный график соответствует периоду частичной остановки энергоблока во второй половине октября 2016 г.

использовались 12 последовательных точек, соответствующих периоду ноябрь–декабрь 2016 г. Данные DANSS, набранные на разных расстояниях r от центра реактора, были перенормированы на ближайшее к реактору положение. Врезанный график показывает в увеличенном масштабе период остановки энергоблока во второй половине октября 2016 г. Видно, что DANSS прекрасно отслеживает работу реактора даже при малых мощностях, подтверждая высокое качество достигнутых характеристик установки.

Разработка калибровочных процедур, изучение стабильности отклика детектора и измерения световыхода стали возможными благодаря поддержке Российского научного фонда в рамках гранта 17-12-01145.

Создание установки и ее запуск были осуществлены при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках государственных контрактов № Н.4х.44.90.13.1119 и № Н.4х.44.9Б.16.1006, а также при частичной поддержке контрактами МОН 3.2989.2017 и 14.А12.31.0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alekseev I. et al. (DANSS Collab.). DANSS: Detector of the Reactor AntiNeutrino Based on Solid Scintillator // JINST. 2016. V. 11, No. 11. P. 11011.*
2. *Клемин С., Кузнецов Ю., Филатов Л., Бужан П., Долгошеин Б., Ильин А., Попова Е. Кремниевый фотоэлектронный умножитель: новые возможности // Электроника: НТБ. 2007. Вып. 8.*
3. *Agostinelli S. et al. Geant4 a Simulation Toolkit // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 506. P. 250–303.*
4. *Gallego L., Rosado J., Blanco F., Arqueros F. Modeling Crosstalk in Silicon Photomultipliers // JINST. 2013. V. 8. P. 05010.*
5. *Alekseev I. et al. (DANSS Collab.). Detector of the Reactor AntiNeutrino Based on Solid-State Plastic Scintillator (DANSS). Status and First Results // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798, No. 1. P. 012152.*

Получено 14 ноября 2017 г.