

Д13-2013-127

И. Г. Алексеев¹, В. В. Белов, В. Б. Бруданин,
З. Гонс, М. В. Данилов¹, В. Г. Егоров*, И. В. Житников,
Д. Р. Зинатулина, А. С. Кобякин¹, Д. В. Медведев,
Р. В. Мизюк¹, Е. Г. Новиков¹, А. Г. Ольшевский, С. В. Розов,
Н. С. Румянцева, В. Ю. Русинов¹, А. В. Саламатин,
А. С. Старостин¹, Д. Н. Свирида¹, Е. И. Тарковский¹,
И. Н. Тихомиров¹, Д. В. Философов, М. В. Фомина,
Е. А. Шевчик, М. В. Ширченко, Ю. А. Шитов, Е. А. Якушев

**DANSSino: ПИЛОТНЫЙ ВАРИАНТ НЕЙТРИННОГО
ДЕТЕКТОРА DANSS**

Направлено в «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

* E-mail: egorov@jinr.ru

Алексеев И. Г. и др.

Д13-2013-127

DANSSino: пилотный вариант нейтринного детектора DANSS

DANSSino представляет собой уменьшенную пилотную версию твердотельного детектора реакторных антинейтрино, который создается по проекту DANSS и будет установлен под промышленным энергоблоком тепловой мощностью 3 ГВт на Калининской АЭС. Многочисленные тесты, проведенные на расстоянии 11 м от центра активной зоны, указывают на работоспособность выбранной конструкции и выявляют основные источники фона. Несмотря на свои малые размеры ($20 \times 20 \times 100$ см), пилотный детектор оказался вполне чувствительным к реакторным антинейтрино, регистрируя около 70 ОБР-событий в сутки при отношении сигнала к фону около единицы.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Alekseev I. et al.

Д13-2013-127

DANSSino: A Pilot Version of the DANSS Neutrino Detector

DANSSino is a reduced pilot version of a solid-state detector of reactor antineutrinos (to be created within the DANSS project and installed under the industrial 3 GW reactor of the Kalinin Nuclear Power Plant — KNPP). Numerous tests performed at a distance of 11 m from the reactor core demonstrate operability of the chosen design and reveal the main sources of the background. In spite of its small size ($20 \times 20 \times 100$ cm), the pilot detector turned out to be quite sensitive to reactor antineutrinos, detecting about 70 IBD events per day with the signal-to-background ratio about unity.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

1. ДЕТЕКТОР DANSS

Проект DANSS [1–3] предусматривает создание относительно компактного нейтринного спектрометра, который не содержит горючие и другие опасные жидкости и потому может располагаться в непосредственной близости от промышленного мощного реактора (рис. 1). Благодаря высокому нейтринному потоку ($\sim 5 \cdot 10^{13} \bar{\nu}_e/\text{см}^2$ на расстоянии 11 м, который обеспечивает около 15 000 взаимодействий обратного бета-распада (ОБР) в объеме детектора) он сможет использоваться как для контроля за работой реактора, так и для фундаментальных исследований, включая изучение нейтринных осцилляций.

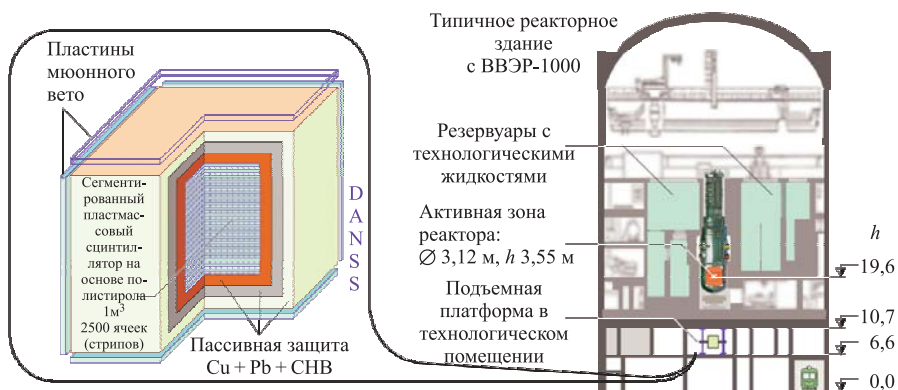


Рис. 1. Конструкция нейтринного детектора DANSS (слева) и его расположение под промышленным реактором ВВЭР-1000 (справа)

Детектор DANSS состоит из высокосегментированного пластмассового сцинтиллятора суммарным объемом 1 м³, окруженного пассивной защитой из меди (Cu), свинца (Pb) и борированного полиэтилена (CHВ), а также сцинтилляционными пластинами активной защиты от космических мюонов.

Базовый элемент детектора DANSS представляет собой брусок (стрип) размером 1 × 4 × 100 см, изготовленный методом экструзии из сцинтиллятора на основе полистирола с тонким Gd-содержащим покрытием, выполняющим одновременно роль светоотражателя и (n, γ)-конвертера (рис. 2). Покрытие

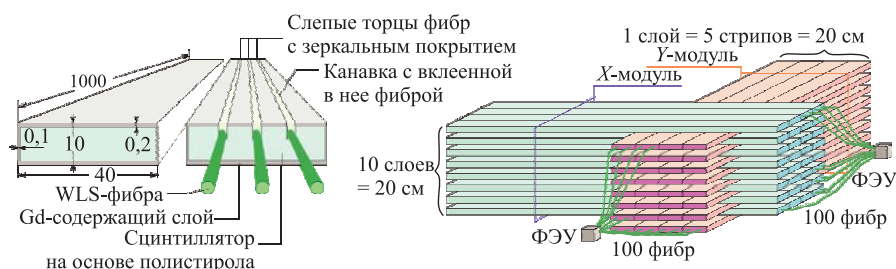


Рис. 2. Стрип — базовый элемент детектора DANSS (слева) и два скрещенных модуля из пятидесяти, входящих в его состав (справа)

(около 0,1–0,2 мм) получено соэкструзией и состоит из полистирола с добавкой 18 % рутила и 6 % окиси гадолиния, что в среднем соответствует концентрации гадолиния $\sim 1,6 \text{ мг/см}^2$ или $\sim 0,35 \%_{\text{wt}}$. Сбор света со стрипа осуществляется с помощью трех WLS-фибр — спектросмещающих оптоволокон Y-11 ($\varnothing 1,2 \text{ мм}$) фирмы «Kuragau», вклеенных в канавки вдоль всего стрипа. Противоположные «слепые» торцы фибр отполированы и покрыты зеркальной краской, что уменьшает результирующее продольное ослабление светового сигнала до $\sim 5 \%/\text{м}$.

Каждые 50 параллельных стрипов объединены в модуль, так что весь детектор (2500 стрипов) представляет собой структуру из 50 взаимопересекающихся модулей (рис.2). Каждый модуль просматривается компактным фотоумножителем (Hamamatsu R7600U) через 100 WLS-фибр, по две на стрип. Кроме того, для получения дополнительной информации о величине энерговыделения и о его пространственном распределении в модуле каждый стрип оборудован индивидуальным многопиксельным лавинным фотодиодом (SiPM), подключенным к стрипу через третью WLS-фибру.

Чтобы проверить работоспособность выбранной конструкции детектора DANSS, сравнить различные схемы набора данных и оценить реальные фоновые условия, был создан упрощенный прототип детектора — его пилотная версия DANSSino. Ниже приводятся описание DANSSino, а также некоторые результаты многочисленных тестов, проведенных как в лабораторных условиях ОИЯИ, так и под работающим реактором КАЭС.

2. КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА DANSSino

Детектор DANSSino состоит из тех же элементарных ячеек, что и основной спектрометр DANSS. 100 таких стрипов формируют сдвоенный модуль (рис.3) размерами $20 \times 20 \times 100 \text{ см}$, причем все четные слои просматриваются одним ФЭУ (модуль X), а нечетные — вторым (модуль Y). Этот

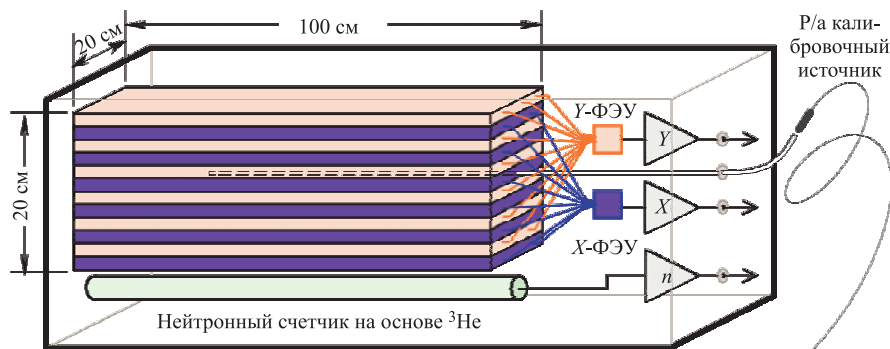


Рис. 3. Детектор DANSSino

сдвоенный модуль помещен в светонепроницаемый корпус, в котором также находятся нейтронный ^3He -датчик* и frond-end электроника (предусилители и дискриминаторы). Информация с фотодиодов в данном прототипе не используется. В центре модуля расположен тefлоновый капилляр, по которому можно вводить внутрь детектора радиоактивный калибровочный источник. Для этих целей были изготовлены несколько миниатюрных герметизированных источников: ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{22}Na , ^{248}Cm , испускающих нейтроны и гамма-лучи различных энергий и имеющих активность 20–100 Бк. Для подавления внешнего фона, обусловленного гамма-лучами и тепловыми нейтронами, детектор окружен пассивной защитой. Ввиду компактности композицию защиты можно легко изменять. Для защиты от мюонов используются сцинтилляционные пластины ($200 \times 50 \times 3$ см), аналогичные тем, которые успешно работают в эксперименте GERDA [4], для отделения событий, вызванных космическими мюонами.

Для регистрации реакторных антинейтрино используется реакция обратного бета-распада на ядрах входящего в состав сцинтиллятора водорода:



причем бóльшая часть энергии нейтрино (за вычетом порога реакции величиной 1,8 МэВ) передается позитрону. Позитрон, проходя в детекторе 1–2 см, оставляет в нем свою энергию, после чего аннигилирует с испусканием двух фотонов по 511 кэВ. Нейтрон же с энергией несколько кэВ сначала замедляется в веществе детектора с характерным временем τ_m , а затем захватывается ядром ^{157}Gd или ^{155}Gd со временем τ_c . В обоих случаях в результате

*Этот ^3He -датчик позволяет мониторировать поток тепловых нейтронов внутри защиты детектора.

(n - γ)-реакции излучается каскад γ -квантов с суммарной энергией около 8 МэВ, которые взаимодействуют с веществом детектора в области диаметром около 30–40 см. Таким образом, сигнатура ОБР-события заключается в регистрации двух последовательных вспышек — первой (Prompt), локализованной в пространстве, и второй (Delayed), гораздо сильнее «размазанной» по объему, с разницей во времени от одной-двух до нескольких десятков микросекунд. Временное распределение между событиями Prompt и Delayed может быть описано как

$$f_1(t) = \frac{1}{\tau_c - \tau_m} (e^{-t/\tau_c} - e^{-t/\tau_m}), \quad (2)$$

где характеристические времена τ_m и τ_c соответствуют замедлению и захвату нейтрона и определяются структурой детектора.

Поскольку ОБР-события происходят в присутствии большого количества одиночных фоновых импульсов (γ , n , μ), для их выделения и последующей записи необходимы заранее выработанные критерии.

Существуют два очевидных варианта такого «жесткого» триггера. Наиболее надежный из них — это регистрация сигнала Delayed от захвата нейтрона, поскольку соответствующая ему энергия существенно превышает границу естественного γ -фона (рис. 4, *a*). К сожалению, для осуществления данного метода необходимо непрерывно оцифровывать весь поток данных с помощью так называемых flash-ADC, работа с которыми довольно сложна. Этот триггер планируется реализовать в полномасштабном эксперименте DANSS, но на данном этапе он пока нецелесообразен.

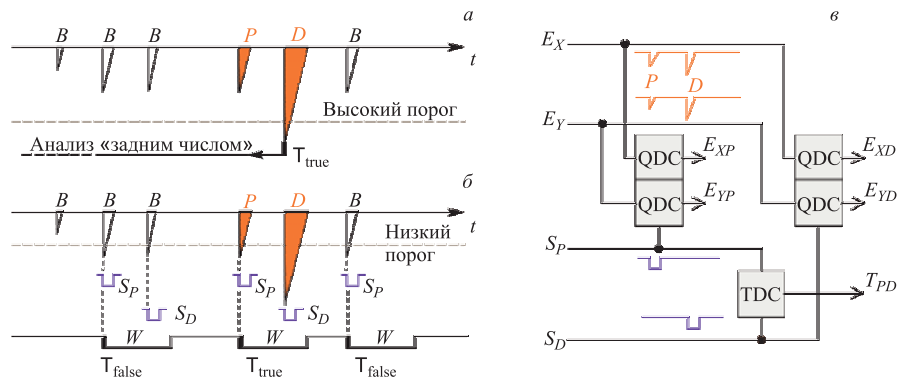


Рис. 4. Два альтернативных типа жесткого триггера (T_{true}) ОБР-события, состоящего из мгновенного (Prompt, P) и запаздывающего (Delayed, D) сигналов в присутствии фоновых (Background, B) импульсов, способных вызвать ложные срабатывания (T_{false}) (*a*, *b*); упрощенная схема применяемой в DANSSino системы набора данных на основе QDC (*в*)

Второй способ, используемый в пилотной версии детектора, более прост, но менее надежен, так как осуществим лишь при достаточно низких фоновых нагрузках. В этом случае (рис. 4, б) система реагирует на любой пришедший импульс (Prompt), превышающий некий энергетический порог, после чего ждет появления второго импульса (Delayed). Для реализации данного метода один и тот же сигнал подается сразу на два QDC (E_P и E_D), один из которых стробируется во время присутствия Prompt-импульса, а второй — Delayed-импульса (рис. 4, в). Таким образом, каждое записываемое событие содержит четыре энергии (E_{XP} , E_{YP} , E_{XD} , E_{YD}), время между P - и D -импульсами (T_{PD}), а также дополнительную информацию о мюонном вето (какие из пластин срабатывали и когда).

3. НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ (ОИЯИ, ДУБНА)

После сборки спектрометр в течение месяца тестировался в лабораторных условиях (ОИЯИ, Дубна). Вначале были проведены измерения с γ -источниками ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{22}Na . На рис. 5 представлены полученные энергетические спектры, которые позволили, во-первых, осуществить энергетическую калибровку, во-вторых, оценить энергетическое разрешение детектора и, в-третьих, установить желаемые энергетические пороги.

Поскольку хорошее энергетическое разрешение очень важно для получения нужных характеристик строящегося спектрометра DANSS и определяется оно в основном количеством энергии ε_{pe} , соответствующей образованию одного фотоэлектрона на катоде ФЭУ, в дополнение к вышеупомянутым тестам были выполнены измерения шумовых однофотоэлектронных пиков.

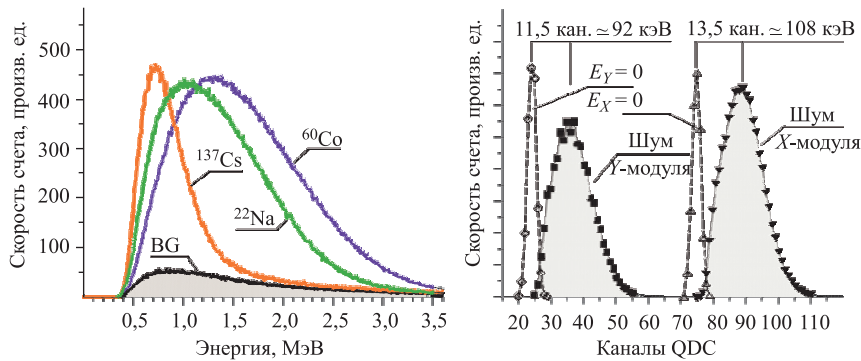


Рис. 5. Энергетические спектры, измеренные с калибровочными γ -источниками (слева), и пики, соответствующие однофотоэлектронным шумам (справа)

Полученная величина ε_{pe} оказалась даже несколько лучше ожидавшейся и составила около 100 кэВ на фотоэлектрон.

Одним из важнейших параметров детектора является его чувствительность к нейтронам. Используемый нами делящийся источник быстрых нейтронов ^{248}Cm был выбран потому, что дает сигналы с сигнатурой, очень похожей на ОБР-события. Действительно, Delayed-сигнал, как и в случае с нейтрино, порождается захватом замедлившегося нейтрона, тогда как в качестве Prompt-сигнала может оказаться либо кинетическая энергия этого нейтрона, выделяющаяся при его взаимодействии с протонами детектора, либо вспышка гамма-лучей в момент деления. В первом случае велика вероятность срабатывания только одного ФЭУ ($X_P \wedge Y_P$)*, а во втором — обоих ($X_P \oplus Y_P$). Энергетические Prompt-спектры при этом сильно отличаются, тогда как временные весьма похожи (рис. 6) и хорошо совпадают с результатами моделирования.

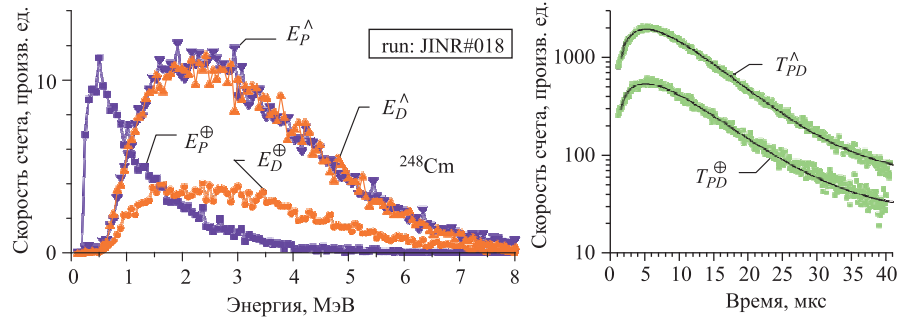


Рис. 6. Энергетические (слева) и временные (справа) спектры нейтриноподобных событий, измеренные с источником ^{248}Cm . Спектры, соответствующие логике ($X_P \oplus Y_P$) и ($X_P \wedge Y_P$) мгновенных (Prompt) сигналов, отмечены, соответственно, индексами \oplus и \wedge . Все запаздывающие (Delayed) сигналы обязательно удовлетворяют требованию ($X_D \wedge Y_D$)

Временные распределения также похожи на ОБР и отличаются лишь более высокой множественностью нейтронов ($k \simeq 3,2$). При этом вместо (2) следует использовать функцию

$$f_k(t) = f_1(t) \left(1 - \int_0^t f_1(\tau) d\tau \right)^{k-1} = \frac{e^{-\frac{t}{\tau_c}} - e^{-\frac{t}{\tau_m}}}{(\tau_c - \tau_m)^k} (\tau_c e^{-\frac{t}{\tau_c}} - \tau_m e^{-\frac{t}{\tau_m}})^{k-1}, \quad (3)$$

* Знаками \wedge (AND) и \oplus (XOR) здесь и далее обозначены логические операции конъюнкции и исключающей дизъюнкции соответственно.

более сложный вид которой отражает тот факт, что только первый из k нейтронов может быть зарегистрирован. Количественный анализ данных, представленных на рис. 6, с $k = 3$ дает следующие значения для характеристических времен торможения и захвата нейтрона:

$$\tau_m \simeq (3 \pm 1) \text{ мкс}, \quad \tau_c \simeq (24 \pm 1) \text{ мкс}. \quad (4)$$

Измерения, выполненные без радиоактивных источников, но с пассивной защитой различного состава, подтвердили, что 10 см тяжелых материалов (медь и/или свинец) вполне достаточно для подавления естественного гамма-фона, а 10 см борированного полиэтилена — для подавления тепловых нейтронов. С другой стороны, в спектре в довольно больших количествах (300 в ч) присутствуют нейтриноподобные события, состоящие из двух сигналов — Prompt и Delayed. При этом и энергетический спектр E_D , и временное распределение T_{PD} для таких событий имеют ту же форму, что и в случае источника ^{248}Cm . Это дает нам право утверждать, что данные фоновые события вызваны быстрыми нейтронами, которые не задерживаются даже 16 см полиэтилена. Действительно, известно [5, 6], что на поверхности Земли присутствует адронный компонент космического излучения ($10^2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$)*, для подавления которого необходима защита, как минимум эквивалентная двадцати метрам воды (20 м в.э.).

4. ИЗМЕРЕНИЯ ПОД ПРОМЫШЛЕННЫМ РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000 (КАЭС, УДОМЛЯ)

С апреля 2012 г. детектор DANSSino был установлен в помещении А336 под третьим энергоблоком Калининской АЭС (г. Удомля, Тверская обл.) на расстоянии 11 м от центра активной зоны (рис. 1). Энергоблок включает в себя наиболее распространенный в России водо-водяной реактор ВВЭР-1000 с тепловой мощностью 3 ГВт. Огромные водные резервуары с технологическими растворами, расположенные над указанным помещением, сам реактор и окружающее его оборудование, а также толстые стены и перекрытия из тяжелого бетона представляют собой прекрасную защиту толщиной около 50 м в.э., что полностью убирает мешавшие нам в лабораторных условиях быстрые нейтроны космического излучения (при этом мюонная составляющая тоже ослабляется в 5–6 раз).

* Более точный расчет [7], выполненный для нейтронов с $E_n \geq 10$ МэВ, дает для условий ОИЯИ величину $40\text{--}50 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

В течение нескольких месяцев проводились различные измерения, в которых тестировалась эффективность мюонного вето, состав и конфигурация пассивной защиты, а также величина фона и степень его подавления. Радиационные условия в месте расположения спектрометра почти не отличаются от лабораторных; исключение составляет повышенный поток тепловых и медленных нейтронов, проникающих в помещение через измерительные каналы. Они, однако, не представляют особой опасности, поскольку их энергия слишком мала, чтобы сымитировать ОБР; к тому же они легко подавляются 10–15-сантиметровым слоем борированного полиэтилена.

Результаты некоторых измерений, выполненных в лаборатории ОИЯИ и под реактором, представлены в табл. 1. Некоторые параметры спектрометра (такие как напряжение ФЭУ, пороги дискриминаторов) до и после транспортировки могли немного различаться, поэтому численные значения, представленные в таблице, следует рассматривать только иллюстративно. Поскольку линейная загрузка X - и Y -модулей зависит от энергетических порогов дискриминаторов, то для лучшей сопоставимости результатов в X - и Y -столбцах указано количество импульсов с энергией выше $\geq 0,25$ МэВ. Из этих значений видно, что начальные фоновые условия под реактором хуже, но использование пассивной защиты (10 см свинца и 16 см борированного полиэтилена) существенно улучшает ситуацию и делает ее даже в три раза лучше по сравнению с лабораторией. Следующие две колонки отражают главным

Таблица 1. Фон в лаборатории ОИЯИ и под работающим реактором КАЭС, измеренный детектором DANSSino, как защищенным, так и в защите, состоящей из 10 см свинца, 16 см борированного полиэтилена и пластин μ -вето (здесь и далее порядок слоев защиты перечисляется изнутри наружу)

Условия работы	Защита детектора	Загрузка модулей, число отсчетов в 1 с				Число $(P + D)$ -пар в 1 сут	
		X $E \geq 0,25$ $\gamma + n + \mu$	Y $E \geq 0,25$ $\gamma + n + \mu$	$X \wedge Y$ $E \geq 0,5$ $n + \mu$	$X \wedge Y$ $E \geq 8,0$ $\sim \mu$	Анти-совпадения с μ -вето	Совпадения с μ -вето
ОИЯИ, естеств. фон	Без защиты	532	465	235	19	601 400	
	Pb + + СНВ + + μ -вето	61	58	42	17	30 750	9030
КАЭС $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Без защиты	1470	1360	408	4	11 837 500	
	Pb + + СНВ + + μ -вето	20	19	11	2	1240	980

образом поток тепловых нейтронов и космических мюонов соответственно (нейтроны дают $X \wedge Y$ -совпадения с суммарным энерговыделением ниже нескольких МэВ, в то время как мюоны приводят к насыщению QDC).

Наконец, две последние колонки табл. 1 показывают счет событий, включающих (Prompt + Delayed)-пары сигналов без какого-либо дополнительного отбора. Для незащищенного детектора большое количество таких событий обусловлено случайными совпадениями при высокой загрузке. Для детектора же в защите эти сигналы в основном обязаны своим происхождением быстрым нейтронам. Как и ожидалось, количество таких ложных нейтриноподобных событий по сравнению с наземными условиями резко сократилось, но не упало до нуля. Детальный анализ данных показал, что эта оставшаяся часть ассоциирована с сигналами от системы мюонного вето и вызвана скорее всего вторичными быстрыми нейтронами, рождающимися под действием мюонов в окружающих конструкционных материалах с большим атомным номером (Pb, Cu).

Для проверки этого предположения проводились измерения с различной конфигурацией пассивной защиты. В табл. 2 представлены результаты трех таких измерений. В отличие от табл. 1 индуцированные мюонами события здесь были отобраны при более жестких требованиях, отвечающих сигнатуре интересующего нас IBD-процесса:

- время между сигналами Prompt и Delayed должно быть в разумных пределах: $T_{PD} \in [1,5-30,0]$ мкс;
- сигнал Delayed должен соответствовать $Gd(n,\gamma)$ -реакции, т. е. должны обязательно сработать оба модуля ($X_D \wedge Y_D$) с определенным* суммарным энерговыделением: $E_{XD} + E_{YD} = E_D \in [1-8]$ МэВ;
- суммарная энергия сигнала Prompt также должна лежать в разумных пределах: $E_{XP} + E_{YP} = E_P \in [1-7]$ МэВ.

Таблица 2. Количество ложных нейтриноподобных событий, ассоциированных с сигналами от μ -вето и зарегистрированных детектором DANSSino при различной конфигурации пассивной защиты

Номер измерения и конфигурация защиты	KNPP#027 Pb = 10 см CHB = 16 см	KNPP#035 CHB = 8 см Pb = 10 см	KNPP#044 Cu = 5 см CHB = 8 см Pb = 5 см
Число событий за сутки	835 ± 7	214 ± 4	384 ± 4

*Поскольку размеры детектора невелики, многие фотоны γ -каскада покидают чувствительный объем без регистрации и потому допустимый интервал E_D расширен от 8 МэВ в область низкой энергии.

Из табл. 2 ясно видно, что 5 см меди, расположенные вблизи детектора, увеличивают количество ложных нейтриноподобных событий вдвое, а 10 см свинца — вчетверо. Конечно, эти события можно отсеять вето-системой, но, к сожалению, ее эффективность не может быть стопроцентной. С другой стороны, невозможно избежать применения материалов с высоким Z , так как они необходимы для защиты от γ -излучения. Поэтому такие материалы желательно располагать снаружи нейтронной защиты с низким Z .

Во время двух наших измерений (KNPP #035 и KNPP #044) происходили кратковременные остановки реактора (периоды OFF), что дало возможность объективно оценить фон при нулевом потоке антинейтрино*. На рис. 7 показаны временные диаграммы этих двух измерений. Нижняя часть каждой диаграммы отражает фактическую мощность реактора, измеренную внешним нейтронным датчиком, установленным вблизи открытого нейтронного канала. Верхняя часть диаграмм представляет собой количество зарегистрированных детектором DANSSino нейтриноподобных событий и демонстрирует явную корреляцию с нижней частью.

Могут быть некоторые сомнения по поводу природы вариации скорости счета — действительно ли это ОБР-события, вызванные реакторными

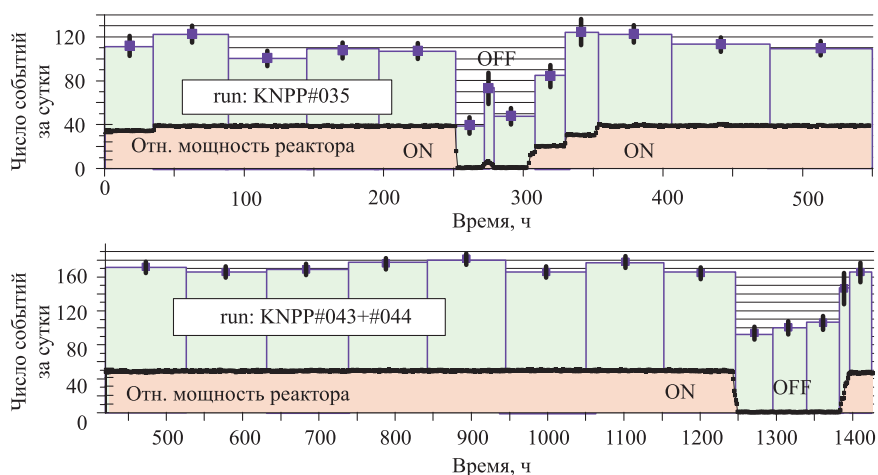


Рис. 7. Временная эволюция мощности реактора (в нижней части каждой диаграммы) и число нейтриноподобных событий, зарегистрированных детектором DANSSino в двух измерениях, на которые пришлось остановки реактора

*В действительности, когда реактор остановлен, нейтрино продолжают испускаться радиоактивными продуктами деления, но энергия распада долгоживущих ядер, как правило, мала, и потому такие «OFF-нейтрино» практически не регистрируются из-за высокого порога ОБР-реакции.

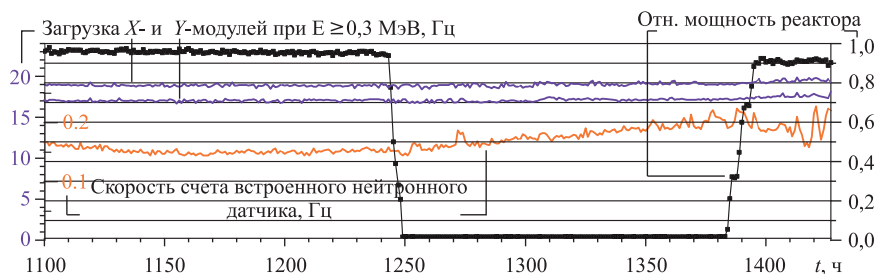


Рис. 8. Временная эволюция мощности реактора во время его остановки (тип: KNPP#044) и загрузка модулей X и Y , а также показания встроенного нейтронного датчика, находящегося вместе с детектором внутри защиты. Видимой корреляции не наблюдается

нейтрино, или же это случайные γ - n -совпадения, обусловленные внешним фоном, зависящим от работы реактора. Для ответа на этот вопрос была проанализирована временная эволюция фона внутри защиты DANSSino (рис. 8). На первый взгляд, какая-либо корреляция между мощностью реактора и скоростью счета X - и Y -модулей (которые срабатывают главным образом от гамма-лучей) отсутствует. К сожалению, этого нельзя с уверенностью сказать о тепловых нейтронах, поскольку чувствительности ^3He -датчика недостаточно, чтобы обнаружить очень низкий, но все еще ненулевой нейтронный поток внутри защиты. Фактически скорость счета нейтронного датчика, показанная на рис. 8, обусловлена не столько нейтронами, сколько космическими лучами и внутренними радиоактивными загрязнениями, а также электрическим шумом, и потому отсутствие каких-либо видимых корреляций не может рассматриваться в качестве аргумента в пользу нейтрино по сравнению с фоновыми γ - n -совпадениями.

Численные значения результатов этих двух измерений (KNPP#035 и KNPP#044) приведены в табл. 3, в которой показано количество нейтриноподобных событий с различными энергетическими порогами ($E_P^{\text{min}} = 0,5, 1,0$ и $1,5$ МэВ) и альтернативной логикой сигналов Prompt — $(X_P \oplus Y_P)$ и $(X_P \wedge Y_P)$. Анализ таблицы позволяет сделать следующие выводы.

- Количество ложных событий, вызванных мюонами, не зависит от состояния реактора, что подтверждает правильность работы системы сбора данных.
- Установка внутри замедлителя слоя защиты из 5 см меди ухудшает фон на 70 %, но одновременно улучшает эффективность* на ~ 10 %, возвращая часть истинных ОБР-нейтронов обратно в сцинтиллятор.

*Под эффективностью здесь имеется в виду вероятность обнаружения ОБР-события, если таковое имело место.

Таблица 3. Число нейтриноподобных событий, соответствующих логике $(X_P \oplus Y_P)$ и $(X_P \wedge Y_P)$ мгновенного (Prompt) сигнала и зарегистрированных детектором DANSSino при работающем (ON) и заглушенном (OFF) реакторе

Run # и состав защиты	P-сигнал		Число нейтриноподобных событий в 1 сут					Отн. S/B (\approx)
			E_P^{\min} , МэВ		Логика X_P-Y_P		S = ON-JFF	
			μ -вето: есть	μ -вето: нет	ON	OFF	ON	
KNPP #035	0,5	$X_P \otimes Y_P$	169 \pm 3	173 \pm 9	361 \pm 4	249 \pm 11	112 \pm 12	0,45
		$X_P \wedge Y_P$	129 \pm 3	133 \pm 8	69 \pm 2	38 \pm 4	30 \pm 5	0,79
CHB 8 см Pb 10 см	1,0	$X_P \otimes Y_P$	92 \pm 2	95 \pm 7	125 \pm 3	66 \pm 6	59 \pm 6	0,89
		$X_P \wedge Y_P$	123 \pm 3	126 \pm 8	60 \pm 2	31 \pm 4	29 \pm 4	0,92
	1,5	$X_P \otimes Y_P$	59 \pm 2	63 \pm 6	62 \pm 2	29 \pm 4	34 \pm 4	1,16
		$X_P \wedge Y_P$	108 \pm 2	105 \pm 7	48 \pm 2	20 \pm 3	28 \pm 4	1,43
KNPP #043 + #044	0,5	$X_P \otimes Y_P$	301 \pm 4	300 \pm 7	487 \pm 5	401 \pm 9	86 \pm 10	0,44
		$X_P \wedge Y_P$	243 \pm 3	246 \pm 7	112 \pm 2	76 \pm 4	36 \pm 4	0,46
Cu 5 см CHB 8 см	1,0	$X_P \otimes Y_P$	156 \pm 3	158 \pm 5	188 \pm 3	130 \pm 5	58 \pm 6	0,44
		$X_P \wedge Y_P$	228 \pm 3	231 \pm 6	99 \pm 2	64 \pm 3	35 \pm 4	0,54
Pb 5 см	1,5	$X_P \otimes Y_P$	94 \pm 2	99 \pm 4	93 \pm 2	52 \pm 3	42 \pm 4	0,80
		$X_P \wedge Y_P$	195 \pm 3	201 \pm 6	77 \pm 2	44 \pm 3	33 \pm 3	0,74

- Выбор $(X_P \wedge Y_P)$ -логики для сигнала Prompt соответствует более жестким условиям отбора и обеспечивает лучшее отношение S/B , но снижает полезную статистику. Действительно, пробег протона отдачи после рассеяния нейтрона в полистироле не превышает 1–2 мм и, следовательно, сигнал Prompt от ложного фоновое события, обусловленного быстрым нейтроном, должен быть зарегистрирован, скорее всего, только одним из двух модулей $(X_P \oplus Y_P)$.

- Понижение энергетического порога E_P^{\min} ниже ~ 1 МэВ для $(X_P \wedge Y_P)$ -логики не дает выигрыша в полезной статистике, а только увеличивает фон, при этом ухудшая отношение сигнал/фон.

- В случае менее жестких условий $(X_P \oplus Y_P)$ такое снижение порога приводит к росту числа случайных совпадений между внешними γ -лучами и тепловыми нейтронами. Так получилось, что детектор в рассматриваемых тестах был защищен от нейтронов недостаточно хорошо (в слоях борированного полиэтилена имелись многочисленные щели), и, следовательно, число таких случайных совпадений выше в период работы реактора (ON), что дает положительную (ON–OFF) разницу. Поскольку внешний γ -фон создает, как правило, одиночные импульсы относительно малой амплитуды, то указанный эффект наблюдается при низких значениях E_P и условия $(X_P \oplus Y_P)$.

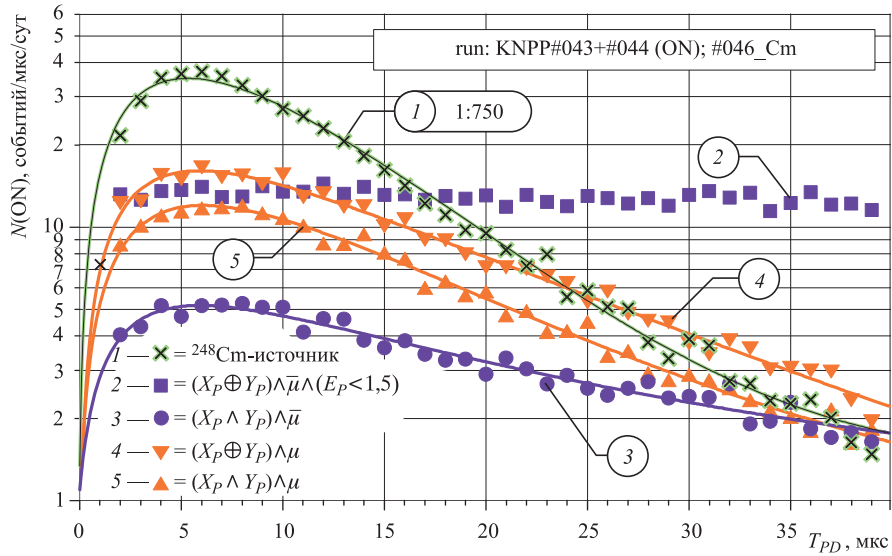


Рис. 9. Временное (T_{PD}) распределение, измеренное с источником ^{248}Cm , по сравнению с распределением нейтриноподобных событий, зарегистрированных под работающим реактором

Последний вывод подтверждается плоским временным распределением T_{PD} событий с малой Prompt-энергией ($E_P \in [0,5-1,5]$ МэВ) и $(X_P \oplus Y_P)$ -логикой (см. кривую 2 на рис. 9). Временное распределение истинных ОБР-событий соответствует кривой 3 на этом же рисунке и хорошо согласуется с ожидаемым. Крутизна спада этого распределения значительно меньше, чем у кривой 1, измеренной с источником ^{248}Cm . Крутизна остальных двух кривых 4 и 5 соответствует промежуточной множественности нейтронов ($k \simeq 1,6$), что имеет место для реакций, вызванных мюонами в свинцовой и медной защите спектрометра.

На рис. 10 показан энергетический спектр нейтриноподобных событий, зарегистрированных в периоды ON и OFF работы реактора. ON-спектры демонстрируют некое превышение над OFF в обоих случаях, а их формы различаются по причине, указанной выше (низкоэнергетическая часть $(X_P \oplus Y_P)$ -спектров загрязнена случайными γ - n -совпадениями).

Тем не менее, если предположить, что OFF-измерения соответствуют чистому фону, то можно построить энергетический спектр позитронов ОБР-событий как разность двух спектров: $S = N(\text{ON}) - N(\text{OFF})$. В качестве примера такие E_P -спектры приведены на рис. 11.

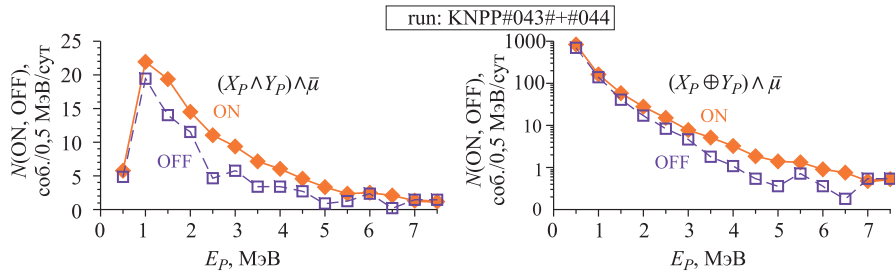


Рис. 10. Энергетические E_p -спектры нейтриноподобных событий, зарегистрированных при работающем (ON) и заглушенном (OFF) реакторе

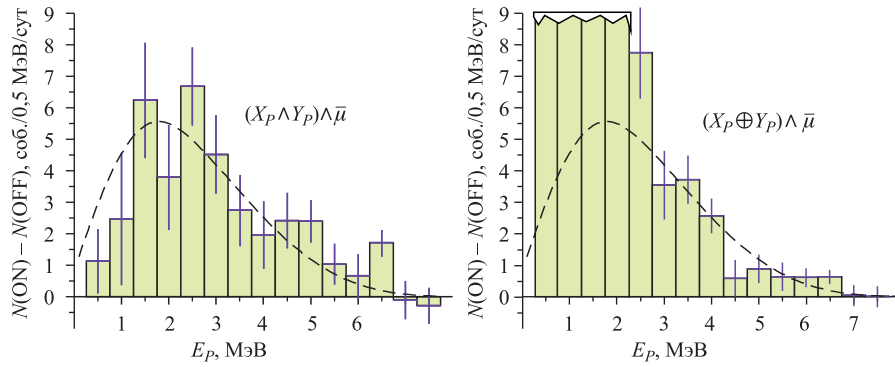


Рис. 11. Разностные энергетические E_p -спектры нейтриноподобных событий, зарегистрированных детектором DANSSino. Штриховая кривая показывает примерную форму спектра ОБР-позитронов, рассчитанную для деления ^{235}U

Несмотря на малую статистику и лишь иллюстративный характер спектров, первый из них хорошо согласуется* с теоретическими ожиданиями [9–11], которые показаны штриховой линией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате многочисленных тестов, проведенных с детектором DANSSino, можно сделать следующие выводы.

- Основную опасность под реактором ВВЭР-1000 представляет фон от вторичных быстрых нейтронов, рождаемых мюонами в конструкционных ма-

*Для примера: MC-моделирование с GEANT-4 предсказало 75 событий в сутки для Run: #044, в то время как наблюдалось (70 ± 5) событий.

териалах. Поэтому желательно избегать элементов с большим атомным номером Z или располагать их не внутри, а снаружи нейтронной защиты.

- Необходимо обеспечить эффективность мюонного вето на уровне не менее 95–97 %. Для этого мы планируем использовать двойной слой сцинтилляционных пластин, имеющих пониженный порог и включенных на совпадение.

- Детектор DANSSino регистрирует реакторные антинейтрино, несмотря на свои маленькие размеры, большие краевые эффекты, несовершенные пассивную и активную защиты и упрощенную систему сбора данных. Поскольку строящийся детектор DANSS имеет больший объем, его функция отклика должна быть существенно лучше, а эффективность существенно выше за счет меньшего относительного вклада краевых областей (меньшая доля гамма-лучей при захвате нейтрона будет покидать чувствительный объем незарегистрированной, и потому пороги дискриминаторов смогут быть повышены без потери эффективности). Вместе с использованием сигналов от индивидуальных фотодиодов (SiPM), дающих информацию о пространственном распределении энерговыделения в каждом событии, это позволит подавить фон до расчетного пренебрежимо малого значения в доли процента.

- Возможность работы подобного нейтринного детектора на поверхности Земли выглядит проблематичной, так как жесткие нейтроны, входящие в состав космического фона, никакой вето-системой не регистрируются, а по интенсивности превосходят ожидаемое число нейтринных событий от реактора на два порядка, при этом почти полностью имитируя сигнатуру процесса ОБР.

Благодарности. Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-02-01251 и 11-02-12194), Министерства образования и науки РФ (гранты 8174, 8411, 1366.2012.2), госконтракта Росатома Н.4х.44.90.13.1119, а также гранта ОИЯИ 13-202-05. Авторы благодарят коллектив Калининской АЭС, а именно дирекцию КАЭС, за предоставление возможности проведения экспериментов в непосредственной близости к активной зоне, а также отдел радиационной безопасности за постоянную техническую помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Egorov V., Starostin A. Solid Scintillator Detector of the Reactor Antineutrino DANSS. Talk at TAUP2011, Munich, Germany, Sept. 5–9, 2011.
2. Egorov V., Starostin A. Antineutrino Detector Development for Safeguards in Russia: DANSS. Talk at AAP2011, Vienna, Austria, Sept. 15–16, 2011.
3. Danilov M. V. et al. Antineutrino Detector for On-Line Monitoring of Nuclear Reactor Parameters and Search for Short Range Neutrino Oscillations. Poster at ICHEP2012, Melbourne, July 4–11, 2012.

4. *Ackermann K.-H. et al.* The GERDA Experiment for the Search of $0\nu\beta\beta$ Decay in ^{76}Ge // *Eur. Phys. J. C.* 2013. V. 73. P. 2330.
5. *Heusser G.* Cosmic Ray Interaction Study in Low-Level Ge Spectrometry // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1996. V. 369. P. 539–543.
6. *Sato T. et al.* Development of PARMA: PHITS-Based Analytical Radiation Model in the Atmosphere // *Radiat. Res.* 2008. V. 170. P. 244–259.
7. <http://www.seutest.com/cgi-bin/FluxCalculator.cgi>.
8. *Тевлин С. А.* Атомные электрические станции с реакторами ВВЭР-1000. М.: Изд-во МЭИ, 2008.
9. *Александркин В. Г. и др.* Бета- и антинейтринное излучение радиоактивных ядер. М.: Энергоатомиздат, 1989. 800 с.
10. *Mueller Th. A. et al.* Improved Predictions of Reactor Antineutrino Spectra // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 83. P. 054615; arXiv:1101.2663 [hep-ex].
11. *Koreikin V. I.* Flux and Spectrum of Reactor Antineutrinos // *Phys. At. Nucl.* 2012. V. 75. P. 143–152.

Получено 27 ноября 2013 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 06.02.2014.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 185 экз. Заказ № 58178.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/