

МОНИТОРИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО РЕАКТОРА ПО СЧЕТУ АНТИНЕЙТРИНО В ДЕТЕКТОРЕ DANSS

© 2019 г. И. Г. Алексеев^{1),2),3)}, В. В. Белов⁴⁾, В. Б. Бруданин⁴⁾, Г. Г. Гузеев⁵⁾, М. В. Данилов⁶⁾, В. Г. Егоров^{4),7)}, И. В. Житников⁴⁾, Д. Р. Зинатулина⁴⁾, С. В. Казарцев^{4),7)}, А. С. Кобякин^{1),3)}, А. С. Кузнецов⁴⁾, И. В. Мачихильян¹⁾, Д. В. Медведев⁴⁾, В. М. Нестеров¹⁾, А. Г. Ольшевский⁴⁾, Н. А. Погорелов¹⁾, Д. В. Пономарев⁴⁾, И. Е. Розова⁴⁾, Н. С. Румянцева^{4),7)}, В. Ю. Русинов¹⁾, Э. И. Самигуллин¹⁾, Д. Н. Свирида^{1)*}, Н. А. Скрובהва^{1),3),6)}, А. С. Старостин¹⁾, Е. И. Тарковский¹⁾, Д. В. Философов⁴⁾, М. В. Фомина⁴⁾, В. А. Хватов⁵⁾, В. М. Чапаев⁵⁾, Е. А. Шевчик⁴⁾, М. В. Ширченко⁴⁾, Ю. А. Шитов^{4),8)}

Поступила в редакцию 28.03.2019 г.; после доработки 28.03.2019 г.; принята к публикации 28.03.2019 г.

Регистрация антинейтрино в реакции обратного β -распада может использоваться для независимого мониторинга мощности ядерного реактора. Детектор DANSS, расположенный непосредственно под промышленным реактором ВВЭР-1000, регистрирует до 5000 антинейтрино в сутки, обеспечивая точность около 1.5% за двое суток измерений. Мощная система пассивной и активной защиты в сочетании с мелкой пространственной сегментацией детектора позволяет снизить вклад фоновых процессов до уровня, незначительного по сравнению со статистической ошибкой. Влияние состава ядерного топлива на величину потока антинейтрино может быть учтено на основании данных, получаемых от персонала АЭС.

DOI: 10.1134/S0044002719050040

ВВЕДЕНИЕ

Измерение мощности ядерного реактора является важнейшим элементом технологического процесса его эксплуатации. Используемые для этого методики основаны на определении термодинамических характеристик теплоносителя или на измерениях нейтронных потоков в различных областях активной зоны. Эти методики хорошо отработаны, весьма надежны, но имеют ряд систематических погрешностей, плохо поддающихся интерпретации и ограничивающих точность измерений на

уровне порядка одного процента. Развитие независимых способов измерения мощности, основанных на иных физических принципах, имеет существенное значение для повышения надежности и безопасности эксплуатации ядерных реакторов.

Возможность использования детекторов антинейтрино для мониторинга мощности промышленных реакторов была предложена и получила принципиальное подтверждение еще в конце прошлого века (например, [1]). Действительно, в результате деления изотопов урана и плутония, входящих в состав реакторного топлива, возникает целый спектр нейтронно-избыточных осколков, испытывающих затем цепочки β^- -распадов с испусканием антинейтрино. Естественно предположить, что количество инициированных распадных цепочек, а следовательно, и рожденных антинейтрино пропорционально количеству первичных делений, также как и выделение тепловой энергии. Для более детальных оценок используют средние энергии деления и расчетные спектры антинейтрино [2–4], характерные для каждого из основных изотопов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , в соответствии с их вкладами в процессы деления. В свою очередь, нейтринные спектры вычисляются на основании данных по выходам осколков деления

¹⁾НИЦ “Курчатовский институт” — ИТЭФ, Москва, Россия.

²⁾Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

³⁾Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия.

⁴⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

⁵⁾Калининская атомная станция, Удомля, Россия.

⁶⁾Физический институт имени Лебедева РАН, Москва, Россия.

⁷⁾Государственный университет “Дубна”, Дубна, Россия.

⁸⁾Imperial College London, South Kensington Campus, London, United Kingdom.

*E-mail: Dmitry.Svirida@itep.ru

и свойствам последующих β^- -распадов, полнота которых оставляет желать лучшего. В настоящее время достоверность существующих расчетов подвергается серьезным сомнениям, что подтверждается экспериментальными указаниями [5, 6]. Также следует отметить, что подобные расчеты учитывают ядерные превращения с временами жизни до нескольких суток, так что их справедливость ограничивается предположением о стационарности процессов в активной зоне реактора на указанном масштабе времени.

Детектор DANSS был задуман и создан для поиска стерильных нейтрино путем измерения формы нейтринных спектров на различных расстояниях от их источника, в качестве которого используется промышленный реактор. Спектры антинейтрино могут быть восстановлены по измеренной энергии позитронов, рождающихся в реакции обратного β -распада (ОБР) на ядрах водорода вещества детектора. Фундаментальная физическая задача эксперимента подразумевает накопление большого количества зарегистрированных антинейтрино на установке, стабильно работающей в течение длительного промежутка времени. Этот же статистический материал может быть использован и для решения прикладной задачи — оценки возможности применения детекторов, подобных DANSS, для мониторинга средней мощности ядерных реакторов.

ДЕТЕКТОР АНТИНЕЙТРИНО И МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ

Установка DANSS [7] расположена под реактором ВВЭР-1000 Калининской АЭС и размещена на платформе подъемного механизма так, что расстояние между центрами детектора и активной зоны реактора может изменяться в диапазоне от 10.7 до 12.7 м. Чувствительный объем детектора составляет 1 м³ и набран из 2500 пластин сцинтилляционного пластика размером 100 × 4 × 1 см³, уложенных в слои с чередующимся направлением. Каждая пластина имеет светоотражающее покрытие с примесью гадолиния для захвата нейтронов обратного β -распада. Вывод сцинтилляционного света с пластины осуществляется с помощью трех спектросмещающих волокон, уложенных в продольные канавки. Каждые 5 пластин из 10 слоев одной направленности объединены в секции. Пары боковых волокон 50 пластин секции собраны в пучки на катодах 50 традиционных ФЭУ, а центральное волокно каждой пластины просматривается индивидуальным кремниевым фотоумножителем (КФЭУ). Малошумящие ФЭУ используются для выработки системного триггера установки в случаях, когда их суммарный сигнал превосходит

0.7 МэВ, тогда как сигналы КФЭУ позволяют эффективно использовать мелкую сегментацию сцинтилляционного куба для определения геометрических параметров событий. Суммирование энерговыделения в фотоприемниках обоих типов способствует увеличению эффективной фотостатистики и уменьшению пространственной неоднородности светосбора [8]. Чувствительный объем детектора окружен многослойной пассивной защитой, снаружи от которой установлены сцинтилляционные счетчики большой площади, составляющие систему активного вето. 40 счетчиков вето-системы обеспечивают геометрическую эффективность регистрации космических мюонов на уровне 98%. При срабатывании вето-системы также вырабатывается системный триггер. Расположение детектора под структурами реактора и его биологической защиты обеспечивает дополнительное подавление космического фона на уровне 50 м водного эквивалента.

Энергетическая калибровка детектора осуществляется с использованием выделяемых треков космических мюонов. Анализ шумовых спектров КФЭУ, непрерывно накапливаемых параллельно с основным набором данных, позволяет отслеживать изменения чувствительности этих фотодетекторов на временных интервалах масштаба получаса. Подробное описание калибровочных методик и исследование стабильности энергетических характеристик приведено в [9].

Детектирование антинейтрино производится путем выделения событий обратного β -распада $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. Позитрон производит мгновенное энерговыделение в виде непрерывного кластера ионизации и, возможно, нескольких мягких и близких комптоновских электронов от гамма-квантов аннигиляции. Энергия позитрона меньше энергии антинейтрино приблизительно на 1.8 МэВ, почти независимо от кинематики конкретного рассеяния. Нейтрон испытывает замедление до тепловых энергий в течение нескольких микросекунд, а затем блуждает в веществе детектора до захвата ядром гадолиния с испусканием каскада гамма-квантов с суммарной энергией около 8 МэВ. Концентрация гадолиния соответствует постоянной времени захвата 15 мкс. Отбор событий ОБР выполняется off-line и начинается с поиска нейтронного кандидата как события со значительными энерговыделением (>3 МэВ) и множественностью (≥ 4 срабатываний). Затем интервал в 50 мкс, предшествующий предполагаемому нейтрону, просматривается на предмет позитронного сигнала с энерговыделением >1 МэВ в связанном кластере. Найденная пара считается кандидатом в события ОБР.

ВЫДЕЛЕНИЕ СОБЫТИЙ ОБРАТНОГО β -РАСПАДА

Поиск коррелированных во времени пар кандидатов является мощным, но недостаточным средством выделения событий ОБР среди многочисленных фоновых процессов. В эксперименте DANSS тщательно разработана процедура вычисления и вычитания фонов различной природы, которая, совместно с наложением ряда мягких критериев отбора событий, уменьшает остаточное загрязнение до величины, пренебрежимо малой по сравнению со статистической ошибкой. Критерии отбора оптимизированы таким образом, что их применение обеспечивает подавление фонов более чем на порядок, тогда как потери полезных событий оказываются незначительными.

Основным источником реакций, в точности имитирующих ОБР, являются космические мюоны или порожденные ими ливни. Основную часть таких событий удастся отбросить, применяя “изолирующие” отборы: требуется отсутствие зарегистрированного мюона в течение 60 мкс перед позитронным кандидатом, а также отсутствие любых срабатываний установки (кроме найденного нейтрона) за 45 мкс до и в течение 80 мкс после первого события пары. “Ливневое” энерговыделение >300 МэВ вызывает дополнительную блокировку на 200 мкс.

Характеристики событий, полученные благодаря мелкой сегментации детектора, позволяют наложить дополнительные отборы. В частности, отбрасываются события с координатой позитронного кластера ближе 4 см от края чувствительного объема (периферическая часть может быть обогащена фонами), расстояние до точки захвата нейтрона ограничивается 55 см, а для срабатываний вне позитронного кластера, вызываемых аннигиляционными фотонами, требуется множественность, не превосходящая 10, и полное энерговыделение менее 1.8 МэВ. Всего накладывается около десятка подобных критериев, позволяющих в несколько раз снизить вклады космического и случайного фонов, но потерять лишь около 15% полезных событий.

Случайные совпадения возникают в случаях, когда одно из событий пары имитируется некоррелированным во времени процессом, например β -распадами радиоактивного загрязнения в массе детектора. Для вычисления фона случайных совпадений производится поиск позитронного кандидата в таких же 50-микросекундных временных интервалах, но отстоящих от нейтрона на 5, 10, 15 мс и т. д., в которых истинный позитрон заведомо отсутствует. Использование множества таких интервалов позволяет увеличить статистику набора случайных совпадений, так что процедура вычитания такого фона практически не увеличивает

ошибок измеряемых величин. Перед вычитанием к событиям случайных совпадений применяются в точности такие же критерии отбора, что и для кандидатов в ОБР. Скорость счета оставшихся случайных пар несколько ниже, чем событий ОБР, хотя и сравнима с ней по порядку величины.

Форма спектра для фона космических частиц вычисляется по событиям, сопровождающимся регистрацией мюона. Основная часть таких событий отбрасывается благодаря срабатыванию вето-системы, которая, однако, не является идеально герметичной. Доля космических событий, пропускаемая системой активного вето, вычисляется при анализе данных за время полного выключения реактора. В рабочих наборах данных производится вычитание спектра мюонного фона в соответствии с вычисленной долей пропускания. Наконец, отдельно учитывается компонента фона быстрых нейтронов, порожденных энергичными мюонами в материалах конструкций, окружающих детектор. Вычитание этой компоненты производится путем линейной экстраполяции спектров из области 10–16 МэВ, где события ОБР уже полностью отсутствуют. Вычитаемые вклады этих двух компонент мюонного фона по отношению к количеству событий ОБР в верхнем положении детектора в диапазоне 1–8 МэВ составляют около 3% и 0.25% соответственно. Более подробное обсуждение выделения событий ОБР при анализе данных в эксперименте DANSS можно найти в работе [10].

На рис. 1 приведены спектры позитронов, регистрируемые установкой DANSS в верхнем, среднем и нижнем положениях детектора, после наложения всех критериев отбора и вычитания упомянутых компонент фона. Используются только измерения на номинальной мощности реактора; выполнена коррекция, учитывающая вклады от соседних работающих реакторов станции (не более 0.6%). Для сравнения также показан спектр фона от космических мюонов в верхнем положении детектора, пропускаемый системой вето. Фон быстрых нейтронов не виден в масштабе рисунка. Числа среднесуточного счета событий, соответствующие изображенным спектрам в интервале энергий 1–8 МэВ, приведены в табл. 1. Ошибки, приведенные на рисунке и в таблице, отражают только статистические погрешности.

УЧЕТ РАССТОЯНИЯ ДО РЕАКТОРА

Основная физическая задача эксперимента DANSS подразумевает проведение измерений на различных расстояниях от активной зоны реактора. Для мониторинга мощности, наоборот, необходимо учесть перемещения детектора так, чтобы скорости счета на различных расстояниях оказались сопоставимы. Двумя основными

Таблица 1. Скорость счета событий ОБР и фона в установке DANSS

Положение детектора	Расстояние до центра активной зоны, м	Количество событий ОБР в сутки, 1–8 МэВ	Доля мертвого времени	Фактор расстояния
Верхнее	10.7	4910 ± 11	0.0811	1.0000
Среднее	11.7	4101 ± 11	0.0851	0.8352
Нижнее	12.7	3490 ± 8	0.0867	0.7082
Верхнее, космический фон	10.7	133 ± 0.3		

факторами, определяющими зависимость счета от положения детектора, являются уменьшение потока антинейтрино по мере удаления от реактора и изменения мертвого времени установки в несколько различающихся внешних фоновых условиях, характерных для различных положений детектора.

Собственно экспериментальная аппаратура DANSS имеет пренебрежимо малое мертвое время (~0.5 мкс при частоте триггерных событий около 1 кГц). Заметное проявление эффекта мертвого времени возникает при анализе данных за счет применения “изолирующего” отбора, который, по сути, исключает из рассмотрения определенные временные интервалы, следующие за триггерами того или иного типа. Соответственно, доля мертвого времени непосредственно связана с частотой триггеров установки, которая, в свою очередь, различается в разных положениях детектора. Наибольшую чувствительность к изменениям фоновых условий имеет скорость счета вето-системы, которая играет существенную роль в “изолирующих” критериях. О доле мертвого времени и ее изменениях при перемещении детектора можно судить по числам в четвертом столбце табл. 1.

На большом удалении от источника падение потока антинейтрино следует обратной квадратичной зависимости. Однако в случае DANSS расстояние от центра активной зоны реактора до детектора сравнимо с размерами самой активной зоны (около 3.5 м по высоте и 3 м в диаметре), и отклонения от указанной простой закономерности, соответствующей точечному источнику, оказываются заметными. Для расчета относительного фактора уменьшения потока, регистрируемого детектором, используется простейшее Монте-Карло моделирование: разыгрываются положения точек рождения антинейтрино в рабочем объеме реактора и точек регистрации позитрона ОБР в чувствительной области детектора, причем при рождении антинейтрино учитываются профили горения ядерного топлива по высоте и радиусу активной зоны, получаемые от

персонала станции. Эволюция вертикального профиля горения с течением времени топливной кампании может приводить к изменениям эффективного расстояния, однако проведенные исследования показали, что этим эффектом можно пренебречь в пределах рассматриваемой точности измерения. В последней колонке табл. 1 приведены факторы ослабления нейтринного потока для трех положений детектора, рассчитанные описанным методом с использованием профиля горения, усредненного за анализируемый период топливных кампаний.

Для сопоставления счетов на различных расстояниях от центра реактора они приводятся к счету в верхнем положении детектора с учетом фактора расстояния и различий мертвого времени. В результате такой коррекции средние скорости счета во всех трех положениях согласуются лучше 0.5%.

МОНИТОРИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА

График движения детектора DANSS имеет недельный цикл и рассчитан таким образом, чтобы накапливать приблизительно одинаковую статистику ОБР в каждом из трех положений. При регулярном движении в течение недели детектор проводит 48, 56 и 64 ч соответственно в верхнем, среднем и нижнем положениях. Записанные данные при обработке разделяются по интервалам, соответствующим определенным положениям детектора, либо по интервалам в 2–3 сут, если перемещение детектора по каким-либо причинам не производилось. Количество событий ОБР в типичном интервале около 1×10^4 , однако статистическая ошибка одиночного измерения несколько больше 1% из-за случайного фона. Как уже отмечалось, процедура вычитания случайного фона является математически строгой и не увеличивает неопределенности измерений, однако сама величина статистической ошибки определяется количеством событий до вычитания случайного фона.

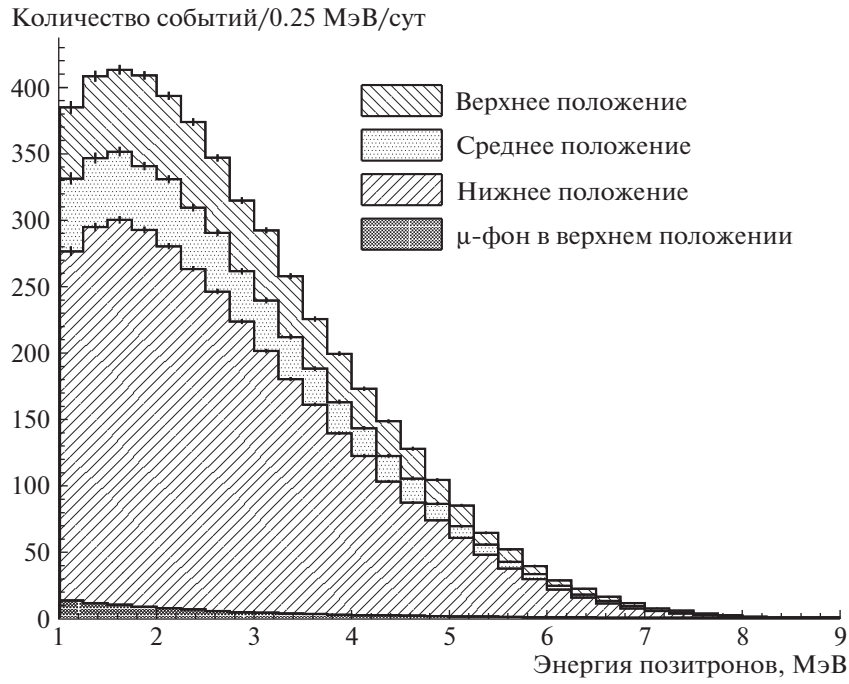


Рис. 1. Спектры позитронов в событиях обратного β -распада после вычитания всех фонов в трех положениях детектора; спектр космических мюонов показан в масштабе, соответствующем проникновению через систему вето.

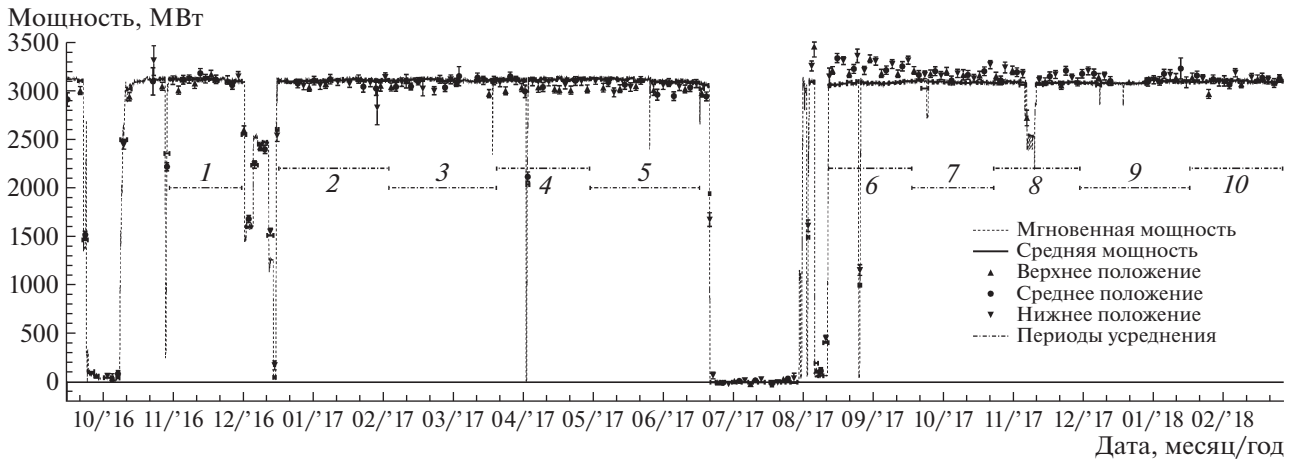


Рис. 2. Сравнение мощности реактора и скорости счета событий ОБР в детекторе DANSS в различные периоды топливной кампании.

На рис. 2 приведено сравнение скорости счета событий ОБР в детекторе DANSS и мощности ближайшего к установке промышленного реактора на полуторогодичном отрезке времени с октября 2016 г. по март 2018 г. Данные по тепловой мощности реактора предоставлены персоналом станции на основе штатных способов ее определения. Мгновенные значения мощности показаны пунктирной линией, тогда как короткие сплошные горизонтальные отрезки отражают среднюю величину мощности в типичных двухсуточных интервалах измерений. При вычислении скорости счета ОБР в

интервале позитронных энергий 1–8 МэВ применены все критерии отбора, произведены вычитания всех фонов и учтено влияние соседних реакторов станции. Скорость счета в среднем и нижнем положениях детектора приведена к верхнему положению в соответствии с описанной методикой учета расстояния. Фактическое положение детектора обозначено формой маркера: треугольники с вершинами вверх и вниз соответствуют верхнему и нижнему положениям, кружки представляют среднее положение. Для уточненных численных оценок измерения на полной номинальной мощности

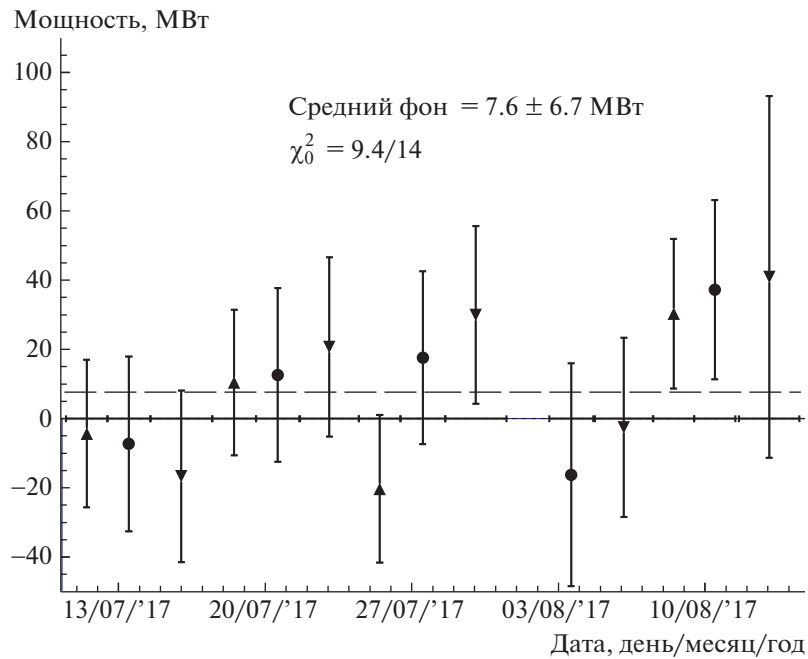


Рис. 3. Счет событий ОБР в единицах мощности в период полной остановки реактора.

реактора объединены в 10 периодов, отраженных штрихпунктирными линиями с обозначением номера периода.

Соотношение между мощностью реактора и скоростью счета событий в детекторе плохо поддается точному теоретическому расчету из-за неопределенностей как в моделировании свойств детектора, так и самих спектров испускания антинейтрино. Однако это соотношение можно установить, выполнив нормировку счета детектора на мощность в течение небольшого отрезка времени. В данном случае для нормировки использованы данные периода 1, содержащего 12 измерений на постоянной номинальной мощности 3100 МВт. Исключительная стабильность работы детектора вместе с отработанной методикой его энергетической калибровки позволяет распространить полученную нормировку на весь рассматриваемый временной отрезок.

Стоит обратить внимание на весьма низкую величину остаточного фона, характерную для обработки данных с детектора DANSS. Рисунок 3 представляет в увеличенном виде измерения скорости счета ОБР в период полного выключения реактора. Как и на рис. 2, произведено вычитание всех фонов, формы маркеров соответствуют положению детектора, мгновенная и средняя мощности имеют нулевое значение, величина скорости счета пересчитана в эквивалент мощности на основе той же нормировки. Среднее по приведенным измерениям показано штриховой линией. Его величина составляет лишь 0.25% от номинальной полной мощности и сопоставима с нулевой величиной на

уровне 1.1 стандартной ошибки, а χ^2 нулевой гипотезы составляет 9.4 на 14 степеней свободы. Таким образом, величина остаточного фона в получаемых данных DANSS существенно ниже статистической точности измерений и может быть безопасно исключена из дальнейшего рассмотрения.

Значительная продолжительность времени наблюдения позволяет проанализировать различные периоды топливных кампаний, протяженность которых составляет около 500 эффективных суток для современного технологического процесса на реакторах данного типа. Период 1 приблизительно соответствует середине кампании 2016–2017 гг. (далее “кампания А”), ему предшествует двухнедельное снижение мощности до минимально контролируемой величины в 1–2% от номинальной. Период 5 — завершающий для кампании А, за ним следует сорокадневная полная остановка реактора для перезагрузки топливных элементов. Шестой период отражает первый месяц номинальной работы реактора в новой топливной кампании (“кампания Б”), несколько отличающейся от предыдущей по составу загруженного топлива. Последний, десятый период наблюдения близок к середине кампании Б. Период 1 начинается одновременно с началом регулярного набора статистического материала экспериментом DANSS, окончание периода 10 соответствует количеству материала, обработанного к настоящему времени. Рассматриваемый набор данных позволяет произвести анализ скорости счета как раз на протяжении одной полной топливной кампании.

Некоторые качественные выводы можно сделать еще до проведения численных оценок. Непосредственно из рис. 2 видно, что к концу кампании А скорость счета антинейтрино падает. Основной вклад в этот эффект дает наработка ^{239}Pu , имеющего более низкий выход нейтрино по сравнению с ^{235}U , количество которого, наоборот, уменьшается. Свежее топливо в начале кампании Б, наоборот, содержит больше ^{235}U и меньше ^{239}Pu в сравнении с периодом нормировки, что и проявляется как заметное увеличение счета. Эффекты нестационарности можно наблюдать на измерениях, непосредственно следующих за резкими изменениями режима энерговыделения. Так, после резких снижений счет ОБР несколько превосходит тепловую мощность, что определяется избытком доли долгоживущих β -распадных изотопов по сравнению с равновесным режимом. Можно ожидать сравнимое по величине относительное уменьшение счета после быстрого увеличения мощности, соответствующее еще не накопившемуся количеству долгоживущих изотопов, однако этот эффект менее выражен.

УЧЕТ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА

В то время как расчеты динамических эффектов крайне затруднительны, выполнение коррекции данных с учетом квазистационарных процессов при изменении состава реакторного топлива по ходу кампании вполне реально. Следуя традициям работ [1–6], будем описывать изотопный состав топлива в терминах долей делений f_i соответствующих четырех основных изотопов, так что $\sum_{i=1}^4 f_i = 1$. Тогда тепловая мощность реактора P и счет антинейтрино в детекторе C в произвольный момент времени t представляются в виде

$$P(t, T) = F(t) \sum_{i=1}^4 f_i(T) e_i, \quad (1)$$

$$C(t, T) = \alpha F(t) \sum_{i=1}^4 f_i(T) I_i,$$

здесь T — время от начала кампании, $F(t)$ — число делений в единицу времени, e_i — средняя энергия деления i -го изотопа, а величина αI_i отражает количество событий обратного β -распада, зарегистрированных в детекторе от одного акта деления соответствующего элемента топлива. Собственно величины I_i представляют собой интегралы спектров позитронов в диапазоне энергий, регистрируемых установкой. Для их вычисления выполняется Монте-Карло моделирование на основе нейтринных спектров каждого топливного изотопа и сечений обратного β -распада [3, 4]. События, разыгранные в реалистичной модели детектора, проходят

затем такие же отборы, как и записанные экспериментальные данные. Величины I_i отражают лишь относительные вклады различных компонент топлива, тогда как абсолютный смысл они получают за счет параметра α , вычисление которого затруднительно в описанном подходе.

Коэффициент пропорциональности r между счетом детектора и мощностью реактора сохраняется на коротком масштабе времени, но подвержен медленным изменениям с течением времени кампании:

$$r(T) = \frac{C(t, T)}{P(t, T)} = \alpha \frac{\sum_{i=1}^4 f_i(T) I_i}{\sum_{i=1}^4 f_i(T) e_i}. \quad (2)$$

Параметр α может быть независимо определен из нормировки, но удобнее пользоваться независимой от него функцией коррекции R , которая выражает относительное изменение r по сравнению с заданным моментом кампании:

$$R(T) = \frac{r(T)}{r(T_0)}. \quad (3)$$

Такая функция коррекции была применена к данным детектора DANSS, полученным на протяжении интервала времени, приблизительно соответствующего одной топливной кампании. Изменения состава ядерного топлива, выраженные в терминах долей деления f_i четырех основных изотопов, приведены на рис. 4 в зависимости от календарного времени кампаний А и Б. Интервал времени, использованный для настоящего анализа, отмечен вертикальными линиями из длинного и трех коротких штрихов. Численные значения величин, входящих в формулу (2) для каждого из четырех основных изотопов, сведены в табл. 2. Значения средних энергий деления взяты из [2]. Доли делений f_i приведены в таблице только для начала и окончания обеих кампаний, тогда как при вычислениях использовались помесечные значения, полученные от персонала АЭС; для вычислений в произвольное время кампании используется линейная интерполяция. Следует отметить, что стандартные расчеты, выполняемые персоналом станции, основываются на массовых долях компонент топлива; при этом именно эти расчеты имеют высокую точность, включая учет динамики многочисленных прочих изотопов. Вычисления долей деления более сложны — они должны учитывать, например, распределения нейтронных потоков в объеме реактора — и выполнялись по специальному запросу коллектива эксперимента.

Рисунок 5 позволяет проанализировать результаты произведенной коррекции. Для увеличения

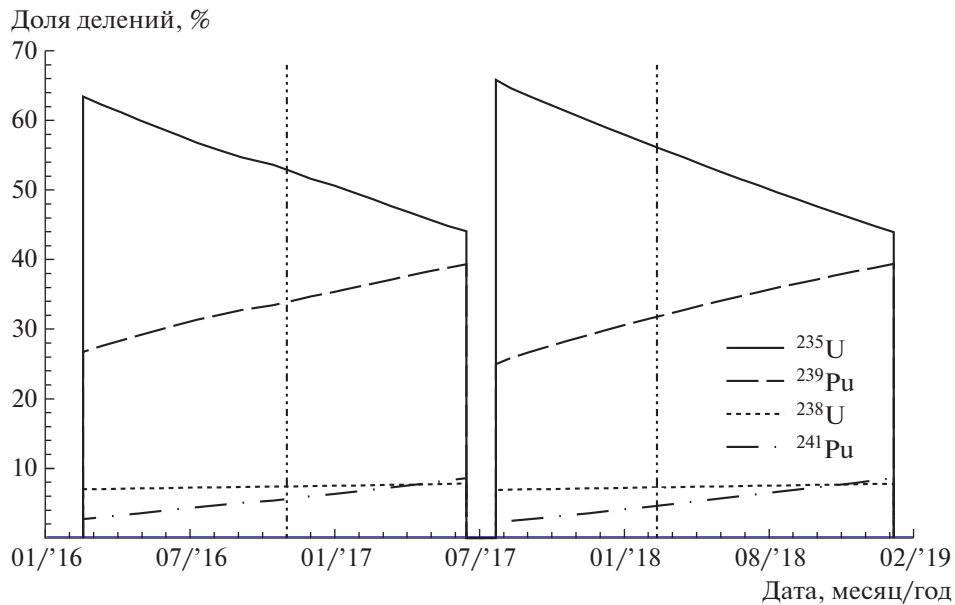


Рис. 4. Изменение изотопного состава на протяжении топливных кампаний А и Б. Интервал времени, использованный для настоящего анализа, ограничен вертикальными штрихпунктирными линиями (один длинный и три коротких штриха).

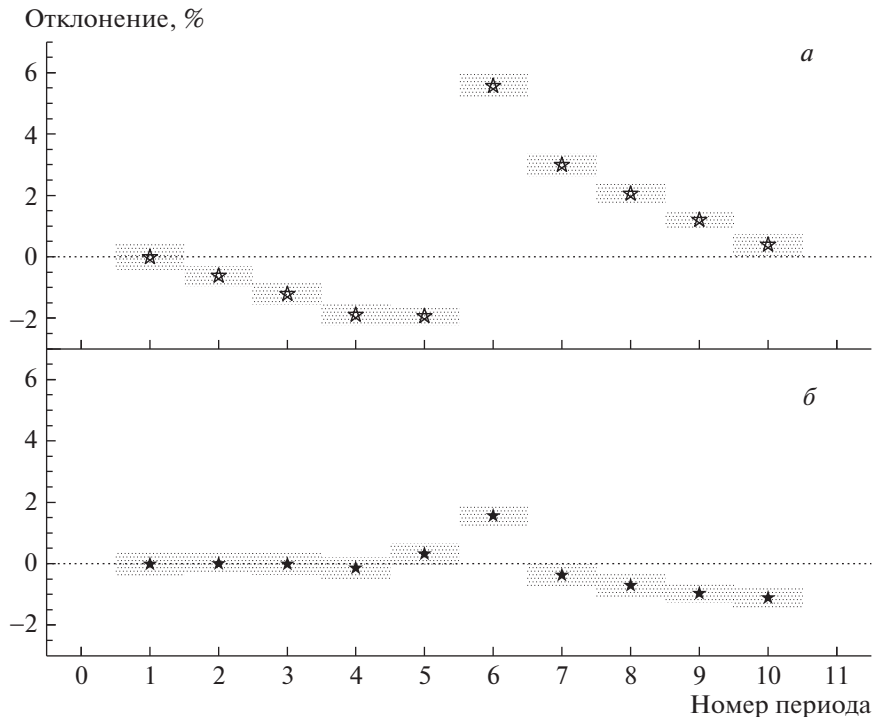


Рис. 5. Относительное отклонение скорости счета ОБР и тепловой мощности реактора по периодам усреднения: *а* — без коррекции на состав топлива, *б* — с учетом изменения изотопного состава по времени топливных кампаний А и Б.

статистической значимости вычисления производились по десяти периодам усреднения, приведенным на рис. 2. Нормированный счет детектора в каждом двухсуточном интервале измерений подвергался коррекции по формуле (3) по отношению к середине нормировочного периода 1. Затем для

каждого измерения вычислялось отношение счета ОБР к средней тепловой мощности соответствующего интервала и выполнялось усреднение по периоду. Отклонение полученных величин от единицы, выраженное в процентах, представлено на рис. 5б. Для сравнения, на рис. 5а представлены

Таблица 2. Параметры коррекции скорости счета ОБР для различных компонент топлива

Изотоп	f_i , начало кампании А	f_i , конец кампании А	f_i , начало кампании Б	f_i , конец кампании Б	e_i , средняя энергия деления, МэВ	I_i , интеграл спектра позитронов, у.е.
^{235}U	0.635	0.441	0.658	0.439	201.92	1.152
^{238}U	0.070	0.078	0.069	0.078	205.52	1.782
^{239}Pu	0.267	0.393	0.249	0.394	209.99	0.724
^{241}Pu	0.027	0.086	0.022	0.086	213.6	1.027

аналогичные величины до введения коррекции на изменение состава топлива. По горизонтали отложен номер периода, вертикальный размер заштрихованных прямоугольников отражает статистическую неопределенность результата усреднения.

До введения коррекции наблюдается приблизительно двухпроцентное уменьшение счета детектора к концу кампании А (период 5), тогда как скачок, вызванный загрузкой свежего топлива перед шестым периодом, составляет около 8%. Счета в серединах кампаний А и Б (периоды 1 и 10) почти не отличаются.

Учет выгорания топлива существенно улучшает согласие между рассматриваемыми методами измерения мощности. Так, от середины до конца кампании А различие заметно сокращается и не выходит за 0.4%. В большей части кампании Б (периоды 7–10) рассогласование также уменьшается и не превосходит 1.1%. Исключением выглядит первый месяц после перезагрузки топлива (период 6), в котором отклонение выбивается скачком на 1.6%, причем в другую сторону, чем остальные периоды кампании Б. Тенденция к небольшому

уменьшению счета, которую можно предположить ближе к окончанию кампании Б, может объясняться несколькими эффектами. Одной из причин может быть различие в калибровке штатной аппаратуры измерения мощности реактора в периоды до и после перезагрузки топлива. Нельзя исключить также некоторого непостоянства эффективности детектора, хотя явных причин для такого предположения не обнаруживается. Наконец, с вероятностью в несколько процентов, отклонения точек можно и вовсе приписать статистическим флуктуациям.

Процессам, играющим заметную роль в первый месяц после перезагрузки топлива, стоит уделить отдельное внимание. Возможным объяснением заметного увеличения счета ОБР в этот период времени может быть эффект прометиево-самариевого отравления. В результате делений топливных компонентов и последующих β -распадов образуется заметное количество изотопа ^{149}Pm , который с периодом полураспада 53 ч превращается в стабильный ^{149}Sm . Последний имеет резонансное (41000 бн) сечение поглощения тепловых нейтронов, в результате которого переходит в стабильные изотопы, не играющие заметной роли в нейтронном балансе. При длительной стационарной работе реактора на полной мощности образование самария уравнивается его выгоранием в нейтронном поле, так что равновесная концентрация этого поглотителя нейтронов невелика. При остановке реактора на несколько суток или более, практически весь образовавшийся прометий распадается в самарий, так что количество последнего существенно увеличивается и начинает заметно сказываться на размножении нейтронов при последующем запуске реактора. Скорость выгорания ^{149}Sm такова, что достижение равновесной концентрации происходит приблизительно через 30 сут после выхода на номинальную мощность.

По окончании топливной кампании в реакторах ВВЭР-1000 производится замена приблизительно одной трети тепловыделяющих сборок на новые, тогда как остальные продолжают использоваться для обеспечения более полного выгорания. После

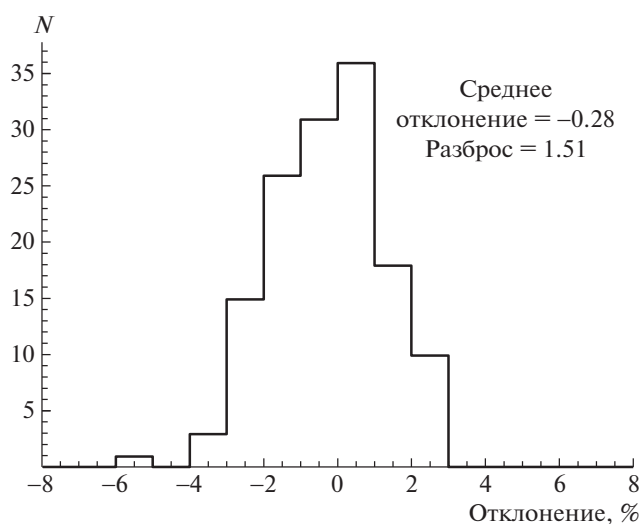


Рис. 6. Распределение относительного отклонения счета ОБР и тепловой мощности реактора для двухсуточных интервалов измерения.

перезагрузки топлива только в этих сборках содержится наработанный ^{239}Pu , но именно в них же имеется заметная концентрация самария, локально ослабляющая нейтронные потоки. Таким образом, в начале новой кампании в течении примерно 30 сут доля суммарной мощности от новых сборок несколько выше. Соответственно, до установления равновесной концентрации ^{149}Sm должна наблюдаться увеличенная доля делений ^{235}U , приводящая к повышенному счету антинейтрино.

Консультации с персоналом АЭС выявили, что эффект самариевого отравления не был учтен при расчетах долей делений, так что вычисленная поправка к счету детектора в первый месяц кампании (период б) заведомо не может считаться корректной. Двухпроцентная величина превышения скорости счета над равновесным уровнем кампании Б может предполагать весьма значительное увеличение доли деления ^{235}U , которая в этом случае может составлять приблизительно 0.75 на начало кампании Б (ср. 0.658 в табл. 2), однако более точные расчеты должны выполняться специалистами по физике реакторов.

Как уже отмечалось, коррекция скорости счета антинейтрино с учетом изменения изотопного состава реакторного топлива заметно увеличивает точность, с которой этот физический процесс может быть использован для независимого мониторинга мощности реактора. Достоверность выполняемых измерений скорости счета антинейтрино и алгоритмов коррекции может быть проверена при помощи простейшего статистического анализа. Для каждого двухсуточного интервала (одна точка на рис. 2) вычисляется отношение мощности, вычисленной по скорости счета с учетом топливной коррекции к средней тепловой мощности реактора за время измерения. Отклонение этой величины от единицы используется для заполнения гистограммы, представленной на рис. 6. Из рассмотрения исключаются первый месяц после перезагрузки топлива и измерения на неполной мощности реактора. Небольшое отрицательное значение среднего отклонения (-0.28%) не противоречит результатам топливной коррекции на нижней панели рис. 5. Среднеквадратичный разброс отношения составляет 1.5%, что соответствует статистической погрешности отдельных измерений. Полученные численные значения позволяют оценить систематическую погрешность метода измерения мощности ядерного реактора на основе регистрации антинейтрино величиной около 0.3% при статистической значимости двухсуточного измерения 1.5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена возможность применения детектора антинейтрино как независимого инструмента для мониторинга мощности

промышленного ядерного реактора. Детектор объемом 1 м^3 на основе пластикового скинтиллятора позволяет достигнуть статистической точности 1.5% за 2 сут измерений при его расположении в 10 м от центра активной зоны. При этом остаточный вклад фона может быть сделан пренебрежимо малым, а долговременная стабильность установки, обеспечиваемая ее постоянной калибровкой, позволяет анализировать результаты на протяжении топливной кампании. Коррекция на изменения изотопного состава топлива с течением времени кампании позволяет, в основном, избежать систематических ошибок, связанных с различиями нейтринных выходов от различных топливных компонент. Однако процедура расчета долей деления, лежащая в основе коррекции, требует более детальной проработки. В частности, необходим учет самариевого отравления. Расчет первичных нейтринных спектров также является предметом многочисленных дискуссий и не предоставляет в настоящее время однозначного окончательного ответа. Тем не менее, даже упрощенный подход, реализованный в настоящей работе, позволяет устранить систематические эффекты от изменения топливного состава до уровня, заметно меньшего по сравнению со статистической ошибкой отдельного измерения.

Коллаборация DANSS выражает глубокую признательность администрации и персоналу Калининской атомной станции за постоянную поддержку и помощь при проведении эксперимента. Особой благодарности заслуживают коллективы отдела радиационной безопасности и цеха тепловой автоматики и измерений за содействие при проведении организационных процедур. Данная работа была бы вообще невозможна без участия сотрудников лаборатории физики реакторов, которые обеспечивали эксперимент регулярными данными о состоянии реактора и поддерживали плодотворные обсуждения.

Создание экспериментальной установки DANSS стало возможным благодаря поддержке Госкорпорации "РосАтом" в рамках государственных контрактов № Н.4х.44.90.13.1119 и № Н.4х.44.9Б.16.1006. Длительная эксплуатация детектора, получение и обработка экспериментальных данных выполняются в рамках гранта № 17-12-01145 Российского научного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. В. Климов, В. И. Копейкин, Л. А. Микаэлян, К. В. Озеров, В. В. Синев, Ат. энергия **76**, 130 (1994) [At. Energy **76**, 123 (1994)].
2. В. И. Копейкин, Л. А. Микаэлян, В. В. Синев, ЯФ **67**, 1916 (2004) [Phys. At. Nucl. **67**, 1892 (2004)].
3. P. Huber, Phys. Rev. C **84**, 024617 (2011).

4. Th. A. Mueller, D. Lhuillier, M. Fallot, A. Letourneau, S. Cormon, M. Fechner, L. Giot, T. Lasserre, J. Martino, G. Mention, A. Porta, and F. Yermia, *Phys. Rev. C* **83**, 054615 (2011).
5. F. P. An *et al.* (Daya Bay Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **118**, 251801 (2017).
6. RENO Collab., arXiv: 1806.00574v2 [hep-ex].
7. DANSS Collab., *JINST* **11**, P11011 (2016).
8. И. Г. Алексеев, Д. В. Калинин, И. В. Мачихильян, В. М. Нестеров, Н. А. Погорелов, В. Ю. Русинов, Д. Н. Свирида, А. С. Старостин, Е. И. Тарковский, ПТЭ, № 3, 10 (2018) [*Instrum. Exp. Tech.* **61**, 328 (2018)].
9. И. Г. Алексеев, В. В. Белов, М. В. Данилов, И. В. Житников, А. С. Кобякин, А. С. Кузнецов, И. В. Мачихильян, Д. В. Медведев, В. Ю. Русинов, Д. Н. Свирида, Н. А. Скробова, А. С. Старостин, Е. И. Тарковский, М. В. Фомина, Е. А. Шевчик, М. В. Ширченко, *Письма в ЭЧАЯ* **15**, 216 (2018) [*Phys. Part. Nucl. Lett.* **15**, 272 (2018)].
10. I. Alekseev, V. Belov, V. Brudanin, M. Danilov, V. Egorov, D. Filosofov, M. Fomina, Z. Hons, S. Kazartsev, A. Kobayakin, A. Kuznetsov, I. Machikhiliyan, D. Medvedev, V. Nesterov, A. Olshevsky, N. Pogorelov, *et al.*, *Phys. Lett. B* **787**, 56 (2018).

INDUSTRIAL REACTOR POWER MONITORING USING ANTINEUTRINO COUNTS IN THE DANSS DETECTOR

I. G. Alekseev^{1),2),3)}, V. V. Belov⁴⁾, V. B. Brudanin⁴⁾, G. G. Guzeev⁵⁾, M. V. Danilov⁶⁾, V. G. Egorov^{4),7)}, I. V. Zhitnikov⁴⁾, D. R. Zinatulina⁴⁾, S. V. Kazartsev^{4),7)}, A. S. Kobayakin^{1),3)}, A. S. Kuznetsov⁴⁾, I. V. Machikhiliyan¹⁾, D. V. Medvedev⁴⁾, V. M. Nesterov¹⁾, A. G. Olshevsky⁴⁾, N. A. Pogorelov¹⁾, D. V. Ponomarev⁴⁾, I. E. Rozova⁴⁾, N. S. Romyantseva^{4),7)}, V. Yu. Rusinov¹⁾, E. I. Samigullin¹⁾, D. N. Svirida¹⁾, N. A. Skrobova^{1),3),6)}, A. S. Starostin¹⁾, E. I. Tarkovsky¹⁾, D. V. Filosofov⁴⁾, M. V. Fomina⁴⁾, V. A. Khvatov⁵⁾, V. M. Chapaev⁵⁾, Ye. A. Shevchik⁴⁾, M. V. Shirchenko⁴⁾, Yu. A. Shitov^{4),8)}

¹⁾ NRC “Kurchatov Institute” — ITEP, Moscow, Russia.

²⁾ National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia.

³⁾ Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia.

⁴⁾ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia.

⁵⁾ Kalinin Nuclear Power Plant, Udomlya, Russia.

⁶⁾ Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

⁷⁾ Dubna State University, Russia.

⁸⁾ Imperial College London, South Kensington Campus, London, United Kingdom.

Detection of antineutrino by the reaction of the inverse β -decay can be used for an independent monitoring of a nuclear reactor power. DANSS detector is located directly under a commercial WWER-1000 reactor and counts up to 5000 antineutrino per day, providing the accuracy of 1.5% in 2 days of measurement. A powerful system of the passive and active shielding in combination with the fine spatial segmentation of the detector allows to diminish the contribution of the background processes to a level, negligible in comparison to the statistical error. The influence of the nuclear fuel composition on the neutrino flux can be accounted for based on the input from the NPP staff.