

Измерение энерговыработки реактора ВВЭР-1000 по потоку антинейтрино из активной зоны

А.В. Абрамов,¹ Р.Р. Алыев,² М.Б. Громов,^{3,4} И.Н. Жутиков,^{1,5} С.М. Киселев,² А.В. Константинов,¹ Д.С. Кузнецов,¹ Е.А. Литвинович,^{1,5,*} И.Н. Мачулин,^{1,5} А.Е. Мурченко,¹ А.М. Немерюк,¹ Р.Р. Нугманов,¹ А.Ю. Оралбаев,^{1,5} Д.В. Попов,^{1,5} А.А. Растишин,^{1,5} М.Д. Скорохватов,^{1,5} М.А. Стриж,^{1,3,†} С.В. Сухотин,¹ В.А. Хватов,² А.С. Чепурнов,³ Д.А. Чмыхало,^{1,5} А.В. Этенко^{1,5}

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Россия, 123182, Москва

²Филиал АО Концерн Росэнергоатом «Калининская атомная станция». Россия, 171841, Удомля

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва

⁴Объединенный институт ядерных исследований. Россия, 141980, Дубна

⁵Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Россия, 115409, Москва
(Поступила в редакцию 16.10.2024; после доработки 22.11.2024; подписана в печать 01.12.2024)

Представлены результаты измерений энерговыработки промышленного ядерного реактора по потоку антинейтрино из активной зоны. Измерения проведены детектором iDREAM на удалении 19.5 м от центра активной зоны реактора ВВЭР-1000 энергоблока №3 Калининской АЭС. Получены оценки чувствительности детектора iDREAM к изменению мощности реактора за 2-, 4- и 6-часовые интервалы набора статистики взаимодействий антинейтрино.

PACS: 29.90.+g УДК: 539.123.6.

Ключевые слова: нейтринный детектор, реакторные антинейтрино, ядерный реактор.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2520202](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2520202)

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость развития комплементарных методов контроля ядерных материалов (ЯМ) и, в частности, процессов в активной зоне (АЗ) ядерного реактора широко обсуждается в МАГАТЭ начиная с 1970-х гг. Идея использования нейтрино для контроля ядерного реактора была впервые высказана в докладе [1], а в [2] рассматривались вопросы применения нейтринного детектора для дистанционного независимого определения энерговыработки реактора с целью обеспечения гарантий нераспространения ЯМ. В 1980-х гг. в исследованиях, проведенных на реакторе ВВЭР-440 Ровенской АЭС [3], возможность дистанционного мониторинга реактора при помощи нейтринного детектора была впервые продемонстрирована.

Детектирование электронных антинейтрино $\bar{\nu}_e$, которые образуются в β -распадах осколков деления изотопов урана и плутония, происходит по реакции обратного бета-распада (ОБР)

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n, \quad (1)$$

в которой образуются позитрон и нейтрон.

Порог реакции (1) составляет $T_{\bar{\nu}_e} = 1.8$ МэВ. Детектируются мгновенный сигнал от позитрона и задержанный от нейтрона, причем время захвата нейтрона зависит от свойств детектирующей среды.

В настоящее время среди детекторов реакторных антинейтрино для фундаментальных и прикладных задач наибольшее распространение получили установки, в которых в качестве водородосодержащей мишени используются органические сцинтилляторы. С целью оптимизации условий регистрации нейтронов в реакции (1) в мишень добавляются элементы с высоким сечением захвата тепловых нейтронов: ^{nat}Gd , ^6Li , ^{10}B . По экономическим показателям более предпочтительны детекторы на основе жидкого органического сцинтиллятора (ЖОС), которые легко масштабируются и являются более дешевыми.

Детектор iDREAM (industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring) разрабатывался совместно НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова и НИЦ «Курчатовский институт» как прототип промышленного прибора на основе ЖОС для удаленного мониторинга реакторов АЭС по нейтринному излучению. Установка смонтирована на расстоянии 19.5 м от центра АЗ реактора ВВЭР-1000 с тепловой мощностью $P_{th} = 3000$ МВт в подреакторном помещении энергоблока №3 Калининской АЭС (КАЭС). Мишенью для нейтрино служит 1.1 м^3 ЖОС, синтезированный на основе линейного алкилбензола (ЛАБ) с добавкой 0.1% гадолиния. Детектор отличается конструктивными особенностями, обеспечивающими возможность его безопасной и удобной эксплуатации в условиях промышленной АЭС, а также возможностью тиражирования на производстве.

Современные реакторные установки снабжены широким спектром средств внутриреакторного кон-

* E-mail: Litvinovich_EA@nrcki.ru

† E-mail: strizh.mal5@physics.msu.ru

троля. Тем не менее нейтринный метод контроля обладает рядом отличительных особенностей, таких как универсальность, дистанционность и автономность, которые, в частности, могут обеспечить контроль состояния АЗ в нештатных ситуациях, включая тяжелые запроектные аварии (см., например, [4]). Для практических приложений представляет интерес время t , за которое нейтринный детектор способен обеспечить измерение энерговыработки W :

$$W(t) = \int_{t_1}^t P_{th}(t') dt', \quad (2)$$

в том числе при работе реактора на отличных от номинального уровнях мощности, на заданном уровне достоверности. Ниже представлены результаты измерений энерговыработки реактора ВВЭР-1000 по потоку $\bar{\nu}_e$ и результаты анализа чувствительности детектора iDREAM к изменению мощности этого реактора.

1. АНТИНЕЙТРИНО ОТ РЕАКТОРА И СИГНАЛ В НЕЙТРИННОМ ДЕТЕКТОРЕ

Ядерный реактор с водой под давлением является сегодня наиболее распространённым типом коммерческих реакторов в мире. Топливные сборки для реакторов такого типа содержат, как правило, до 5% ^{235}U . Основная динамика состава активной зоны реактора, оказывающая влияние на интенсивность и спектр антинейтрино, связана с процессом выгорания изотопов урана (^{235}U и ^{238}U) и накоплением изотопов плутония (^{239}Pu и ^{241}Pu). На один акт деления в реакторе выделяется в среднем ~ 200 МэВ тепловой энергии и 6 $\bar{\nu}_e$. Таким образом, промышленный реактор с тепловой мощностью 3 ГВт излучает порядка $6 \cdot 10^{20}$ $\bar{\nu}_e$ в с.

Поскольку спектр $\bar{\nu}_e$ от ^{235}U является более жестким, чем спектр $\bar{\nu}_e$ от ^{239}Pu , полный спектр $\bar{\nu}_e$ от реактора несет информацию о текущей композиции ядерного топлива в АЗ. На этом обстоятельстве основывается возможность непосредственного определения по спектру $\bar{\nu}_e$ динамики накопления ^{239}Pu . Для реактора ВВЭР-1000 с длительностью топливной кампании 500 эфф. сут разница в числе испускаемых антинейтрино в начале и конце кампании при одинаковой мощности может достигать $\sim 10\text{--}15\%$ для $E_{\bar{\nu}_e} \gtrsim 5\text{--}6$ МэВ.

Как уже отмечалось, взаимодействия $\bar{\nu}_e$ в нейтринном детекторе регистрируются по продуктам реакции ОБР (1) — позитрону, энергия которого однозначно связана с энергией антинейтрино ($E_{e^+} = E_{\bar{\nu}_e} - 0.78$ МэВ), и нейтрону, запаздывающая регистрация которого обеспечивает выделение «полезных» нейтринных событий взаимодействия среди маскирующих фоновых событий. Замедление и диффузия нейтрона до его захвата позволяют разделить во времени сигналы от позитрона и нейтрона. Уникальная сигнатура события ОБР (пози-

трон — мгновенное событие, нейтрон — задержанное) позволяет повысить соотношение эффект/фон нейтринного детектора.

2. ДЕТЕКТОР iDREAM

Детектор iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring) создан совместными усилиями специалистов НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова и НИЦ «Курчатовский институт» и был специально разработан в качестве прототипа промышленного детектора для применения на АЭС.

Концепция детектора заключается в использовании простой конструкции и хорошо зарекомендовавших себя технологий, что обеспечивает простоту изготовления, монтажа, обслуживания, а также высокую ремонтпригодность установки. Начиная с 2021 г. детектор проходит испытания в подреакторном помещении энергоблока №3 Калининской АЭС, на удалении 19.5 м от центра АЗ. Оборудование занимает 20 м² площади и работает автономно, не мешая функционированию других систем АЭС и работе ее персонала.

Детектор iDREAM (рис. 1) в основе своей конструкции имеет два коаксиальных бака из нержавеющей стали толщиной 2 мм, поделенных, в свою очередь, на три внутренних объема — мишень, гамма-кетчер и буфер:

- мишень для $\bar{\nu}_e$ объемом 1.1 м³ заполнена Gd-ЖОС на основе ЛАБ с добавлением флюоров PPO и bis-MSB в концентрациях 2.7 г/л и 0.02 г/л, соответственно. Концентрация гадолиния 1 г/л;
- гамма-кетчер — кольцевой объем 1.7 м³ заполнен ЖОС на основе ЛАБ с добавкой PPO (3.0 г/л) и bis-MSB (0.02 г/л);
- буфер объемом 0.4 м³ заполнен чистым ЛАБ.

Внешний бак имеет диаметр 1858 мм и высоту 1620 мм и конструктивно состоит из трех секций, а внутренний бак имеет диаметр 1254 мм и высоту 1320 мм и разделен крышкой мембраны на две части: мишень и буфер. Для повышения эффективности светосбора стенки кольцевого объема облицованы пленкой из Lumirrog. Мишень просматривают 16, а гамма-кетчер — 12 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) R5912. Малое количество фотоумножителей и, соответственно, каналов электронно-измерительного тракта обеспечивает удобство монтажа и эксплуатации детектора.

Пассивная защита детектора по периметру состоит из нескольких слоев борированного и чистого полиэтилена суммарной толщиной 26 см. Снизу и сверху детектора дополнительно установлены слои чугунных (14 см) и свинцовых (5 см) блоков соответственно. Также сверху детектора установлены

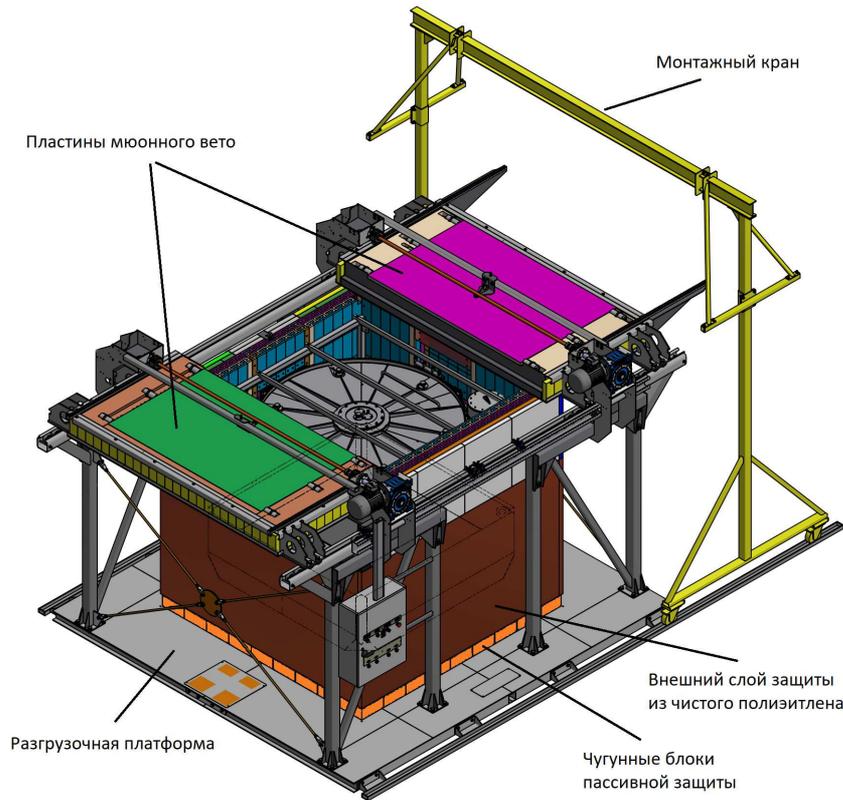


Рис. 1. Изображение детектора антинейтрино iDREAM внутри системы радиационной защиты [6]

пластины мюонного вето, которые, наряду с гамма-кетчером, позволяют отсеивать пролетающие космические мюоны.

Для калибровки детектора разработана специальная система ввода калибровочных р/а источников в глухой канал из нержавеющей стали, смонтированный вдоль вертикальной оси детектора. Калибровка осуществляется γ -источником ^{60}Co и источником быстрых нейтронов ^{252}Cf каждые 2–3 дня. Это позволяет контролировать изменение отклика детектора и вносить поправку на смещение энергетической шкалы, вызванное таким изменением. На протяжении выбранного для анализа периода сбора данных время жизни нейтрона, измеренное при помощи источника ^{252}Cf в центре детектора, составляло $\tau \approx 33$ мкс и оставалось стабильным в пределах $\pm 2\%$ [5].

Подробное описание детектора iDREAM приведено в [6].

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ IDREAM

3.1. Измерение энерговыработки реактора

При постоянной мощности реактора изменение числа регистрируемых детектором $\bar{\nu}_e$ обусловлено только изменением долей делящихся нуклидов α_i

по мере выгорания топлива в АЗ. Зависимость числа $\bar{\nu}_e$, зарегистрированных детектором в единицу времени, от мощности в любой момент кампании удобно представить в виде [3]:

$$N_\nu = \gamma(1 + k)P_{th}, \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\epsilon N_p}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma_5}{E_5}, \quad (4)$$

$$1 + k = \frac{1 + \sum_i \alpha_i (\sigma_i / \sigma_5 - 1)}{1 + \sum_i \alpha_i (E_i / E_5 - 1)}, \quad (5)$$

где P_{th} — тепловая мощность реактора; ϵ — эффективность регистрации антинейтрино; N_p — число протонов в мишени детектора; R — расстояние между геометрическими центрами АЗ и мишени детектора; σ_i — взвешенное со спектром антинейтрино сечение ОБР на одно деление i -го изотопа ($i = 5, 8, 9, 1$); E_i — тепловая энергия деления i -го изотопа; α_i — доля делений i -го изотопа. При такой записи характеристики нейтринного детектора входят только в коэффициент γ .

Для измерений энерговыработки мы будем пользоваться относительным методом, при котором калибровка нейтринного детектора осуществляется

на основе данных о топливном составе и мощности реактора, измеренной штатными методами АЭС. Такая калибровка позволяет определить коэффициент γ экспериментально. Для ВВЭР-1000 в рамках функционирования системы внутрореакторного контроля (СВРК) предусмотрен, как правило, расчет P_{th} четырьмя-пятью различными способами и определение средневзвешенной мощности $P_{СВРК}$ с учетом весовых коэффициентов по каждому способу [7]. Погрешность измерения мощности $P_{СВРК}$ определена проектом реакторной установки ВВЭР-1000 и для номинальной P_{th} не превышает 2% (95% У.Д.).

Отбор событий-кандидатов на взаимодействия $\bar{\nu}_e$ проводился следующим образом. Отбирались двойные события в интервале от 2 до 100 мкс, что соответствует примерно 3τ (τ — время жизни нейтрона в мишени детектора). События-кандидаты на позитрон отбирались в диапазоне энергий от 4 до 8 МэВ, а события-кандидаты на нейтрон — от 5 до 10 МэВ. Порог 4 МэВ на энергию позитрона обеспечивает оптимальную чувствительность детектора к выгоранию топлива, которое лучше всего заметно при более высоких энергиях $\bar{\nu}_e$. Кроме того, в этой области энергий вклад в спектр антинейтрино от отработавшего ядерного топлива и неравновесной составляющей в спектре составляет величину $<1\%$ [8] и может не учитываться. Для каждого события дополнительно требовалось отсутствие сигнала в мюонных пластинах и энерговыделение в гамма-клетке с эквивалентной энергией не более 8 МэВ. Оба критерия позволяют отсеять пролетающие космические мюоны. Отбор случайных совпадений событий, имитирующих взаимодействия $\bar{\nu}_e$ в реакции (1), производился по стандартной методике, согласно которой ищутся события с теми же характеристиками, но в окне, сдвинутом на 1.5 мс вперед относительно события-кандидата на позитрон.

На рис. 2 представлена зависимость величины $N_{\nu}/(1+k)$ от P_{th} , измеренная детектором iDREAM в 2021–2023 гг. (фон, измеренный при выключенном реакторе, вычтен). При вычислении коэффициента $(1+k)$ для каждой точки брались E_i из [9], σ_i из [10] и усредненные по АЗ актуальные доли делений α_i , предоставленные службами КАЭС. Из аппроксимации зависимости, представленной на рис. 2, линейной функцией был определен коэффициент $\gamma = 0.375 \pm 0.007$. Ошибка измерения составляет 1.8% и может быть улучшена при большей статистике на отличных от номинальной P_{th} .

Теперь, согласно (2) и (3), можно определить суточную энерговыработку реактора по потоку антинейтрино W_{ν} . Полученные результаты представлены на рис. 3 в сравнении с энерговыработкой $W_{СВРК}$, рассчитанной на основе предоставленных службами КАЭС данных о тепловой мощности $P_{СВРК}$. При вычислении W_{ν} фон, измеренный при выключенном реакторе, был вычтен. Как следует из рисунка (красные маркеры), при статистике нейтринных взаимодействий $N_{\nu} \sim 10000$ согласие результатов измерений энерговыработки по нейтринно

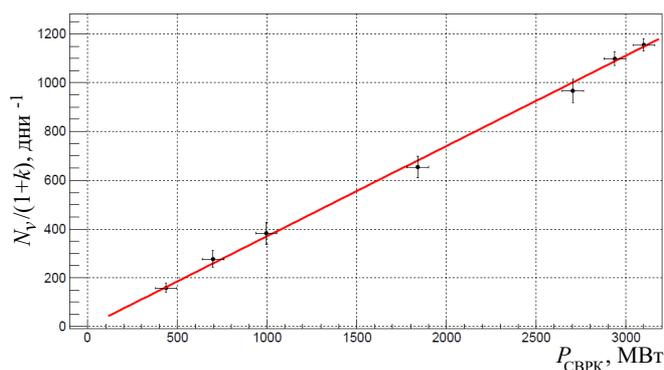


Рис. 2. Среднесуточное число взаимодействий $\bar{\nu}_e$ в детекторе iDREAM в зависимости от мощности реактора $P_{СВРК}$ (МВт)

W_{ν} и по данным СВРК $W_{СВРК}$ становится лучше 1%. Наблюдаемые при малых N_{ν} отклонения отношения $W_{\nu}/W_{СВРК}$ от единицы обусловлены невысокой статистикой, а также могут быть связаны с флуктуацией фона.

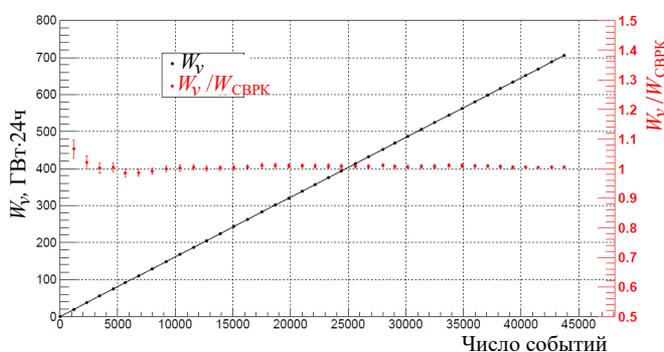


Рис. 3. Суточная энерговыработка реактора ВВЭР-1000 нейтринным методом W_{ν} в зависимости от числа зарегистрированных нейтринных событий (черные маркеры) и её отношение к энерговыработке $W_{СВРК}$, измеренной по данным СВРК (красные)

Таким образом, прототип промышленного нейтринного детектора iDREAM на основе $1.1 \text{ м}^3 \text{ Gd-ЖОС}$, размещенный на удалении 19.5 м от центра АЗ реактора ВВЭР-1000, обеспечивает сравнимую со штатными методами АЭС точность измерений энерговыработки.

3.2. Мониторинг изменения мощности реактора

Для анализа чувствительности iDREAM к различным от номинального уровням мощности был взят период набора данных, предшествующий остановке реактора на планово-предупредительный ремонт, и период выхода реактора на мощность. На рис. 4 (сверху) представлено число взаимодействий $\bar{\nu}_e$ в детекторе за 4-часовые периоды набора статистики (фон от случайных совпадений вычтен). Для

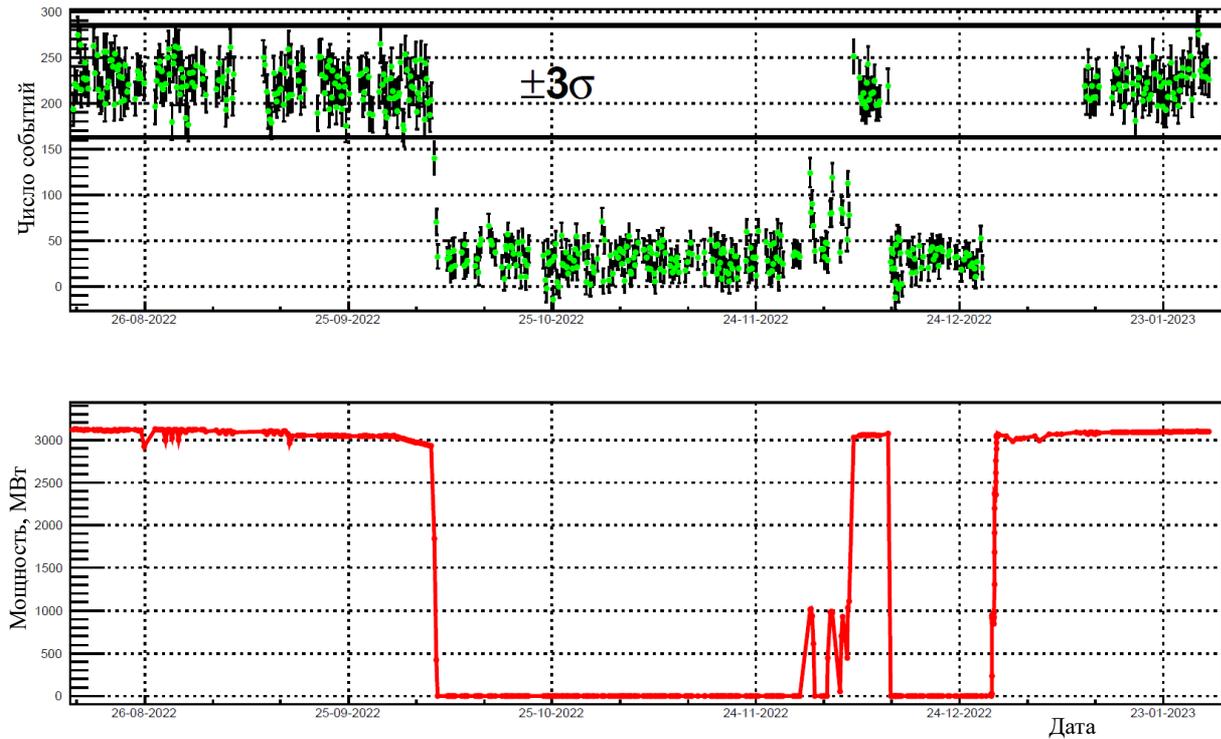


Рис. 4. Сверху: число взаимодействий $\bar{\nu}_e$ в детекторе iDREAM для 4-часовых интервалов набора статистики. Снизу: Тепловая мощность реактора $P_{\text{СВРК}}$ (МВт) по данным служб КАЭС

отбора событий взаимодействия $\bar{\nu}_e$ применялись те же критерии, что и в 3.1. Вклад в поток $\bar{\nu}_e$ от соседних энергоблоков №2 (1.2% от полного числа взаимодействий) и №4 (1.5%) учтен. Значения тепловой мощности реактора $P_{\text{СВРК}}$ по данным служб КАЭС представлены на рис. 4 (снизу).

Калибровка нейтринного детектора проводилась в период работы реактора на мощности 103% от номинальной в течение 10 сут, которые обеспечили ошибку суммарной статистики лучше 1%. В этот период среднее число взаимодействий $\bar{\nu}_e$ в iDREAM составило $N_{\nu} = 224 \pm 20 \bar{\nu}_e/4 \text{ ч}$, где $\sigma = 20\bar{\nu}_e/4 \text{ ч}$ — стандартное отклонение среднего числа взаимодействий $\bar{\nu}_e$. После этого были проанализированы периоды сбора данных детектором при отличных от номинального уровнях мощности реактора.

Аналогично был проведен анализ числа взаимодействий $\bar{\nu}_e$ за 2 и 6-часовые интервалы и были получены кривые чувствительности детектора iDREAM к изменению мощности, которые представлены на рис. 5. На этом рисунке по оси X отложено падение мощности реактора ВВЭР-1000 (% от номинальной $P_{th} = 3000 \text{ МВт}$), а по оси Y — число стандартных отклонений (σ) среднего числа взаимодействий $\bar{\nu}_e$ за 2 (синий), 4 (оранжевый) и 6-часовые (зеленый) интервалы набора статистики. Как следует из рис. 5, уже за 2 (4) ч набора статистики по $\bar{\nu}_e$ достоверность обнаружения перехода реактора на режим работы в 50% мощности составляет 2.6 (4) σ .

Падение мощности на 10% от номинальной обнаруживается со статистической значимостью $\sim 1.1\sigma$

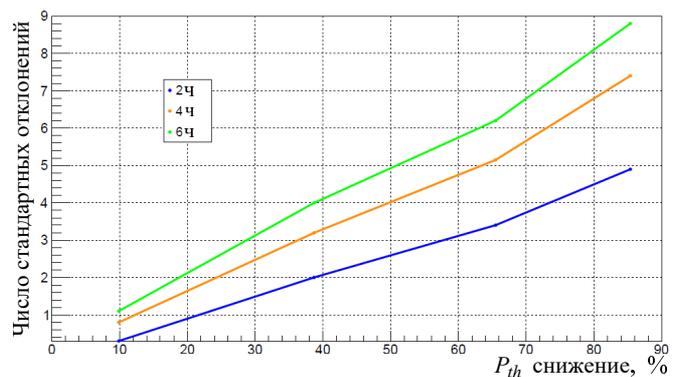


Рис. 5. Чувствительность iDREAM (число стандартных отклонений σ) к падению мощности реактора (% от номинальной $P_{th} = 3000 \text{ МВт}$). Данные представлены для 2 (синий), 4 (оранжевый) и 6-часовых (зеленый) интервалов набора статистики

за 6 ч набора статистики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных нейтринного детектора iDREAM измерена суточная энерговыработка промышленного ядерного реактора ВВЭР-1000. Измерения проведены относительным методом, при котором калибровка детектора была осуществлена на основе предоставленных службами КАЭС данных о тепловой мощности реактора с учетом

выгорания ядерного топлива. Показано, что согласие результатов измерений энерговыработки по нейтрину и по данным СВРК достигает величины лучше 1%.

Исследована чувствительность iDREAM к падению мощности реактора. Показано, что за 2 (4) ч набора статистики по $\bar{\nu}_e$ достоверность обнаружения перехода реактора на режим работы в 50% мощности составляет 2.6 (4) σ . Падение мощности на 10% от номинальной детектируется за 6 ч со статистической значимостью $\sim 1.1\sigma$. Полученные результаты указывают на перспективность развития и внедрения нейтринного метода для мониторинга ра-

боты реактора и измерения его энерговыработки как дополнительного средства контроля.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00219). Анализ данных детектора iDREAM проведен с использованием вычислительных ресурсов Объединенного вычислительного кластера НИЦ «Курчатовский институт». Авторы выражают благодарность Калининской атомной электростанции и АО «Концерн Росэнергоатом» за поддержку проведения исследований на промышленной АЭС.

- [1] *L.A. Mikaelyan* // Neutrino laboratory in the atomic plant (fundamental and applied researches. Proceedings of the International Conference on Neutrino Physics and Neutrino Astrophysics. **2**. 383 (1977).
- [2] *Кетов С.Н., Коннов Ю.И., Копейкин В.И.* и др. // Дистанционное мониторирование энерговыработки реактора по его нейтринному излучению как возможное средство контроля ядерных материалов на АЭС. Proceedings of a symposium "Nuclear Safeguards Technology 1986". **2**, 139. (1987).
- [3] *Климов Ю.В., Копейкин В.И., Микаэлян Л.А.* и др. // Атомная энергия. **76**, N 2. 130 (1994).
- [4] *Боровой А.А., Владимиров Д.М., Гаврилов С.Л.* и др. // Атомная энергия. **70**, N 6. 386 (1991).
- [5] *Абрамов А.В.* и др. // Письма в ЖТФ. **49**, N 15. 29 (2023).
- [6] *Abramov A. et al.* // iDREAM: industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant. JINST. **17**, N 09. P09001 (2022).
- [7] *Добротворский А.Н.* // Разработка и обоснование методики определения средневзвешенной мощности реактора энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000. Дисс... канд. техн. наук. Нововоронеж, 2017.
- [8] *Копейкин В.И., Скорохватов М.Д.* // Ядерная физика. **80**, N 2. 142 (2017).
- [9] *Kopeikin V.I., Popov D.V., Skorokhvatov M.D.* // Phys. Atom. Nuclei. **87**. 389 (2024).
- [10] *Kopeikin V., Skorokhvatov M., Titov O.* // Phys. Rev. D. **104**. L071301 (2021).

Measurement of the VVER-1000 reactor power output by its antineutrino flux from the core

A. V. Abramov¹, R. R. Alyev², M. B. Gromov^{3,4}, I. N. Zhutikov^{1,5}, S. M. Kiselev²,
 A. V. Konstantinov¹, D. S. Kuznetsov¹, E. A. Litvinovich^{1,5,a}, I. N. Machulin^{1,5}, A. E. Murchenko¹,
 A. M. Nemeryuk¹, R. R. Nugmanov¹, A. U. Oralbaev^{1,5}, D. V. Popov^{1,5}, A. A. Rastimeshin^{1,5},
 M. D. Skorokhvatov^{1,5}, M. A. Strizh^{1,3,b}, S. V. Sukhotin¹, V. A. Khvatov², A. S. Chepurnov³,
 D. A. Chmykhalo^{1,5}, A. V. Etenko^{1,5}

¹National Research Centre «Kurchatov Institute». Moscow, 123182, Russia

²«Kalinin Nuclear Power Plant» branch of JSC «Rosenergoatom». Udomlya, 171841, Russia

³Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow, 119991, Russia

⁴Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 141980, Russia

⁵National Research Nuclear University «MEPhI». Moscow, 115409, Russia

E-mail: ^aLitvinovich_EA@nrcki.ru, ^bstrizh.ma15@physics.msu.ru

In this paper we present the results of the measurements of the industrial nuclear reactor power output by its antineutrino flux from the core. The measurements were carried out with the iDREAM detector at a distance of 19.5 m from the center of the core of the VVER-1000 reactor at the Kalinin NPP (Russia). Estimates of the sensitivity of the iDREAM detector to changes in reactor power were obtained for 2-, 4-, and 6-hour intervals of collecting data on antineutrino interactions.

PACS: 29.90.+r

Keywords: neutrino detector, reactor antineutrino, nuclear reactor.

Received 16 October 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

1. Абрамов Алексей Вячеславович — инженер-исследователь; e-mail: Abramov_AV@nrcki.ru.

2. Алыев Руслан Ровшанович — канд. техн. наук, главный инженер; e-mail: alyev@knpp.ru.
3. Громов Максим Борисович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: gromov@physics.msu.ru.
4. Жутиков Иван Николаевич — лаборант-исследователь; e-mail: Zhutikov_IN@nrcki.ru.
5. Киселев Сергей Михайлович — заместитель начальника ОЯБиН; e-mail: kiselevsm@knpp.ru.
6. Константинов Андрей Викторович — науч. сотрудник; e-mail: Konstantinov_AV@nrcki.ru.
7. Кузнецов Денис Сергеевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: Kuznetsov_DS@nrcki.ru.
8. Литвинович Евгений Александрович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: Litvinovich_EA@nrcki.ru.
9. Мачулин Игорь Николаевич — ст. науч. сотрудник; e-mail: Machulin_IN@nrcki.ru.
10. Мурченко Алексей Евгеньевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: Murchenko_AE@nrcki.ru.
11. Немерюк Алексей Михайлович — лаборант-исследователь; e-mail: Nemeryuk_AM@nrcki.ru.
12. Нугманов Радик Рафаэлевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: Nugmanov_RR@nrcki.ru.
13. Оралбаев Алдияр Юрьевич — науч. сотрудник; e-mail: Oralbaev_AY@nrcki.ru.
14. Попов Даниэль Валерьевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: Popov_DV@nrcki.ru.
15. Растимешин Антон Алексеевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: Rastimeshin_AA@nrcki.ru.
16. Скорохватов Михаил Дмитриевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, руководитель отделения; e-mail: Skorokhvatov_MD@nrcki.ru.
17. Стриж Михаил Александрович — главный специалист; e-mail: strizh.ma15@physics.msu.ru.
18. Сухотин Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: Sukhotin_SV@nrcki.ru.
19. Хватов Валерий Анатольевич — ведущий инженер ОЯБиН; e-mail: hvatov@knpp.ru.
20. Чепурнов Александр Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: chepurnov@sinp.msu.ru.
21. Чмыхало Дмитрий Александрович — мл. науч. сотрудник; e-mail: Chmyhalo_DA@nrcki.ru.
22. Этенко Александр Владимирович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: Etenko_AV@nrcki.ru.