

НЕЙТРИННЫЙ СПЕКТРОМЕТР DANSS: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО

И. В. Мачихильян * от имени коллаборации DANSS

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н. Л. Духова, Москва

Нейтринный спектрометр DANSS уже более четырех лет ведет набор данных, регистрируя реакторные антинейтрино при помощи реакции обратного β -распада (ОБР). Экспериментальная установка расположена на подъемнике, дающем возможность менять положение детектора. Исследование отношений позитронных спектров ОБР, измеренных на различных расстояниях от центра горения, позволяет проводить поиски осциллирующий электронных антинейтрино на короткой пролетной базе, которые могут быть обусловлены переходом в гипотетическое стерильное состояние. Также в эксперименте проводится мониторинг мощности реактора на основе скорости счета реакторных антинейтрино.

Представляемые в статье результаты DANSS по поискам нейтринных осцилляций базируются на статистике в более чем 3,5 млн событий ОБР, которые были набраны за период с октября 2016 г. по февраль 2020 г. Измеренные позитронные спектры ОБР сравниваются с теоретическими предсказаниями. Приводится график долговременного измерения реакторной мощности. Его сравнение с данными, полученными от сотрудников Калининской АЭС, демонстрирует высокий потенциал детектора для независимого высокоточного мониторинга ядерного реактора.

The DANSS neutrino spectrometer has been collecting data for more than four years, registering reactor antineutrinos by means of the inverse beta decay (IBD) reaction. The experimental setup is movable being equipped with a lifting device. The analysis of the ratios of IBD positron spectra, taken at different distances from the center of the reactor core, allows one to search for the short-range oscillations of electron antineutrino due to its transition into a hypothetical sterile state. In addition, the DANSS experiment conducts the reactor power monitoring, using the measured rate of the reactor antineutrinos flux.

The presented results on neutrino oscillations are produced on the basis of more than 3.5 million IBD events, which were collected over the period of Oct. 2016 – Feb. 2020. The measured positron spectra from the IBD reaction are compared with theoretical predictions. The long-term measurements of the reactor power are also presented. Their comparison with the data provided by the Kalinin NPP

* E-mail: machikhiliyan@itep.ru

staff illustrates the excellent detector capacity for the independent high-precision monitoring of nuclear reactor.

PACS: 14.60.St; 14.60.Pq; 13.15.+g; 29.40.Mc; 29.40.Vj

ВВЕДЕНИЕ

Со времени экспериментов Ф. Райнеса и К. Коуэна по прямой регистрации нейтрино, осуществленных в 1953–1956 гг., создаваемые ядерными реакторами потоки электронных антинейтрино $\bar{\nu}_e$ широко используются для фундаментальных исследований этих частиц. И наоборот, измерение скорости счета $\bar{\nu}_e$ позволяет отслеживать ряд параметров, характеризующих работу реактора, таких как его мощность, текущий изотопный состав топлива и т. п.

Для регистрации $\bar{\nu}_e$ используется реакция обратного β -распада (ОБР), протекающая на водороде и дающая позитрон e^+ и нейтрон n в качестве конечных продуктов: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. Ее порог составляет 1,8 МэВ, при этом практически весь избыток энергии над порогом уносится позитроном. Традиционные детекторы антинейтрино представляют собой большие объемы водородосодержащего сцинтиллятора с добавлением веществ с большим сечением радиационного захвата тепловых нейтронов, таких как кадмий или гадолиний. Дочерний позитрон практически мгновенно тормозится и аннигилирует с электроном среды, давая вспышку сцинтилляционного света. Нейтрон, рассеиваясь, замедляется в течение нескольких микросекунд и затем захватывается ядром вещества-поглотителя с испусканием каскада γ -квантов. Требование наличия двух световых импульсов, отстоящих друг от друга на определенный промежуток времени (так называемая техника запаздывающих совпадений), позволяет достаточно надежно выделять сигнал обратного β -распада из фоновых процессов.

Количество антинейтрино $N_{\bar{\nu}}$, регистрируемых за определенный промежуток времени, зависит от мощности цепной реакции деления W как [1]

$$N_{\bar{\nu}} \sim W \frac{{}^5\sigma_f}{{}^5E_f} (1 + k),$$

где 5E_f обозначает среднюю энергию, выделяющуюся в реакторе при одном распаде ${}^{235}\text{U}$, ${}^5\sigma_f$ является сечением реакции ОБР, отнесенным к одному акту деления ${}^{235}\text{U}$, а поправка k обусловлена вкладом прочих делящихся изотопов: ${}^{238}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$ и ${}^{241}\text{Pu}$. Значение k меняется в процессе работы реактора по мере выгорания одних изотопов и накопления других. Форма регистрируемого спектра $\bar{\nu}_e$ также трансформируется по ходу реакторной кампании из-за неодинаковости парциальных спектров антинейтрино для разных изотопов. Анализируя измеряемые скорость

счета и спектры $\bar{\nu}_e$, можно определять мощность W и выгорание топлива, проводя таким образом удаленную диагностику ядерного реактора.

Вычисление теоретической формы спектра реакторных антинейтрино является непростой задачей, требующей знания как характеристик реактора, так и спектров всех мод β -распада продуктов деления, в ходе которых рождаются $\bar{\nu}_e$. На сегодня в большинстве реакторных экспериментов используются предсказания модели Хьюбера–Мюллера (Huber–Mueller) [2, 3]. При сравнении с ними измерения ряда экспериментов, таких как Daya Bay, Double Chooz и RENO, демонстрируют избыток событий в диапазоне энергий антинейтрино от 4,8 до 6,8 МэВ [4]. Причины этого расхождения пока остаются неясными. Также было обнаружено, что общий счет антинейтринных событий примерно на 6% меньше ожидаемого. Этот эффект получил название реакторной аномалии [5]. Помимо этого недостаток зарегистрированных событий был выявлен при калибровочных измерениях скорости захвата нейтрино от искусственных источников на галлиевой мишени в экспериментах SAGE и GALLEX (так называемая галлиевая аномалия) [6].

Одной из гипотез, объясняющих наблюдаемые дефициты, является существование еще одного типа нейтрино. И космологический анализ, и измерения ширины распада Z^0 -бозона показывают, что число поколений «обычных» легких нейтрино не может превышать трех. Поэтому новое гипотетическое нейтрино, названное стерильным, не должно участвовать в слабых взаимодействиях, но его возможно обнаружить благодаря нейтринным осцилляциям.

На небольших (порядка десятков метров) расстояниях от центра горения осцилляции $\bar{\nu}_e$ в нейтрино других стандартных поколений пренебрежимо малы. Поэтому в простейшей 4ν -модели, включающей одно дополнительное нейтрино, вероятность $\bar{\nu}_e$ перейти в стерильное состояние задается формулой [7]

$$P \sim \sin^2(2\theta_{ee}) \sin^2\left(1,27 \frac{\Delta m_{14}^2 L}{E_{\bar{\nu}_e}}\right), \quad (1)$$

где $E_{\bar{\nu}_e}$ обозначает энергию антинейтрино в МэВ; L — расстояние до центра горения в м; θ_{ee} — угол смешивания, а $\Delta m_{14}^2 = m_4^2 - m_1^2$ есть разность квадратов масс стерильного и электронного нейтрино в эВ². Анализ данных нейтринных аномалий позволяет предположить, что значение Δm_{14}^2 достаточно велико (> 1 эВ²), чтобы увидеть искажение спектра реакторных антинейтрино на коротких расстояниях. В частности, совместный фит реакторной и галлиевой аномалий дает следующие ограничения: $\Delta m_{14}^2 > 1,5$ эВ² и $\sin^2(2\theta_{ee}) = 0,14 \pm 0,08$ (95%-й доверительный интервал) [5].

В настоящее время поисками стерильных нейтрино занимаются в ряде реакторных экспериментов с короткой пролетной базой. Их данные

пока не позволяют прийти к однозначным выводам. Так, результаты NEOS, PROSPECT и STEREO свидетельствуют в пользу трехнейтринной модели [4], в то время как коллаборация Neutrino-4 утверждает, что видит осцилляции с параметрами $m_{14}^2 \sim 7,25 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2(2\theta_{ee}) \sim 0,26$ [8].

1. ДЕТЕКТОР DANSS

Детектор DANSS представляет собой компактный спектрометр для исследования реакторных антинейтрино [9]. Будучи введенным в эксплуатацию в апреле 2016 г., он уже более четырех лет ведет набор событий обратного β -распада. Первые результаты DANSS по поиску стерильных нейтрино были опубликованы в 2018 г. [10].

Экспериментальная установка размещается непосредственно под активной зоной одного из реакторов Калининской атомной электростанции (КАЭС). Поток $\bar{\nu}_e$ в месте расположения детектора достигает $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а материалы реакторных конструкций обеспечивают дополнительную защиту от космических частиц. 50 м эквивалентного слоя воды над детектором целиком подавляют адронную составляющую этих фонов и ослабляют в шесть раз их мюонную компоненту.

Детектор размещен на вертикальном подъемнике, позволяющем менять его позицию по отношению к центру горения. Набор данных осуществляется в трех положениях с шагом 1 м: верхнем, среднем и нижнем. Верхняя позиция соответствует расстоянию 10,9 м. Положение изменяется три раза в неделю, чтобы минимизировать систематические эффекты.

Чувствительным объемом детектора служит 1 м^3 пластикового сцинтиллятора на основе полистирола. Базовым конструктивным элементом является стрип — прямоугольная пластина сцинтиллятора длиной 1 м, шириной 4 см и толщиной 1 см, чье отражающее покрытие содержит гадолиний для регистрации нейтронов. Куб детектора составлен из 100 горизонтальных плоскостей, каждая из которых образована 25 стрипами, уложенными ортогонально стрипам соседних по вертикали слоев.

Чувствительный объем окружен многослойным экраном пассивной защиты из меди, свинца и борированного полиэтилена. Поверх него расположены сцинтилляционные счетчики системы мюонного ВЕТО, которые закрывают верх, бока и углы детекторного куба, но не его низ. Для повышения эффективности системы ВЕТО ее данные на этапе физического анализа дополняются сигналами с двух самых нижних плоскостей стрипов.

DANSS оснащен тефлоновыми трубками, с помощью которых в тело детектора можно вводить калибровочные радиоактивные источники: $^{248}\text{См}$, ^{22}Na и $^{60}\text{Со}$. Данные, набранные в их присутствии, используются для исследования характеристик детектора и настройки его параметров.

2. СЧИТЫВАНИЕ СИГНАЛОВ

Сбор сцинтилляционного света, возникающего внутри стрипа, осуществляется при помощи трех оптических спектросмещающих волокон, которые размещаются в канавках, выточенных вдоль его верхней грани. Центральное волокно считывается индивидуально кремниевым фотоумножителем (КФЭУ), в то время как два периферийных уходят к фотокатоду обычного вакуумного фотоумножителя (ФЭУ). Один ФЭУ обслуживает группу из 50 соседних стрипов — так называемый модуль. В то время как индивидуальное считывание при помощи КФЭУ важно для детализации регистрируемого события ОБР, более температуростабильные и не дающие ложных шумовых триггеров ФЭУ необходимы для выработки быстрого и надежного триггерного сигнала. Для физического анализа используются показания обоих типов фотодетекторов, что позволяет проводить разнообразные перекрестные проверки, тем самым улучшая качество измерений.

Сбор данных фотоприемников осуществляется при помощи двенадцатирядных аналогово-цифровых преобразователей с частотой дискретизации 125 МГц [11]. Сигналы фотодетекторов записываются в виде оцифрованных профилей тока в окне длительностью 512 нс. Подготовка к физическому анализу начинается с предварительной обработки этих так называемых волновых форм с целью извлечения двух параметров: интеграла и точного времени прихода сигнального импульса. Наборы этих чисел для каждого события, пройдя разнообразные процедуры калибровки, используются как входной материал для реконструкции сигналов физических частиц.

3. КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА

Из-за частого движения детектора температурные градиенты внутри его тела все время меняются. Для компенсации термозависимости ряда характеристик КФЭУ эти приборы прекалибруются каждые 25–30 мин набора данных. С этой целью в каждый файл с данными записывается некоторое количество темновых шумов КФЭУ, набираемых при помощи автотриггера с очень низким порогом. Шумовые спектры служат для извлечения индивидуальных величин коэффициента усиления и оптического кросстока каждого КФЭУ.

Полная калибровка считывающих каналов DANSS проводится по пику минимально ионизирующей частицы (MIP) на спектрах космических мюонов. При этом используются только треки, перпендикулярные пластинам сцинтиллятора. В качестве калибровочного параметра выступает наиболее вероятное значение энергетических потерь MIP. Для привязки к физическим единицам измерения энергии используются мюонные события, полученные путем математического моделирования. Последнее осуществляется при помощи пакета моделирования DANSS на базе Geant4.

Полная калибровка детектора проводится каждые 3–5 дней. Подробное описание этой процедуры может быть найдено в [12].

Изучение данных радиоактивных источников показывает наличие некоторой систематической разницы между энергетическими шкалами мюонов и электронов/ γ -квантов. Поэтому для анализа ОБР производится сдвиг шкалы КФЭУ и ФЭУ на общий фактор s_{calib} . Величина этого фактора вычисляется путем анализа спектра электронов от распадов ^{12}B , который наиболее близок к спектру e^+ ОБР. Оптимальное значение s_{calib} выбирается по принципу наилучшего согласия экспериментального β -спектра с результатами математических моделей.

Для контроля правильности настройки шкалы при помощи ^{12}B используются два типа сигнала: а) радиационный захват нейтронов от источника ^{248}Cm и б) электроны от распадов остановившихся в детекторе мюонов. Это позволяет охватить широкий диапазон энергий вплоть до нескольких десятков мегаэлектронвольт. В каждом случае ошибка определяется по наилучшему согласию измеренных и моделированных спектров при дополнительной вариации s_{calib} . В настоящее время точность настройки энергетической шкалы DANSS консервативно оценивается как 2%.

Анализ данных радиоактивных источников показывает также, что математическое моделирование недооценивает энергетическое разрешение DANSS на $12\%/\sqrt{E} \oplus 4\%$. Дополнительное размытие согласно этому фактору добавляется искусственно во все результаты моделирования.

4. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АНТИНЕЙТРИНО

События обратного β -распада выделяются по технике запаздывающих совпадений, как это описано в [10, 13]. К основным источникам фона относятся: а) некоррелированный фон, составленный случайными комбинациями позитроноподобных и нейтроноподобных событий, б) остаточный фон от космических мюонов ($< 2\%$) и в) малая доля событий обратного β -распада от других реакторных блоков КАЭС (0,6%).

В отличие от других экспериментов измеряемые DANSS спектры e^+ строятся в терминах чистой кинетической энергии позитрона E_{e^+} , а не полной регистрируемой энергии позитронного события, включающей в себя также энергию аннигиляционных γ -квантов. Это связано с не самой лучшей герметичностью детектора, а также с нелинейностью его отклика для очень мягких электронов.

Во избежание искажений, обусловленных краевыми эффектами, при построении спектров e^+ из рассмотрения выбрасываются самые внешние стрипы по горизонтали, а также четыре самых нижних и четыре самых верхних плоскости стрипов. Остаточный эффективный объем составляет 78% от всего куба детектора. При этих условиях DANSS, находясь в верхнем положении, способен регистрировать рекордные 5100 событий

обратного β -распада в сутки. Представляемые далее результаты базируются на статистике в более чем $3,5 \cdot 10^6$ событий ОБР, набранных за период с октября 2016 г. по февраль 2020 г.

5. СРАВНЕНИЕ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ ПРЕДСКАЗАНИЯМИ

Отношение измеренных спектров DANSS к предсказаниям Хьюбера–Мюллера для усредненного изотопного состава реакторного топлива представлено на рис. 1, *a*. На точки DANSS (1) наложены данные эксперимента RENO [14], приведенные к шкале кинетических энергий позитронов, как оригинальные (2), так и размытые в соответствии с энергетическим разрешением DANSS (3).

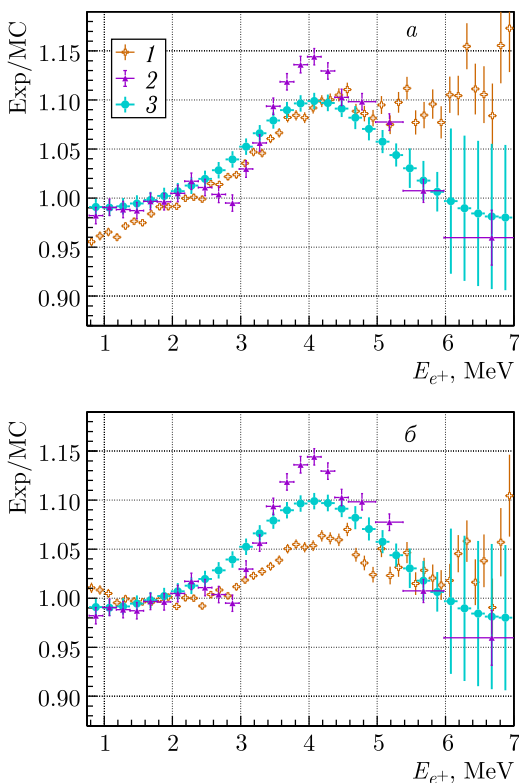


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Отношение измеренных спектров DANSS к моделированным: *a*) одинаковая шкала измеренных и моделированных спектров; *б*) шкала моделированных спектров сдвинута на +50 кэВ

Сопоставление измерений DANSS и моделированных спектров в области 1–3 МэВ показывает, что для оптимального согласия моделированные спектры должны быть сдвинуты на +50 кэВ. Что лежит в основе этого смещения и насколько оно правомерно, пока неясно. Отношение экспериментальных и моделированных спектров после сдвига приведено на рис. 1, б. Виден избыток экспериментальных событий, который возникает в районе 4,5 МэВ ($E_{\bar{\nu}_e} \sim 6,3$ МэВ). Тем не менее также очевидно, что форма кривой отношения крайне чувствительна к сдвигам энергетической шкалы, поэтому делать какие-либо выводы пока представляется преждевременным.

6. МОНИТОРИНГ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА

График скорости счета реакторных антинейтрино представлен на рис. 2. Каждая точка соответствует примерно двум суткам набора статистики ($\sim 10^4 \bar{\nu}_e$). Измерения, сделанные в верхней (2), средней (3) и нижней (4) позициях детектора, приведены друг к другу по правилу $1/L^2$. В качестве опорного периода для пересчета измерений DANSS в единицы мощности выбраны 12 точек, соответствующих стабильной работе реактора в ноябре–декабре 2016 г. Сырые счета подвергнуты коррекции, чтобы учесть изменения эффективности детектора в разные периоды его работы, а также эволюцию изотопного состава топлива с течением времени.

Результаты измерений DANSS находятся в хорошем согласии с графиком мощности реактора, предоставленным сотрудниками Калининской АЭС (1). Нормализованное отклонение отношения счет/мощность от среднего значения сопоставимо со статистическими флуктуациями. Статистическая точность измерения составляет 1,5%/2 сут набора данных.

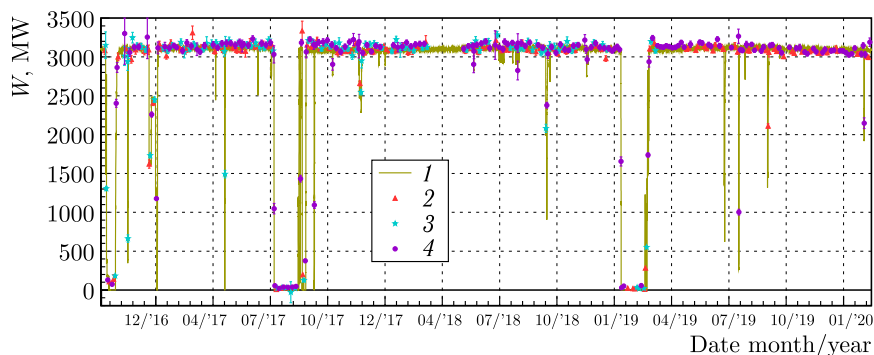


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Мониторинг мощности реактора при помощи скорости счета антинейтрино за период с октября 2016 г. по февраль 2020 г.

7. ПОИСКИ СТЕРИЛЬНЫХ НЕЙТРИНО

Наблюдаемые расхождения между теоретическим описанием формы спектров реакторных антинейтрино и измерениями ряда экспериментов делают проблематичными поиски осцилляций $\bar{\nu}_e$ в стерильное состояние путем сравнения опытных данных с моделированными. Более предпочтительной альтернативой является исследование отношений спектров, полученных одним и тем же детектором на разных расстояниях от центра горения, в которых также сокращается ряд систематических эффектов.

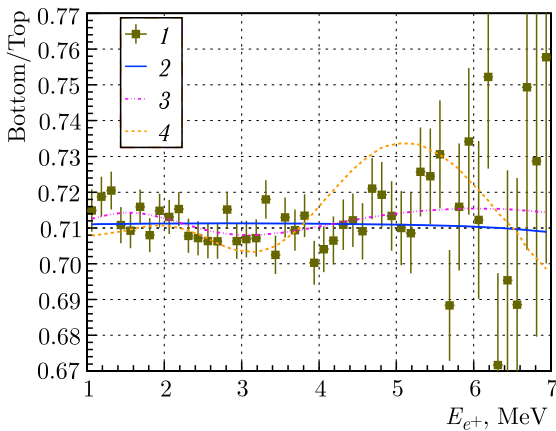


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Отношение экспериментальных спектров DANSS для нижней и верхней позиций

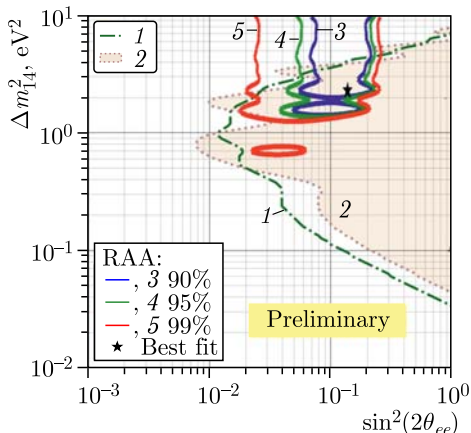


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Исключенная область в пространстве параметров осцилляций

На рис. 3 показано отношение экспериментальных спектров DANSS для нижней и верхней позиций (1). Приводится также предсказание для трехнейтринной модели (2), лучший фит DANSS для четырехнейтринной модели (3) и ожидания для оптимальной точки из совместного фита реакторной и галлиевой аномалий (4) [15]. Полученные результаты свидетельствуют против существования стерильных нейтрино. Лучший фит четырехнейтринной модели ($m_{14}^2 = 1,3$ эВ, $\sin^2(2\theta_{ee}) = 0,02$) имеет значимость всего $1,5\sigma$.

На рис. 4 представлена карта пространства параметров осцилляций с предварительными результатами DANSS по исключенной области (за-тененный регион 2). Также приводятся кривые (3–5), соответствующие результатам совместного анализа измерений, сделанных в ряде других экспериментов [15]. Наиболее вероятная точка совместного фита реакторной и галлиевой аномалий, отмеченная звездообразным значком, исключена на уровне 5σ .

8. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЛАНЫ

В настоящее время ведется подготовка к модернизации экспериментальной установки. DANSS-II будет обладать лучшим энергетическим разрешением и увеличенным чувствительным объемом, чтобы расширить охват доступной области в пространстве параметров осцилляций.

Создание установки и ее запуск были осуществлены при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках государственных контрактов № Н.4х.44.90.13.1119 и № Н.4х.44.9Б.16.1006. Коллаборация DANSS выражает глубокую благодарность администрации КАЭС, а также ее отделу радиационной безопасности и отделу ядерной безопасности и надежности за постоянную помощь и содействие. Функционирование детектора и анализ данных стали возможными благодаря поддержке Российского научного фонда в рамках грантов 17-12-01145 и 17-12-01145П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Korookin V. A. et al.* Measurement of Power Output of Power Reactor by Neutrino Detection Method // *Atom. Energy.* 1988. V. 65, No. 3. P. 169–173.
2. *Mueller A. et al.* Improved Predictions of Reactor Antineutrino Spectra // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 83. P. 054615.
3. *Huber P.* On the Determination of Anti-Neutrino Spectra from Nuclear Reactors // *Ibid.* V. 84. P. 024617.
4. *Ludhova L.* Overview on Solar, Geo, and Reactor Neutrino Experiments // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1586. P. 012034.
5. *Mention G. et al.* The Reactor Antineutrino Anomaly // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 83. P. 073006.
6. *Giunti C., Laveder M.* Statistical Significance of the Gallium Anomaly // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 83. P. 065504.

7. *Olive K. et al. (Particle Data Group)*. Review of Particle Physics // *Chin. Phys. C*. 2016. V. 40, No. 10. P. 100001.
8. *Serebrov A., Samoilo R.* The Analysis of the Results of the Neutrino-4 Experiment on Search for Sterile Neutrino and Comparison with Results of Other Experiments // *JETP Lett.* 2020. V. 112, No. 4. P. 211–225.
9. *Alekseev I. et al.* DANSS: Detector of the Reactor AntiNeutrino Based on Solid Scintillator // *J. Instrum.* 2016. V. 11. P. 11011.
10. *Alekseev I. et al.* Search for Sterile Neutrinos at the DANSS Experiment // *Phys. Lett. B*. 2018. V. 787. P. 56–63.
11. *Alekseev I. et al.* Digitization of Waveforms from Photosensors of the DANSS Detector // *Instrum. Exp. Tech.* 2018. V. 61, No. 3. P. 349–354.
12. *Alekseev I. et al.* DANSS Neutrino Spectrometer: Detector Calibration, Response Stability, and Light Yield // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2018. V. 15, No. 3. P. 272–283.
13. *Alekseev I.* Measurements of the Reactor Antineutrinos with the DANSS Experiment // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1468. P. 012156.
14. *Bak G. et al.* Measurement of Reactor Antineutrino Oscillation Amplitude and Frequency at RENO // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 121. P. 201801.
15. *Mention G.* The Reactor Antineutrino Anomaly // *J. Phys. Conf. Ser.* 2013. V. 408. P. 012025.