

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ОСЦИЛЛЯЦИЙ

В. В. Горбачев *, *В. Н. Гаврин*, *Т. В. Ибрагимова*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

В работе описываются возможности трех экспериментов по поиску осцилляций на короткой базе — BEST, SOX и DANSS. Показано, что только первые два имеют возможности по локализации параметров осцилляций.

The paper describes the possibility of three experiments to search for oscillations on a short baseline — BEST, SOX and DANSS. It is shown that only the first two experiments have the possibility of localization of the oscillation parameters.

PACS: 23.40.-s; 29.25.Rm; 29.40.Mc; 95.55.Vj

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня есть несколько различных предложений экспериментов по прямому поиску осцилляций нейтрино на короткой базе [1–3]. Предложения по экспериментам, регистрирующим электронные нейтрино (или антинейтрино), имеют примерно равную чувствительность к обнаружению нейтринных осцилляций. Какова при этом может быть локализация параметров осцилляций, авторы предложений, как правило, не сообщают (только в предложениях BEST [1] приводились графики с определением параметров). В данной работе мы оценим возможности по определению параметров осцилляций на короткой базе трех экспериментов, два из которых (BEST [1] и Fogexino-SOX [2]) находятся на завершающей стадии подготовки и один (DANSS [3]) уже проводит измерения.

Первые указания на существование нейтринных осцилляций на короткой базе были получены в эксперименте LSND [4] в измерениях появления электронных нейтрино в пучке мюонных нейтрино в протонном ускорителе. Позднее эти результаты были подтверждены в похожем эксперименте MiniBooNE [5] на пучках мюонных нейтрино и антинейтрино с другими средними энергиями частиц и длинами их пролета.

*E-mail: vvgor_gfb1@mail.ru

Результаты экспериментов согласуются с гипотезой о существовании осцилляционных переходов со значением параметра $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$, которое оказывается значительно больше значений параметра Δm^2 , с помощью которого описываются осцилляции в солнечном ($7,5 \cdot 10^{-5} \text{ эВ}^2$) и атмосферном ($2,4 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$) секторах. При существовании осцилляций на короткой базе ($\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$) требуется существование четвертого массового состояния нейтрино. Поскольку в природе не наблюдается четвертый лептон, соответствующий четвертому ароматному состоянию нейтрино, то считается, что нейтрино в четвертом ароматном состоянии не взаимодействует с веществом, т. е. является стерильным. Отсутствие взаимодействий стерильных нейтрино с веществом означает, что такие нейтрино могут рождаться только в осцилляционных процессах при движении нейтрино «обычных» ароматов.

В прямых экспериментах с электронными нейтрино такие осцилляции определяются по изменению вероятности регистрации нейтрино заданной энергии E_ν (МэВ), проходящих расстояние L (м):

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1,27 \Delta m^2 L}{E_\nu} \right).$$

Параметры (Δm^2 , $\sin^2 2\theta$) определяют частоту и амплитуду осцилляций. Нейтринными осцилляциями с параметром $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$ могут быть объяснены результаты экспериментов с интенсивными искусственными источниками нейтрино ^{51}Cr и ^{37}Ar , проведенными на галлиевых мишенях детекторов SAGE [6, 7] и GALLEX [8, 9], а также экспериментов по измерению спектров электронных антинейтрино от ядерных реакторов с детекторами, располагавшимися на небольших расстояниях (до 100 м) от них [10].

В трех экспериментах, которые обсуждаются в данной работе, нейтрино взаимодействуют с мишенями детекторов по-разному, систематика всех экспериментов существенно различается. Поэтому получение сходных результатов будет хорошим индикатором существования нейтринных осцилляций на короткой базе или их отсутствия на заданных уровнях чувствительности.

Рассмотрим, можно ли определить параметры осцилляций в этих экспериментах.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ BEST

В эксперименте BEST нейтринные осцилляции будут наблюдаться по скорости взаимодействия нейтрино от искусственного источника с галлиевой мишенью. В целом эксперимент похож на галлиевые эксперименты с источниками ^{51}Cr и ^{37}Ar , которые проводились ранее на мишенях солнечных галлиевых детекторов SAGE и GALLEX [6–9]. Эксперимент BEST будет

проводиться на базе детектора SAGE. В новом эксперименте будет использоваться компактный источник (объемом ~ 1 л) ^{51}Cr активностью 3 МКи, в 6 раз больше, чем в прежних экспериментах на детекторе SAGE. Мишень из 50 т металлического галлия (в ~ 4 раза больше, чем прежде) разделена на две зоны — внутреннюю сферическую и внешнюю цилиндрическую. Источник помещается в геометрический центр обеих зон мишени. Пробеги нейтрино в каждой зоне мишени от центрально расположенного источника одинаковы, из-за чего в отсутствие осцилляций ожидаемые скорости захвата нейтрино в двух зонах равны. Источник ^{51}Cr излучает почти монохроматические нейтрино: 95 % захватов на галлии производятся от нейтрино с энергией 750 кэВ и около 5 % — с 430 кэВ.

Измерения будут проводиться по схеме обычных солнечных измерений детектора SAGE [11], согласно которой в течение некоторого времени в мишени накапливаются атомы ^{71}Ge , образующиеся в результате захвата нейтрино ядрами ^{71}Ga , после чего в течение короткого времени они извлекаются из мишени и производится счет их распадов в пропорциональном счетчике. В эксперименте BEST извлечение атомов ^{71}Ge и последующий счет их количества производятся раздельно по двум зонам мишени, из-за чего появляется чувствительность скорости захвата от расстояния L , которое проходит нейтрино между точками рождения и захвата.

Параметры осцилляций будут определяться по разнице скоростей захвата в двух зонах [12]. На рис. 1 приведены зависимости ожидаемых скоростей за-

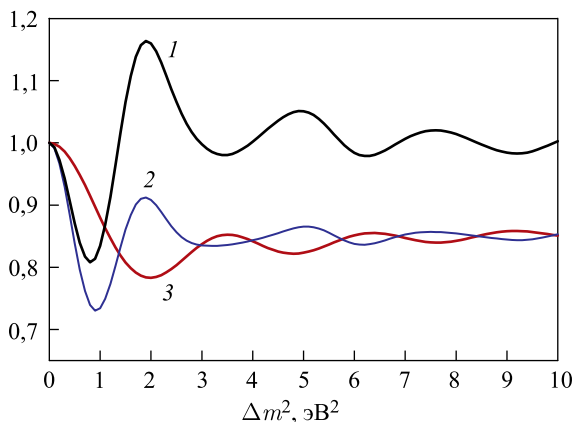


Рис. 1. Зависимости скоростей захвата (точнее, отношение скоростей захвата при осцилляциях и в их отсутствие) в двух зонах Ga мишени BEST от параметра Δm^2 для источника ^{51}Cr с размерами $\varnothing 8,6 \times 9,5$ см: 1 — отношение скоростей внешней/внутренней; 2 — скорость счета во внешней, цилиндрической, зоне; 3 — во внутренней, сферической, зоне. Кривые приведены для значения $\sin^2 2\theta = 0,3$

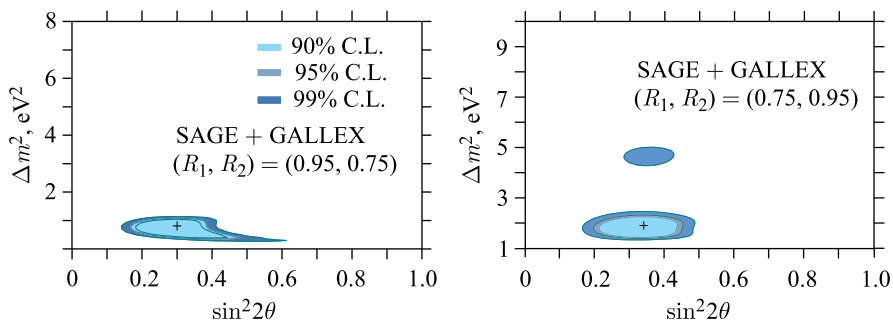


Рис. 2. Примеры локализации параметров осцилляций для двух возможных результатов эксперимента BEST совместно с результатами четырех предыдущих галлиевых экспериментов с источниками на детекторах SAGE и GALLEX: R_1 и R_2 — скорости захвата относительно ожидаемых в отсутствие осцилляций для внутренней и внешней зон мишени

захвата нейтрино от хромового источника в двух зонах мишени и от параметра Δm^2 . Кривые приведены для амплитуды осцилляций, равной $\sin^2 2\theta = 0,3$. Для других значений амплитуды линейно меняется масштаб по оси ординат.

Таким образом, параметр Δm^2 будет определен в измерениях BEST только в случае, если он будет находиться в области, где отношение скоростей захвата в двух зонах отличается от единицы на величину большую, чем ошибка измерений. Наибольшие шансы того, что этот параметр будет определен, окажутся, если Δm^2 будет равен 0,8 или 1,9 эВ². При этом амплитуда осцилляций $\sin^2 2\theta$ может определяться по подавлению скорости захвата нейтрино относительно ожидаемой величины в обеих зонах мишени.

Примеры локализации параметров, которые можно получить в эксперименте BEST, приведены на рис. 2.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ BOREXINO-SOX

В эксперименте Borexino-SOX [2] поиск осцилляций на короткой базе будет проводиться на сцинтилляционном детекторе солнечных нейтрино Borexino, который будет облучаться электронными антинейтрино от источника ¹⁴⁴Se. Антинейтрино имеют непрерывный спектр до 3 МэВ и захватываются протонами сцинтиллятора с образованием нейтрона и позитрона, по движению которых определяется энергия нейтрино. Фона для таких событий в детекторе практически нет. Сферический бак со сцинтиллятором Borexino имеет радиус 8 м; в его центре при анализе выделяется область рабочего объема (FV) радиусом 3,3 м. Источник будет располагаться на расстоянии 9 м

от центра детектора. Для точечного источника и ошибки определения координаты события в детекторе (15 см) пробег нейтрино определяется довольно точно. Проблемы с получением параметров осцилляций могут возникнуть из-за большого размера детектора, поэтому статистика по расстояниям будет иметь большие вариации (при числе событий в FV $\sim 10^4$). Дополнительно проблемы с определением параметров осцилляций могут быть из-за ошибки в определении энергии нейтрино, которая составляет $\sim 10\%$.

Для определения параметров осцилляций в эксперименте Bogexino-SOX мы проводили розыгрыши событий по методу Монте-Карло с заданной энергией, равномерно распределенной по интервалу ΔE около среднего значения E . Значение энергии антинейтрино выбиралось из диапазона 1,8–3,0 МэВ. Первое значение соответствует порогу детектирования антинейтрино. При ошибке определения энергии $\sim 10\%$ диапазон энергий нейтрино можно разделить на ~ 10 частей со средним числом событий 10^3 в каждой. Рассмотрим, насколько чувствительным к определению параметра осцилляций Δm^2 оказывается один выделенный интервал энергий на примере интервала со средней энергией $E = 2,5$ МэВ. Будем считать, что второй параметр — амплитуда осцилляций $\sin^2 2\theta$ — будет определяться по общему подавлению скорости счета более точно.

Параметр Δm^2 находим из аппроксимации функции χ^2 , полученной по результатам розыгрышей событий и ожидаемых сигналов на данных расстояниях L в зависимости от параметров осцилляций при нулевой систематике.

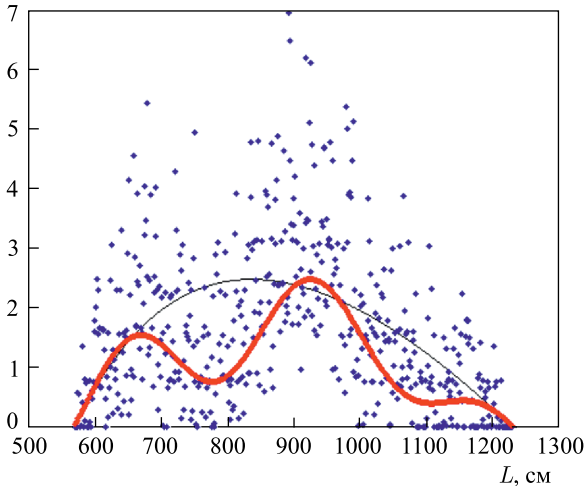


Рис. 3. Распределение разыгранных событий: точки — распределение событий по расстояниям; тонкая кривая — ожидаемое распределение событий в отсутствие осцилляций; толстая кривая — распределение, полученное при анализе. Расстояние L отсчитывается от точечного источника

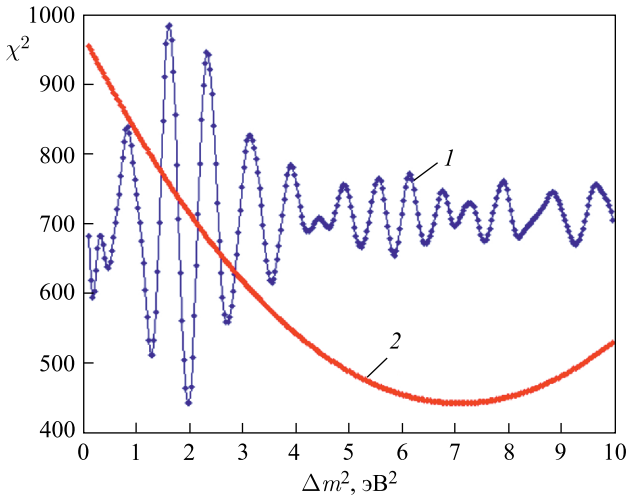


Рис. 4. Зависимости функции χ^2 от параметров осцилляций для розыгрыша $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) = (2, 0,6)$; кривая 1 соответствует функции $\chi^2 = f(\Delta m^2)$; кривая 2 — функции $\chi^2 = f(\sin^2 2\theta)$. Во втором случае по оси абсцисс отложены значения $\sin^2 2\theta \times 10$

В рассматриваемых диапазонах параметров осцилляций результаты оказываются устойчивы к числу разбиений по расстояниям. Считалось, что параметр Δm^2 определяется правильно, если полученное при минимизации функции χ^2 значение отличается от заданного меньше чем на $0,1 \text{ эВ}^2$.

Пример одной реализации розыгрыша событий по методу Монте-Карло приведен на рис. 3.

В примере разыгрывались события в FV с параметрами осцилляций $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) = (2, 0,6)$; в результате анализа получены значения $(1,98, 0,72)$. Мы считаем, что в данном случае параметры осцилляций определяются правильно, несмотря на то, что амплитуда событий отличается довольно сильно. Но мы предполагаем, что для определения амплитуды будут применены другие, более точные методы с интегральными скоростями счета. Устойчивость получаемой аппроксимации косвенно видна из рис. 4, на котором показано поведение функции χ^2 в зависимости от параметров осцилляций Δm^2 и $\sin^2 2\theta$ около значения минимума. Видно, что основной минимум функции $\chi^2 = f(\Delta m^2)$ оказывается значительно изолированным.

На рис. 5 показаны области значений параметров осцилляций, в которых они могут быть определены (в которых может быть определен параметр Δm^2) для энергии нейтрино $2,5 \text{ МэВ}$ с двумя значениями ширины энергетического интервала $\Delta E = 0$ и $0,25 \text{ МэВ}$. По оси абсцисс отложены значения амплитуды, которые задавались в розыгрышах.

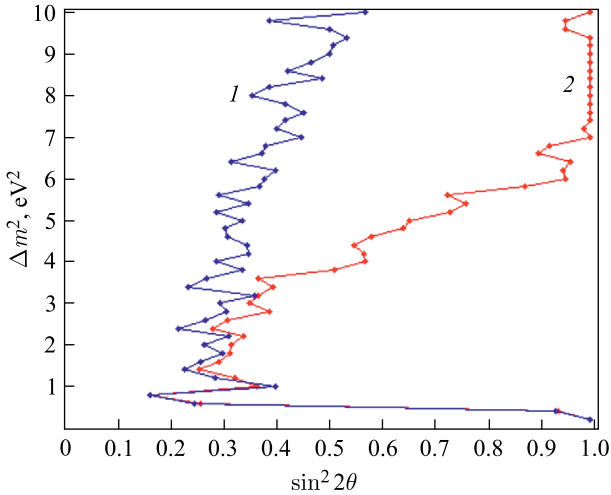


Рис. 5. Области значений параметров осцилляций, в которых может быть «правильно» определен параметр Δm^2 (области справа от кривых) — на уровне достоверности 90 %: кривая 1 — для $\Delta E = 0$; кривая 2 — для $\Delta E = 0,25$ МэВ

Поскольку параметр Δm^2 в формулу для вероятности осцилляций электронных нейтрино входит с коэффициентом $1/E_\nu$, то полученные кривые на рис. 5 можно распространить на другие энергии нейтрино, регистрируемые в эксперименте, изменением масштаба оси ординат: $(\Delta m^2)_2 = (\Delta m^2)_1 E_2/E_1$. Таким образом, можно ожидать, что для диапазона регистрируемых энергий нейтрино от источника ^{144}Ce от 1,8 до 3 МэВ параметр Δm^2 будет правильно определяться для амплитуды осцилляций $\sin^2 2\theta > 0,25$, если значения Δm^2 будут находиться в интервале от 0,5 до 4 эВ². Заметим, что в интервале 0,5–0,8 эВ² значения параметров определяются вплоть до амплитуды 0,15.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ DANSS

DANSS — единственный эксперимент, в котором в настоящее время проводятся измерения по теме осцилляционных переходов электронных нейтрино [3, 13]. Эксперимент запущен в начале лета 2016 г. на Калининской атомной станции. Электронные антинейтрино от атомного реактора взаимодействуют с протонами мишени, составленной из узких полосок пластикового сцинтиллятора. Активная часть реактора, откуда выходят антинейтрино, имеет радиус до 1,5 м. Детектор с общим размером $1 \times 1 \times 1$ м может находиться от центра реактора на расстоянии 10–12 м. Специальный механизм позволяет изменять это расстояние и, таким образом, расширять возможно-

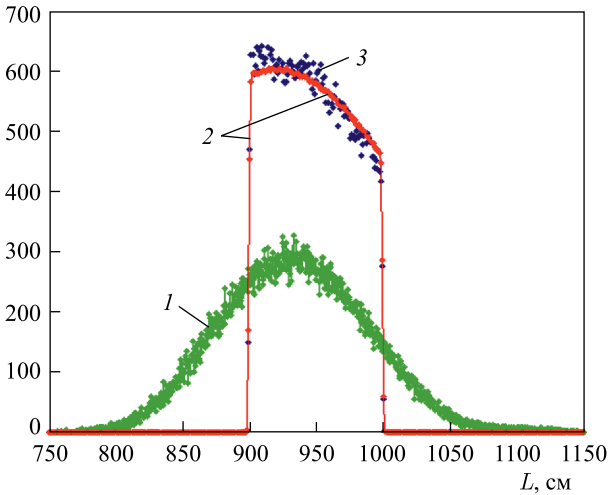


Рис. 6. Распределение событий по расстояниям: кривая 1 — реальное распределение с учетом большого объема реактора, излучающего нейтрино; кривая 2 — аппроксимация точек «видимого» распределения событий в детекторе, когда точка излучения жестко привязана к центру реактора

сти эксперимента. Высокая скорость счета нейтринных событий в детекторе ($\sim 10^4$ в сутки) позволяет пренебречь нейтронным фоном.

Возможности эксперимента по определению параметров осцилляций регистрируемых нейтрино мы определяли методом Монте-Карло, так же, как проводили оценки в эксперименте Borexino-SOX, описанном выше. Существенное отличие эксперимента DANSS от Borexino-SOX состоит в том, что здесь, несмотря на то, что точка взаимодействия нейтрино в детекторе определяется очень точно (с точностью ~ 1 см), при большом объеме источника это преимущество перестает иметь значение.

На рис. 6 приведен пример розыгрыша событий для расстояния от центра реактора до центра детектора $L_0 = 10,5$ м для нейтрино, равномерно распределенных в интервале $\Delta E = 0,25$ МэВ около средней энергии $E = 2,5$ МэВ (т.е. данный рисунок соответствует рис. 3 для результатов эксперимента Borexino-SOX). Заданные параметры осцилляций $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) = (2, 0,9)$, т.е. они с почти максимальной амплитудой. Число событий в полученных распределениях $N = 10^5$, это огромная статистика, которую можно получить всего за одну неделю измерений. Реальное распределение событий по расстояниям (кривая 1 на рис. 6) вырождается в результате измерений в кривую 3 (темные ромбы), которая теряет многие свойства реальной кривой. Кривая 3 строится по данным измерений из условия жесткой привязки точки рождения нейтрино к центру реактора.

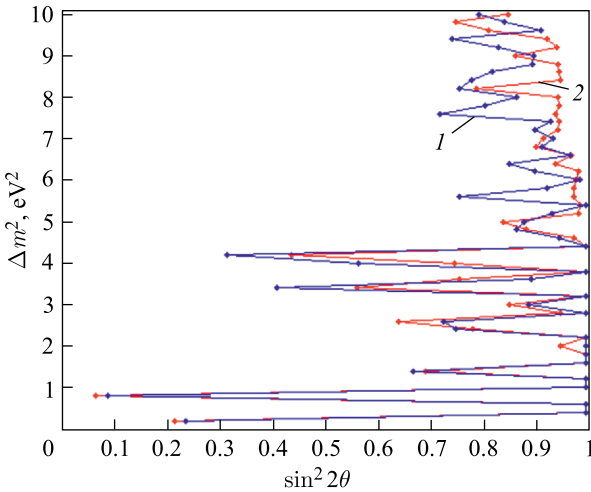


Рис. 7. Области значений параметров осцилляций, в которых может быть «правильно» определен параметр Δm^2 (области справа от кривых) — на уровне достоверности 90 %: кривая 1 — для $\Delta E = 0$; кривая 2 — для $\Delta E = 0,25$ МэВ

Полученные при анализе значения параметров осцилляций сильно отличаются от задаваемых: $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) = (0,68, 0,98)$. Для меньших амплитуд, очевидно, ситуация с определением параметров должна быть еще хуже.

На рис. 7 показаны области параметров осцилляций, внутри которых может быть определен параметр Δm^2 с точностью 0,6 эВ² (для анализа эксперимента Borexino-SOX использовалось значение 0,1 эВ²).

Полученные две кривые — для ширины интервала энергий $\Delta E = 0$ и 0,25 МэВ — различаются очень слабо. При этом отдельные значения Δm^2 могут быть правильно определены даже при небольших амплитудах $\sin^2 2\theta$. Причина «правильного» определения заключается в том, что при этих значениях Δm^2 характер распределений истинных расстояний L и «видимых», когда точка рождения привязана к центру реактора, оказывается схожим.

Вместе с тем, поскольку полученные кривые слабо зависят от ширины энергетического интервала, при переходе к другим энергиям задаваемые значения Δm^2 , при которых они будут потом «правильно» определяться, сдвигаются произвольным образом. При этом выбрать интервал энергий, в котором будет «правильное» значение параметра Δm^2 , при общем диапазоне энергий нейтрино от 1,8 до ~ 8 МэВ оказывается невозможным. Еще больше картину запутывает неравномерность излучения нейтрино в активной зоне реактора.

Таким образом, в эксперименте DANSS при высокой чувствительности к обнаружению осцилляций оказывается невозможным определить значения их параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены возможности трех экспериментов, находящихся в стадии подготовки к измерениям (BEST и Borexino-SOX) и уже проводящих измерения (DANSS), по поиску осцилляционных переходов на короткой базе. При сравнимой чувствительности всех экспериментов к обнаружению таких осцилляций только два первых имеют возможности определить параметры осцилляций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gavrin V. N., Cleveland B. T., Gorbachev V. V., Ibragimova T. V., Kalikhov A. V., Kozlova Yu. P., Malyshkin Yu. A., Mirmov I. N., Shikhin A. A., Veretenkin E. P. // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 798. P. 012113.
2. Smirnov O. et al. (BOREXINO Collab.) // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46, No. 2. P. 305–316.
3. Alekseev I., Belov V., Brudanin V., Danilov M., Egorov V., Filosofov D., Fomina M., Hons Z., Kazantsev S., Kobayakin A., Kuznetsov A., Machikhilian I., Medvedev D., Nesterov V., Olshevsky A. et al. arXiv:1606.02896v1 [physics.ins-det]. 2016.
4. Aguilar A. et al. (LSND Collab.) // Phys. Rev. D. 2001. V. 64. P. 112007.
5. Aguilar-Arevalo A. A. et al. (MiniBooNE Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. P. 181801.
6. Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.) // Phys. Rev. C. 1999. V. 59. P. 2246.
7. Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.) // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. P. 045805.
8. Anselmann P. et al. (Gallex Collab.) // Phys. Lett. B. 1995. V. 342. P. 440.
9. Hampel W. et al. (Gallex Collab.) // Phys. Lett. B. 1998. V. 420. P. 114.
10. Mention G., Fechner M., Lassere Th., Mueller Th. A., Lhuillier D., Cribier M., Loutchouart A. // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. P. 073006.
11. Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.) // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. P. 015807.
12. Gavrin V., Gorbachev V., Veretenkin E., Cleveland B. arXiv:1006.2103.2010.
13. Danilov M. Searches for Sterile Neutrinos at Very Short Baselines Reactor Experiments. Talk at “The 52nd Recontres de Moriond Session”, March 24, 2017.