

## ИЗУЧЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «НЕЙТРИНО-4+» НА РЕАКТОРЕ СМ-3: СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ

*А. П. Серебров<sup>а, 1</sup>, Р. М. Самойлов<sup>а</sup>, Н. И. Воропаев<sup>а</sup>, В. В. Федоров<sup>а</sup>,  
А. В. Васильев<sup>а</sup>, Д. М. Прудников<sup>а</sup>, С. С. Волков<sup>а</sup>, Н. В. Грузинский<sup>а</sup>,  
В. Л. Головцов<sup>а</sup>, П. В. Неустров<sup>а</sup>, А. А. Герасимов<sup>а</sup>, М. Е. Зайцев<sup>а, б</sup>,  
Д. А. Якимов<sup>а</sup>, А. Л. Ижutow<sup>б</sup>, А. Л. Петелин<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, 188300, Россия

<sup>б</sup> Дмитровградский инженерно-технологический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Дмитровград, 433511, Россия

<sup>б</sup> АО «Научно-исследовательский институт атомных реакторов» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», Дмитровград, 433510, Россия

Коллаборация «Нейтрино-4» усовершенствовала детектор в первой нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3. Она также создает новую нейтринную лабораторию на том же реакторе для изучения легких стерильных нейтрино. В эксперименте «Нейтрино-4» наблюдался эффект осцилляций на уровне достоверности  $2,7\sigma$ , что хорошо согласуется с галлиевой аномалией и результатом эксперимента BEST, однако противоречит последним ограничениям на параметры осцилляций, полученным в экспериментах STEREO и PROSPECT. Представлены этапы подготовки установки и дальнейшие перспективы.

The Neutrino-4 collaboration improved the detector in the first neutrino laboratory at the SM-3 reactor. Also, we have been creating a new neutrino laboratory at the same reactor to study light sterile neutrinos. In the Neutrino-4 experiment, an oscillation effect was observed at a confidence level of  $2.7\sigma$ , which is in good agreement with the gallium anomaly and the result of the BEST experiment; however, it contradicts the latest constraints on the oscillation parameters obtained in the STEREO and PROSPECT experiments. The stages of the setup preparation and further prospects are presented.

PACS: 43.15.+g; 28.50.Hw

### ВВЕДЕНИЕ

В ряде различных нейтринных экспериментов на уровне статистической достоверности  $3-5\sigma$  наблюдались аномальные результаты, указывающие на возможную неполноту описания явления смешивания нейтрино, которое ограничено тремя нейтрино.

---

<sup>1</sup>E-mail: serebrov\_ap@pnpi.nrcki.ru

В ускорительных экспериментах LSND и MiniBooNE [1, 2], в экспериментах с изотопными источниками нейтрино GALLEX, SAGE (так называемая галлиевая аномалия — ГА) [3, 4] были обнаружены эффекты, необъясняемые моделью осцилляций с тремя нейтрино. Результаты LSND и MiniBooNE не были подтверждены в других аналогичных экспериментах. Наблюдаемый в GALLEX и SAGE дефицит нейтрино был подтвержден экспериментом BEST [5].

В эксперименте «Нейтрино-4» методом относительных измерений на исследовательском реакторе СМ-3 в нейтринной лаборатории с перемещаемым детектором реакторных антинейтрино был обнаружен эффект осцилляций в стерильное состояние с параметрами  $\Delta m_{14}^2 = (7,3 \pm 1,17) \text{ эВ}^2$ ,  $\sin^2 2\theta = 0,36 \pm 0,12$  (стат.) [6]. Достоверность наблюдения осцилляционной зависимости составила  $2,7\sigma$ . Результат «Нейтрино-4» полностью согласуется с экспериментом BEST и ГА [7].

Тем не менее наблюдаемый в «Нейтрино-4» эффект пока не был подтвержден другими реакторными экспериментами, а достоверности  $2,7\sigma$  недостаточно. Кроме того, имеются некоторые противоречия с результатами экспериментов STEREO [8] и PROSPECT [9].

На установке, на которой эффект наблюдался, не может быть существенно увеличена статистическая точность. Достигнутый за 3,5 года уровень статистической точности определяется фоновыми условиями проведения эксперимента на поверхности Земли. Однако преимущества реактора СМ-3: малая активная зона, изолированные друг от друга лабораторные помещения большой площади — дают уникальную возможность напрямую наблюдать процесс осцилляций. Поэтому для наблюдения эффекта осцилляций в стерильное состояние на уровне достоверности  $\sim 5\sigma$  после 2 лет измерений необходимо проведение эксперимента по аналогичной методике относительных измерений с передвижным детектором там же, на реакторе СМ-3, но с новыми детекторами, позволяющими существенно подавить как фон случайных совпадений, так и коррелированный фон быстрых нейтронов и таким образом увеличить точность измерений. Поэтому было предложено создать в три раза более чувствительный детектор, а также вторую нейтринную лабораторию в помещении 170 на реакторе СМ-3 и модернизировать детектор в первой нейтринной лаборатории.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ПЕРВОЙ НЕЙТРИННОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Методика проведения относительных измерений спектра реакторных антинейтрино на различных расстояниях перемещаемым секционированным детектором дает возможность оценки параметров осцилляций без использования модельно-зависимых расчетов внутриреакторных процессов. Поэтому схема детектора (рис. 1, а) осталась прежней, а модернизация, направленная на увеличение чувствительности, коснулась, в первую очередь, сцинтиллятора и электронных систем детектора.

Главная проблема предыдущего эксперимента — плохое соотношение эффект–фон (0,5) из-за космического излучения. В эксперименте «Нейтрино-4» не были использованы возможности разделения по форме импульса сигналов от позитронов при регистрации антинейтрино и от протонов отдачи при рассеянии быстрых нейтронов космогенного происхождения. В «Нейтрино-4» использовался доступный на тот момент сцинтиллятор, произведенный для эксперимента Daya Bay [10], в котором задача разделения сигналов по форме импульса не являлась принципиально важной, поэто-

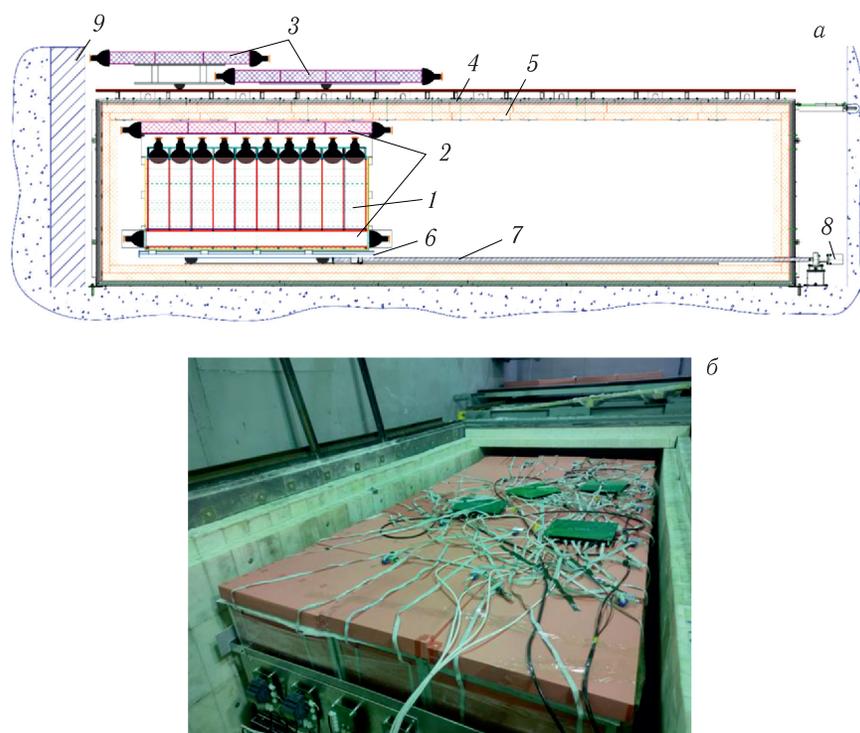


Рис. 1. а) Общая схема детектора в первой нейтринной лаборатории: 1 — детектор реакторных антинейтрино; 2 — внутренняя активная защита; 3 — внешняя активная защита (зонтик); 4 — стальная и свинцовая пассивная защита; 5 — борированный полиэтилен пассивной защиты; 6 — передвижная платформа; 7 — винт подачи; 8 — шаговый двигатель; 9 — защита от быстрых нейтронов из железной дроби. б) Детектор после монтажа и подключения активной защиты

му данный сцинтиллятор такими свойствами в должной мере не обладал. Однако соотношение эффект–фон может быть улучшено в 3–4 раза за счет сцинтиллятора с разделением сигнала по форме импульса и увеличения концентрации гадолиния для уменьшения случайных совпадений. Таким образом, для новых экспериментов требовалось разработать и изготовить сцинтиллятор с необходимыми свойствами. Эта задача была решена совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА. Был разработан, протестирован на опытных образцах и изготовлен в необходимом объеме  $\sim 10\text{-м}^3$  жидкий сцинтиллятор с вдвое большим содержанием гадолиния для подавления фона случайных совпадений. Состав нового сцинтиллятора позволяет реализовать методику разделения сигналов по форме для подавления коррелированного фона быстрых нейтронов [11].

Применение методики разделения сигналов по форме импульса потребовало их оцифровку с втрое большей частотой. В ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт» были разработаны новые версии системы распределения высоковольтного напряжения и системы сбора данных для работы с быстрыми сигналами и увеличенным потоком данных.

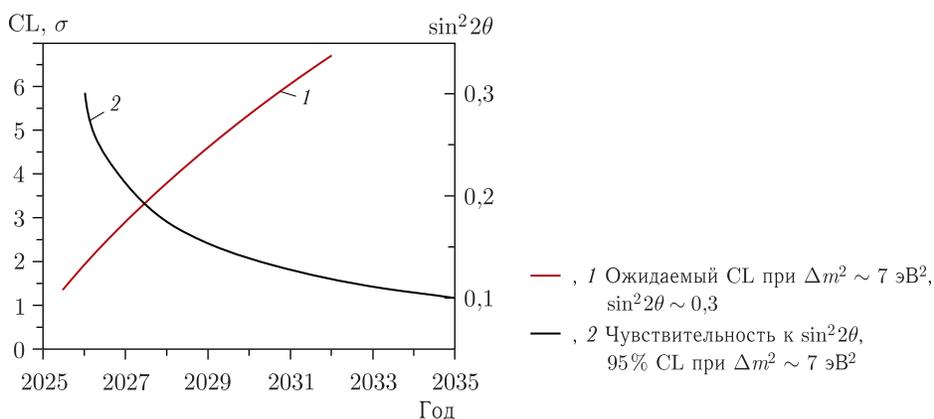


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Оценка чувствительности детектора в первой нейтринной лаборатории к параметрам осцилляций. Красная линия 1 — ожидаемый уровень достоверности при наличии эффекта осцилляций с  $\Delta m^2 = 7 \text{ эВ}^2$ ,  $\sin^2 2\theta = 0,3$  в зависимости от времени, черная 2 — ожидаемая чувствительность к  $\sin^2 2\theta$  для  $\Delta m^2 = 7 \text{ эВ}^2$  для 95%-го уровня достоверности

Для более эффективной регистрации космического излучения и работы активной защиты (АЗ) по схеме антисовпадений в ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» была изготовлена новая АЗ, охватывающая детекторы с пяти сторон (рис. 1, б).

Также в ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт» совместно с «Прометей» НИЦ «Курчатовский институт» были разработаны и изготовлены магнитные экраны для фотоумножителей, подавляющие магнитное поле Земли не менее, чем в 4,5 раза [12]. Это важно, чтобы исключить влияние магнитных полей на коэффициент усиления ФЭУ.

Кроме того, была разработана система оптической калибровки и мониторинга стабильности детекторов с помощью источников света на основе кристаллов ГГАГ с альфа-источником Am-241.

Модернизация лаборатории была завершена в декабре 2023 г.: заменена внутренняя часть детектора, залит новый сцинтиллятор, установлены фотоумножители с экранами, подключены новая система сбора данных и обновленная высоковольтная система, проведена энергетическая калибровка детектора, смонтирована активная защита.

В марте 2024 г. был начат набор данных. Предварительный анализ данных показал, что соотношение эффект/фон удалось увеличить до 1,5 (вместо 0,5 при прежнем оснащении лаборатории). На рис. 2 представлена оценка чувствительности детектора к тем параметрам осцилляций, которые наблюдались в эксперименте «Нейтрино-4», полученная на основании предварительно обработанных данных.

## СОЗДАНИЕ ВТОРОЙ НЕЙТРИННОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Вторая нейтринная лаборатория располагается в помещении 170 в том же здании, что и первая. Придерживаясь методики относительных измерений, для второй лаборатории создали перемещаемый секционированный детектор антинейтрино.

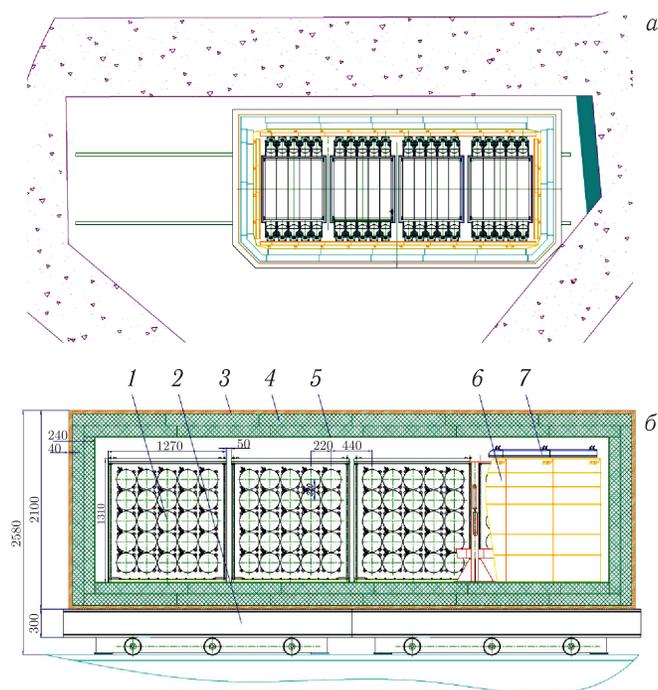


Рис. 3. Конструкция детектора реакторных антинейтрино на подвижной платформе (а) и схема расположения детектора в помещении 170 (б). 1 — детектор антинейтрино; 2 — подвижная платформа; 3 — медь; 4 — борированный полиэтилен; 5 — борированная резина; 6 — панели активной защиты вертикальные; 7 — панели активной защиты верхние

Таким образом, схема эксперимента (рис. 3) не претерпела существенных изменений, тем не менее в конструкцию нового детектора были внесены некоторые существенные изменения.

Пассивная защита устанавливается на перемещаемую платформу и передвигается вместе с детектором. Детектор состоит из 4 модулей, и общий объем мишени увеличился в три раза. Новый детектор также секционированный, но каждая секция просматривается ФЭУ с двух сторон. Идея использовать схему с двумя ФЭУ преследует две цели: улучшить качество светосбора благодаря симметричной геометрии и уменьшить уровень шумов благодаря использованию схемы совпадений.

После проведения серии измерений и методом моделирования Монте-Карло [11] был подобран оптимальный состав пассивной защиты: 4 см меди, 24 см борированного полиэтилена (5% бора) и 3 мм борированной резины (40% бора) вокруг самого детектора, т. е. после внутренней АЗ. Расчеты показали уменьшение числа рожденных в меди быстрых нейтронов от мюонов до двух раз по сравнению со свинцом. Пассивная защита была изготовлена в ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт». Для отработки процесса монтажа и проведения измерения фоновых условий пассивная защита была полностью собрана на платформе (рис. 4). Впоследствии для упрощения



Рис. 4. Пассивная защита детектора во второй нейтринной лаборатории в помещении 170 в сборе

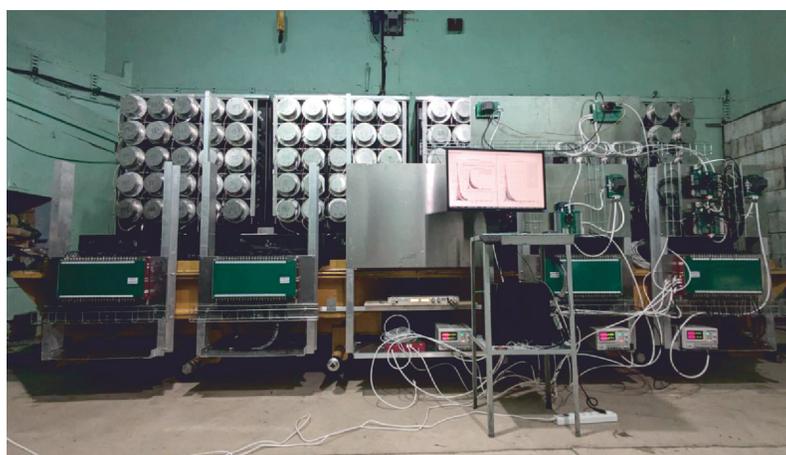


Рис. 5. Детектирующие модули после заливки сцинтиллятора, установки ФЭУ и подключения к электронным системам

процесса монтажа детекторов и активной защиты пассивная защита была демонтирована (кроме плит пола).

Осенью 2024 г. было завершено изготовление электронного оборудования (высоковольтная система и система сбора данных) для полного оснащения одного детектирующего модуля. Для всех 200 ФЭУ регулировкой высокого напряжения был подобран коэффициент усиления ФЭУ. В декабре 2024 г. был закончен монтаж детектирующих модулей, залит сцинтиллятор, установлены фотоумножители с магнитными экранами, первый модуль подключен к высоковольтной системе и системе сбора данных (рис. 5).

На рис. 6 показана оценка чувствительности детектора к параметрам осцилляций  $\Delta m^2 = 7 \text{ эВ}^2$ ,  $\sin^2 2\theta = 0,3$  в зависимости от времени и ожидаемая чувствительность к  $\sin^2 2\theta$  для  $\Delta m^2 = 7 \text{ эВ}^2$  для 95%-го уровня достоверности.

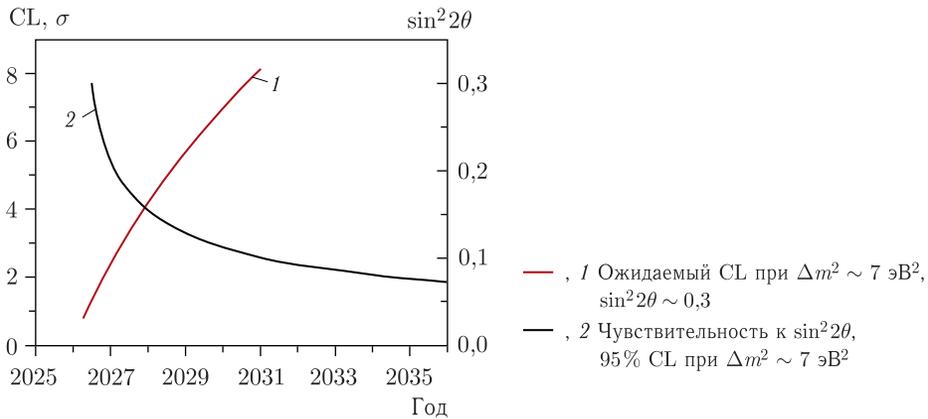


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Оценка чувствительности детектора во второй нейтринной лаборатории к параметрам осцилляций. Красная линия 1 — ожидаемый уровень достоверности при наличии эффекта осцилляций с параметрами  $\Delta m^2 = 7 \text{ эВ}^2$ ,  $\sin^2 2\theta = 0,3$  в зависимости от времени. Черная линия 2 — ожидаемая чувствительность к  $\sin^2 2\theta$  для  $\Delta m^2 = 7 \text{ эВ}^2$  для 95%-го уровня достоверности

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На реакторе СМ-3 в первой нейтринной лаборатории установлен новый перемещаемый детектор с новым жидким сцинтиллятором, активной защитой с пяти сторон и магнитными экранами ФЭУ. Набор данных на модернизированной установке начат в марте 2024 г. Анализ данных показал, что соотношение эффект/фон удалось увеличить до 1,5.

В помещении 170 продолжается монтаж оборудования для второй нейтринной лаборатории: установлен и заполнен новым жидким сцинтиллятором детектор, смонтирована система передвижения, подготовлена к монтажу активная и пассивная защита. После предварительного анализа данных, полученных в первой модернизированной лаборатории, была сделана оценка ожидаемой чувствительности обновленного детектора и детектора для второй лаборатории. Оценка показала, что за 2 года набора данных можно выйти на точность определения параметров осцилляций нейтрино в стерильное состояние в области  $\Delta m_{14}^2 \sim 10 \text{ эВ}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14} \sim 0,3$  до  $5\sigma$ .

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-12-00091.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aguilar A. et al. (LSND Collab.). Evidence for Neutrino Oscillations from the Observation of Appearance in a Beam // Phys. Rev. D. 2001. V. 64. P. 112007.*
2. *Aguilar-Arevalo A. A. et al. (MiniBooNE Collab.). Updated MiniBooNE Neutrino Oscillation Results with Increased Data and New Background Studies // Phys. Rev. D. 2021. V. 103. P. 052002.*

3. *Hampel W. et al. (GALLEX Collab.)*. Final Results of the Cr-51 Neutrino Source Experiments in GALLEX // *Phys. Lett. B*. 1998. V. 420. P. 114–126.
4. *Abdurashitov J. et al. (SAGE Collab.)*. Measurement of the Response of the Russian–American Gallium Experiment to Neutrinos from a Cr-51 Source // *Phys. Rev. C*. 1999. V. 59. P. 2246–2263.
5. *Barinov V. V. et al. (BEST Collab.)*. A Search for Electron Neutrino Transitions to Sterile States in the BEST Experiment // *Phys. Rev. C*. 2022. V. 105. P. 065502.
6. *Serebrov A. P. et al. (Neutrino-4 Collab.)*. Search for Sterile Neutrinos with the Neutrino-4 Experiment and Measurement Results // *Phys. Rev. D*. 2021. V. 104. P. 032003.
7. *Serebrov A. P., Samoiloв R. M., Chaikovskii M. E.* Analysis of the Result of the Neutrino-4 Experiment Together with Other Experiments on the Search for Sterile Neutrinos within the 3+1 Neutrino Model // *JETP*. 2023. V. 137, No. 1. P. 55–70.
8. *Almazán H. et al. (STEREO Collab.)*. STEREO Neutrino Spectrum of  $^{235}\text{U}$  Fission Rejects Sterile Neutrino Hypothesis // *Nature*. 2023. V. 613. P. 257–261.
9. *Andriamirado M. et al. (PROSPECT Collab.)*. Final Search for Short-Baseline Neutrino Oscillations with the PROSPECT-I Detector at HFIR. arXiv:2406.10408 [hep-ex].
10. *Beriguete W., Jun Cao, Yayun Ding, Sunej Hans, Heeger K. M., Liangming Hu, Aizhong Huang, Kam-Biu Luk, Nemchenok I., Ming Qi, Rosero R., Hansheng Sun, Ruiguang Wang, Yifang Wang, Liangjian Wen, Yi Yang, Minfang Yeh, Zhiyong Zhang, Li Zhou*. Production of a Gadolinium-Loaded Liquid Scintillator for the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2014. V. 763. P. 82–88.
11. *Серебров А. П., Ивочкин В. Г., Самойлов Р. М., Фомин А. К., Зиновьев В. Г., Волков С. С., Головцов В. Л., Грузинский Н. В., Неустроев П. В., Федоров В. В., Паршин И. В., Герасимов А. А., Зайцев М. Е., Чайковский М. Е., Гагарский А. М., Петелин А. Л., Ижуртов А. Л., Громов М. О., Сазонтов С. А., Тузов А. А., Рыкалин В. И., Макаренков Д. А., Немерюк А. М., Кузьмина Т. Е.* Создание второй нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3 с целью увеличения точности эксперимента «Нейтрино-4» // *ЖТФ*. 2023. Вып. 1. С. 175.
12. *Mozhaiko A. A., Manninen S. A., Mukhamedzyanova L. V., Kuznetsov P. A., Knyazyuk T. V., Serebrov A. P., Samoiloв R. M., Fedorov V. V.* Development and Study of Magnetic Shields for Neutrino Detector Photomultiplier Tubes under Neutrino-4M Experiment on PIK and SM-3 Reactors // *Tech. Phys*. 2024. V. 69, No. 5. P. 1287–1295.

Получено 9 июля 2025 г.