

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА АНТИНЕЙТРИНО ДЛЯ ВТОРОЙ НЕЙТРИННОЙ ЛАБОРАТОРИИ НА РЕАКТОРЕ СМ-3

© 2023 г. А. К. Фомин^{а,*}, А. П. Серебров^а

^а Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова Поща, 1

*e-mail: fomin_ak@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

После доработки 27.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Выполнено моделирование эксперимента по поиску стерильного нейтрино с новым детектором для второй нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3 (Дмитровград, Россия). Детектор сцинтилляционного типа предназначен для регистрации реакторных антинейтрино и имеет многосекционную структуру с горизонтальным расположением секций. В результате моделирования получены распределения счетов от мгновенных и задержанных сигналов, а также эффективность детектора в зависимости от выбранных порогов. Проведено моделирование потока антинейтрино с учетом размеров активной зоны реактора и ее пространственного расположения по отношению к детектору. Благодаря этому рассчитан эффект, который должен быть получен в результате измерений для заданных параметров осцилляций и энергетического разрешения детектора.

DOI: 10.31857/S0032816223020179, EDN: GTCCFD

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени результаты ряда экспериментов побуждают к обсуждению возможности существования стерильного нейтрино, имеющего значительно меньшее сечение взаимодействия с веществом, чем, например, электронные антинейтрино от реактора. Предполагается, что благодаря переходу реакторных антинейтрино в стерильное состояние может наблюдаться эффект осцилляций на коротких расстояниях от реактора и дефицит потока реакторных антинейтрино на больших расстояниях. Процесс осцилляций в стерильное состояние может быть описан на коротких расстояниях следующей формулой:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 L}{E_{\bar{\nu}}} \right), \quad (1)$$

где L , м — расстояние, которое антинейтрино пролетело от реактора; $E_{\bar{\nu}}$, МэВ — энергия антинейтрино; Δm_{14}^2 , эВ² — разность квадратов масс электронного нейтрино и стерильного нейтрино; $\sin^2 2\theta_{14}$ — угол смешивания электронного нейтрино и стерильного нейтрино.

Аномалии обнаружены в нескольких ускорительных и реакторных экспериментах: LSND [1], MiniBooNE [2], реакторная аномалия [3], а также

в экспериментах с радиоактивными источниками GALLEX/GNO, SAGE и BEST [4–6]. Наконец, в эксперименте “Нейтрино-4” был обнаружен эффект осцилляций с параметрами $\Delta m_{14}^2 = 7.3$ эВ² и $\sin^2 2\theta = 0.36$ на уровне достоверности 2.9σ [7].

Эксперимент “Нейтрино-4” осуществляется с конца 2013 года на реакторе СМ-3 (Дмитровград, Россия) в нейтринной лаборатории в помещении 162. Исследовательский реактор СМ-3, благодаря своей высокой мощности (100 МВт), компактной активной зоне (42 × 42 × 35 см), топливу с высоким обогащением и некоторым конструктивными особенностями здания (лабораторные помещения отделены друг от друга толстыми бетонными стенами), является одним из лучших мест для проведения такого эксперимента. Идея эксперимента состоит в использовании передвижного секционированного детектора, с помощью которого измеряются поток и спектры антинейтрино на разной удаленности от реактора (6–12 м). Детектор состоит из 5 × 10 вертикальных секций с одним фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) наверху.

Для развития эксперимента создается вторая нейтринная лаборатория на реакторе СМ-3 в помещении 170. В этом помещении есть возможность измерить поток антинейтрино в более широком диапазоне расстояний (6–15 м), чем в существующей

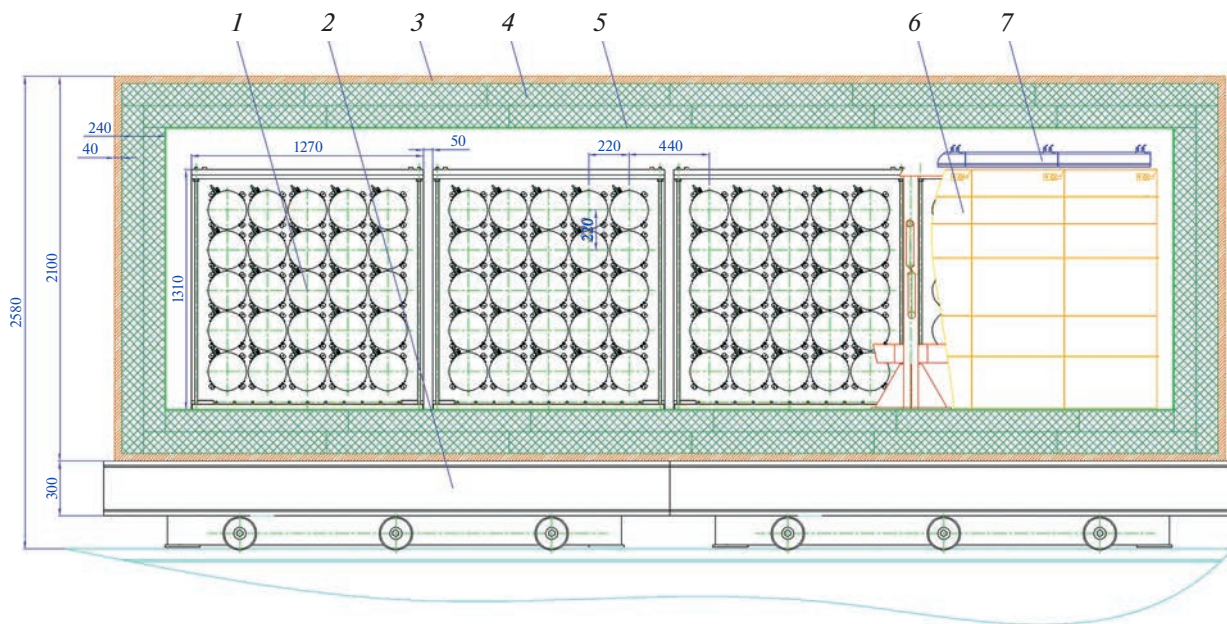


Рис. 1. Схема детектора реакторных антинейтрино на подвижной платформе. 1 – детектор антинейтрино, 2 – подвижная платформа, 3 – медь, 4 – борированный полиэтилен, 5 – борированная резина, 6 – вертикальные панели активной защиты, 7 – верхние панели активной защиты.

шей лаборатории. Измерения будут проводиться с новым усовершенствованным детектором [8]. Также будет использован ряд дополнительных методов для борьбы с коррелированным фоном и для снижения фона случайных совпадений, как то: разделение сигналов по форме импульса, увеличение эффективности активной защиты, оптимизация конструкции пассивной защиты, увеличение концентрации гадолиния.

2. КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА

Детектор состоит из четырех идентичных модулей, расположенных на подвижной платформе вместе с активной и пассивной защитой (рис. 1). Благодаря перемещениям детектора будет охвачен весь диапазон расстояний до активной зоны реактора. Каждый из четырех модулей состоит из 5×5 горизонтальных секций размерами $21.6 \times 21.6 \times 116.6$ см с жестко фиксированными перегородками между ними. Перегородки служат для предотвращения выхода света за пределы секции. При проведении измерений детектор будет перемещаться в различные позиции на расстояния, кратные размеру секции. Таким образом, каждая точка будет промерена разными секциями и усреднена возможная разница в эффективности секций детектора. Секции заполнены жидким сцинтиллятором. Материал сцинтиллятора – минеральное масло (CH_2) с добавкой гадолиния. Световой выход сцинтиллятора составляет 10^4 фотонов на 1 МэВ.

В каждой секции с торцов расположены два ФЭУ Hamamatsu R5912.

Расчетная схема отдельного модуля представлена на рис. 2. Жидкий сцинтиллятор отделен от ФЭУ стенкой из прозрачного оргстекла толщиной 3 см. Между стенкой и ФЭУ расположен цилиндрический световод. Оптический контакт отсутствует, между поверхностью ФЭУ и прозрачной стенкой имеется воздушный зазор.

Детектор сцинтилляционного типа основан на использовании реакции обратного β -распада: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. Образовавшийся позитрон аннигилирует с испусканием двух γ -квантов с энергией 511 кэВ каждый, которые разлетаются в противоположных направлениях. Образовавшийся нейтрон поглощается гадолинием с испусканием каскада γ -квантов с суммарной энергией около 8 МэВ. В детекторе будет регистрироваться два последовательных сигнала от позитрона и нейтрона – так называемые коррелированные сигналы. В первом приближении связь между энергией позитрона и антинейтрино линейна: $E_{\bar{\nu}} = E_{e^+} + 1.8$ МэВ. Поэтому спектр антинейтрино в эксперименте восстанавливается из спектра позитронов.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОСБОРА

Для моделирования эксперимента разработана с использованием метода Монте-Карло модель, в которой рассчитывается траектория каждого фотона. При расчетах использовался спектр

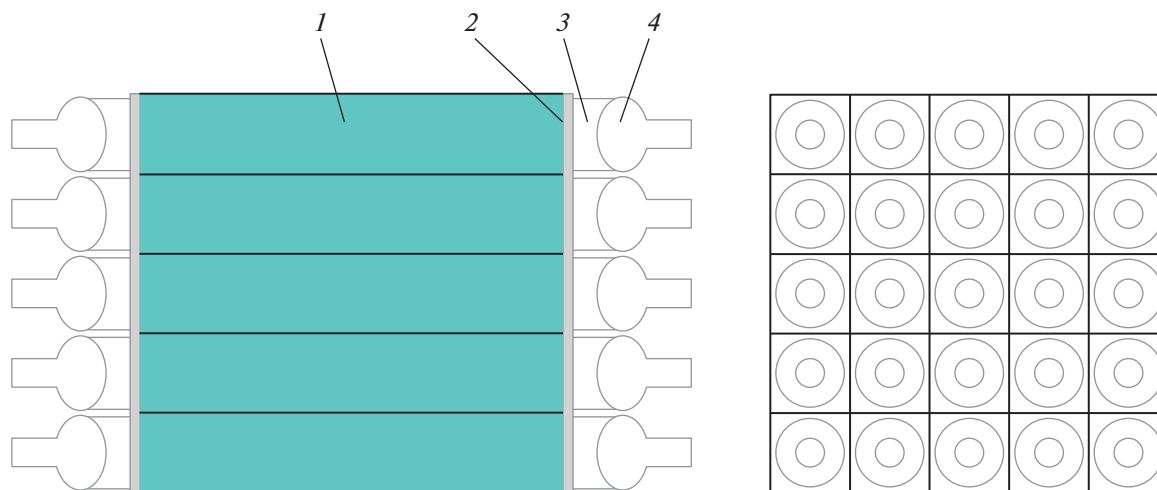


Рис. 2. Расчетная схема одного модуля. 1 – сцинтиллятор, 2 – стенка из оргстекла, 3 – воздушный зазор, 4 – ФЭУ.

antineйтрино распада ^{235}U . Было принято, что пучок антинейтрино направлен вдоль оси детектора. Такое допущение возможно при удалении детектора от активной зоны реактора на расстояние 6–15 м. Направление вылета позитронов принято изотропным. Экспоненциальная длина пробега фотонов в сцинтилляторе при расчете составляет 4 м. Фотоны отражаются от стенок зеркально с вероятностью отражения 0.95. На рис. 3

представлено полученное в результате моделирования методом Монте-Карло распределение счета ФЭУ (число зарегистрированных фотонов) от позитронов разных энергий с учетом энерговыделения по 511 кэВ от каждого из двух γ -квантов. Ширина распределения практически не зависит от энергии позитрона и составляет 500 кэВ, что определяется в основном неполным поглощением γ -квантов в пределах секции. Расщепление рас-

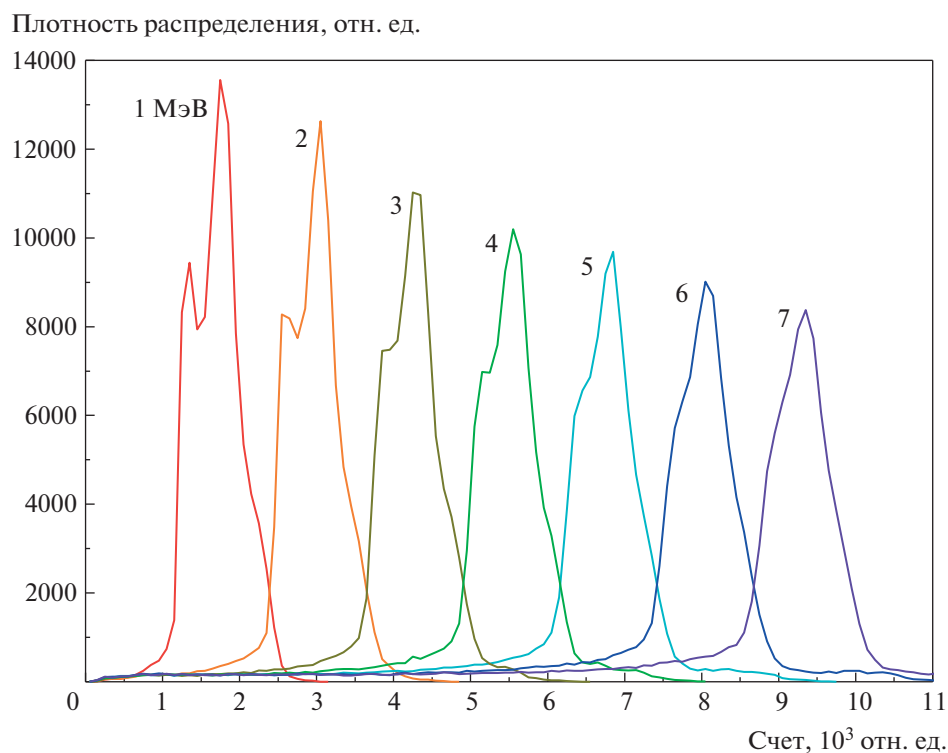


Рис. 3. Распределение счета ФЭУ от позитронных событий с энергией от 1 до 7 МэВ.

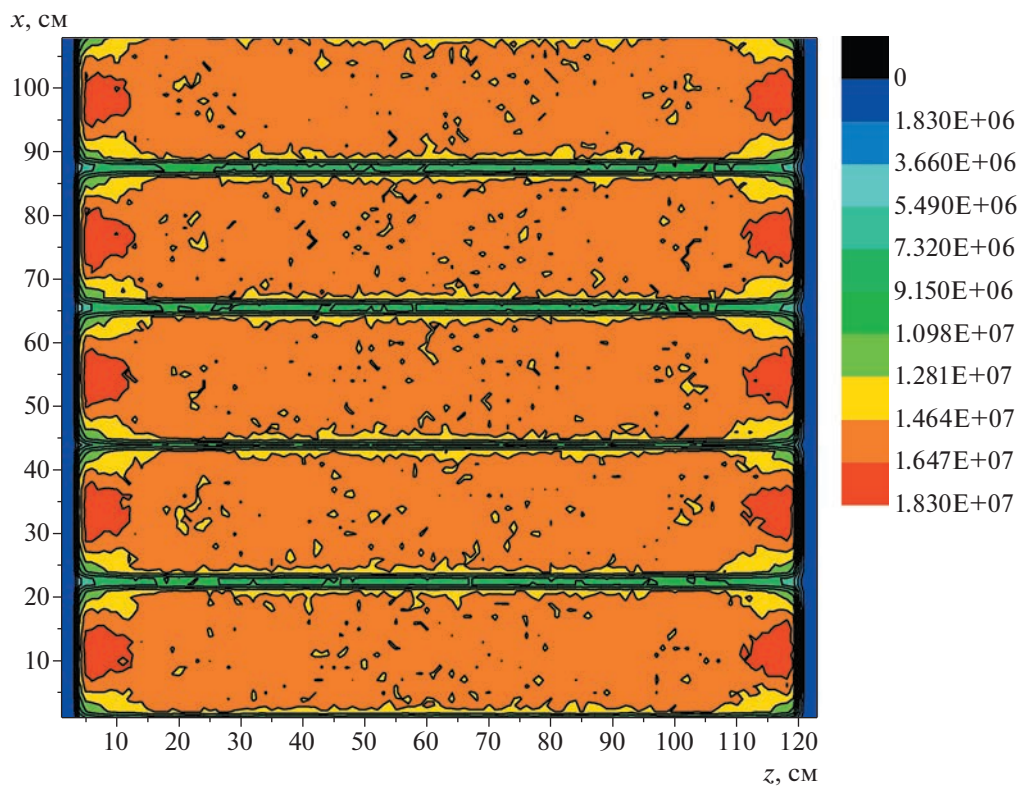


Рис. 4. Счет ФЭУ секций детектора в зависимости от места позитронного события с энергией позитрона 4 МэВ.

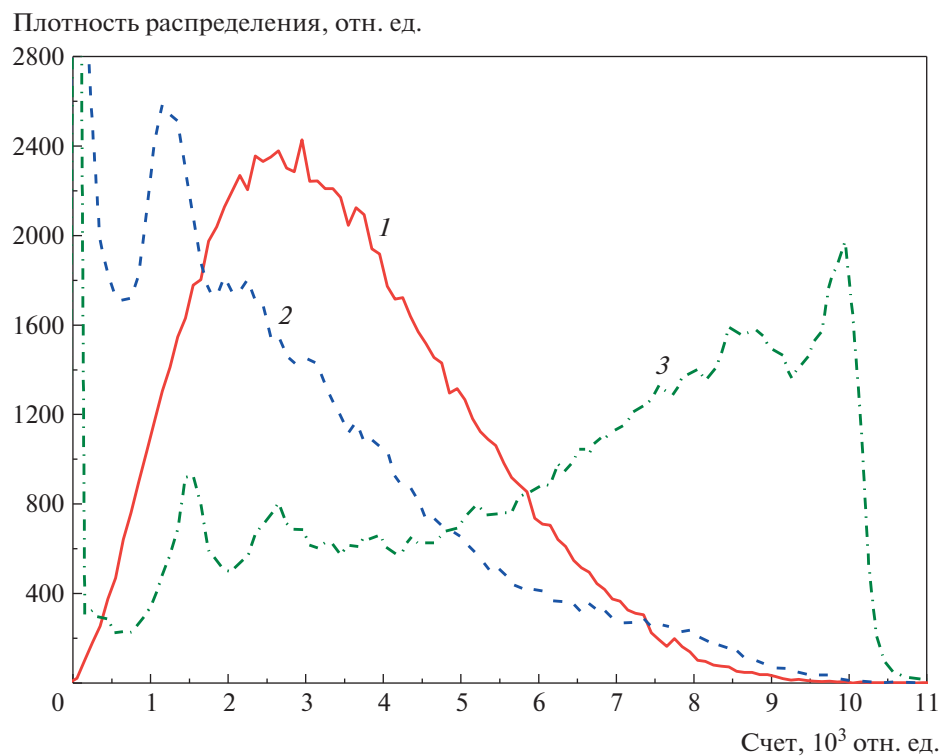


Рис. 5. Распределение сигналов от позитронного события для спектра позитронов (1) и нейтронного события при использовании ФЭУ только секции, в которой произошло событие, (2) и ФЭУ всех секций (3).

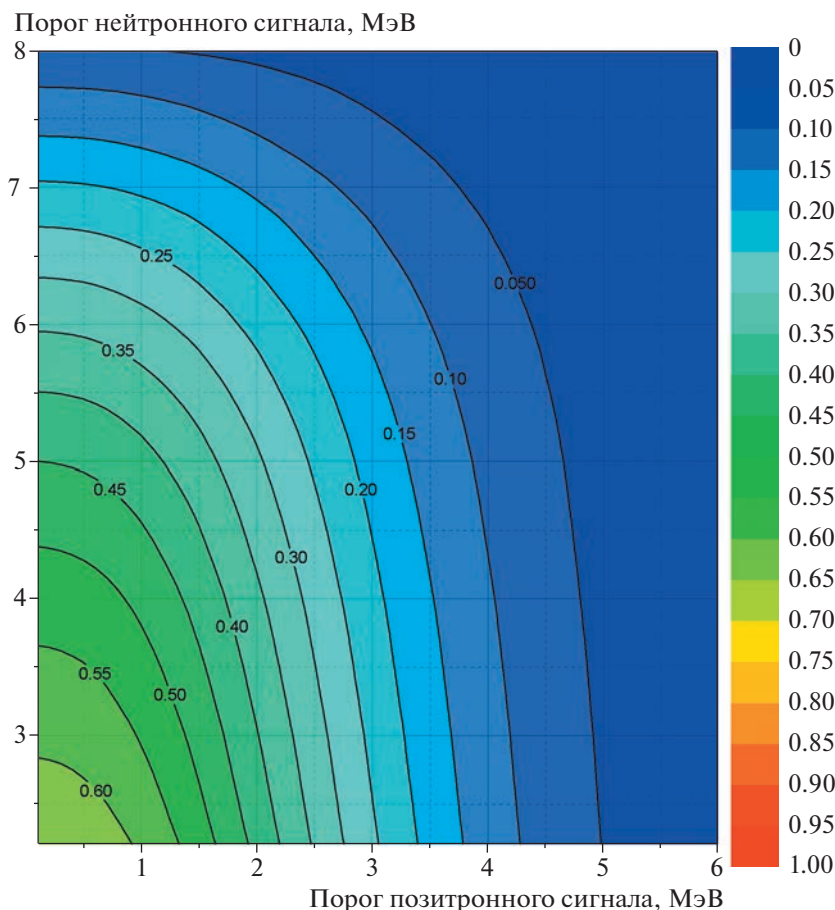


Рис. 6. Эффективность детектора в зависимости от порогов позитронного и нейтронного сигналов.

пределения на два пика при малых энергиях также объясняется этим обстоятельством. Используя данные рис. 3, можно установить связь между счетом фотонов и энергией позитрона.

На рис. 4 показан счет ФЭУ в зависимости от места позитронного события с энергией позитрона 4 МэВ. Эффективность транспортировки света для прямых углов падения на зеркальные стенки световода хуже из-за многократного переотражения между стенками. Поэтому свет с дальних позиций до ФЭУ доходит хуже, чем с ближних. В связи с этим в установке используется эффект полного внутреннего отражения света на границе сцинтиллятор–воздух при малых углах падения, чтобы улучшить равномерность сбора света с разных расстояний.

На рис. 5 представлены распределения сигналов от позитронных и нейтронных событий. В эксперименте порог регистрации позитронного сигнала будет 1.5 МэВ. Для спектра позитронов эффективность регистрации при таком пороге составляет $\epsilon_{e^+} = 0.817(5)$.

При регистрации нейтронного сигнала предполагается использовать порог 3.2 МэВ. Это необходимо для подавления фона случайных совпадений, связанного с естественной радиоактивностью. При этом эффективность регистрации нейтронного сигнала при учете счета ФЭУ всех секций детекторного модуля составляет $\epsilon_n = 0.722(5)$. При учете счета ФЭУ только той секции, в которой произошло событие, $\epsilon_n = 0.217(5)$. С учетом того, что примерно 20% нейтронов захватывается водородом с выделением около 2.2 МэВ, эффективность при учете ФЭУ всех секций модуля равна $\epsilon_n = 0.578(5)$. В итоге эффективность детектора, полученная в результате моделирования с учетом порогов позитронного и нейтронного сигналов, составляет $\epsilon = 0.472(5)$. Зависимость эффективности детектора от порогов при учете счета ФЭУ всех секций модуля показана на рис. 6.

Однако следует заметить, что при используемой в эксперименте обработке данных методом относительных измерений эффективность детек-

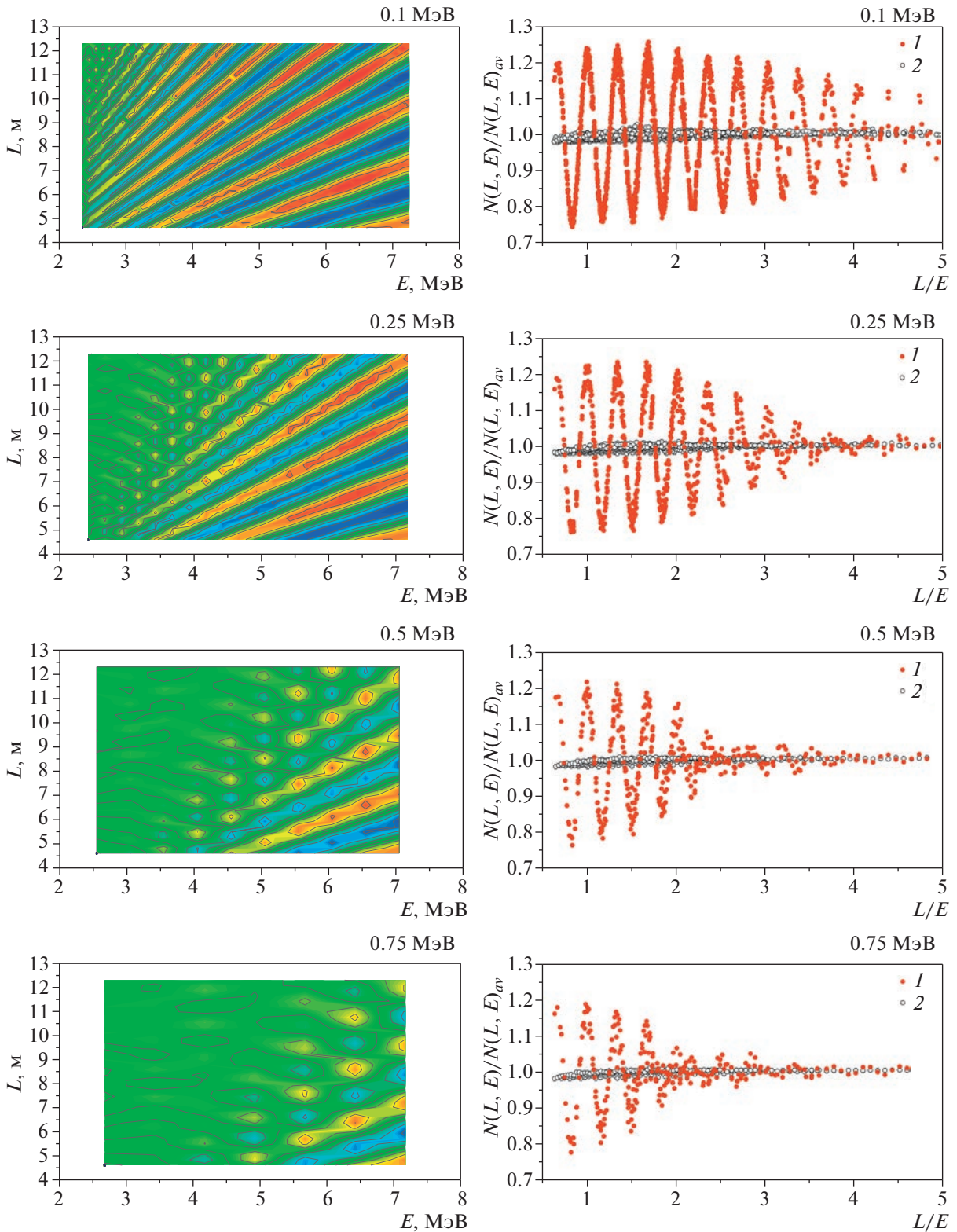


Рис. 7. Слева – моделирование отношения $N_{ik} L_k^2 / \left(K^{-1} \sum_k^K N_{ik} L_k^2 \right)$ при разном энергетическом разрешении детектора; справа – эффект осцилляций: 1 – моделирование с осцилляциями антинейтрино при $\sin^2 2\theta_{14} = 0.36$ и $\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ эВ}^2$, 2 – без осцилляций.

тора не входит в задачу, хотя и влияет на точность измерений.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА АНТИНЕЙТРИНО

В эксперименте используется метод, основанный на относительных измерениях, при которых исключается форма спектра, т.е. модельно-независимый анализ данных. Метод основан на использовании уравнения:

$$R_{ik}^{\text{exp}} = (N_{ik} \pm \Delta N_{ik}) L_k^2 / \left(K^{-1} \sum_k (N_{ik} \pm \Delta N_{ik}) L_k^2 \right), \quad (2)$$

где числитель – счет антинейтринных событий с заданной энергией с поправкой на геометрический множитель L^2 ; знаменатель – счет антинейтринных событий с той же заданной энергией, усредненный по всем расстояниям; i – номер интервала по энергии; k – номер интервала по расстоянию.

Выборку данных необходимо проводить по параметру L/E , так как именно от него зависит эффект осцилляций, как видно из формулы (1). Это метод так называемого когерентного сложения результатов измерений, который благодаря выборке данных по переменной L/E дает возможность прямого наблюдения антинейтринных осцилляций.

Поток антинейтрино был смоделирован с учетом размеров активной зоны реактора и ее пространственного расположения по отношению к детектору антинейтрино. Антинейтрино равномерно рождаются в объеме активной зоны реактора с изотропным направлением вылета. Моделирование проведено для точек по расстоянию, соответствующему шагу перемещения детектора, и для разных вариантов разрешения по энергии антинейтрино: 0.1, 0.25, 0.5 и 0.75 МэВ. Результаты моделирования, демонстрирующие эффект осцилляций, показаны на рис. 7.

В расчетах статистическая точность моделирования отношения $\Delta N_{ik}/N_{ik}$ составляла 1%, что значительно лучше, чем в эксперименте. Из результатов моделирования методом Монте-Карло становится очевидным, как должен выглядеть ожидаемый эффект осцилляций на плоскости (E, L) . Следующий важный вывод состоит в том, что процесс осцилляций затухает, и это зависит от энергетического разрешения детектора.

Из проведенного моделирования ясно, что разрешение детектора очень важно для детектирования эффекта осцилляций. Кроме того, эффект осцилляций может быть выявлен путем построения зависимости экспериментально полученного отношения по формуле (2) от L/E . Следует отметить,

что суммирование элементов матрицы отдельно по энергии или по расстоянию существенно снижает возможности для детектирования эффекта осцилляций.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана компьютерная модель нового детектора реакторных антинейтрино в эксперименте “Нейтрино-4” с горизонтальным расположением секций. Проведены расчеты, необходимые для проектирования установки. Получен расчетный спектр антинейтрино, который может быть в дальнейшем сравнен с экспериментальным. В результате моделирования рассчитан эффект, который должен быть получен при измерениях для заданных параметров осцилляций и энергетического разрешения детектора.

В настоящее время в мире существует ряд реакторных экспериментов по поиску стерильного нейтрино на коротких дистанциях: DANSS [9], NEOS [10], PROSPECT [11], STEREO [12]. Эксперимент “Нейтрино-4” показывает наилучшую чувствительность в области больших Δm_{14}^2 благодаря компактным размерам активной зоны реактора, секционной структуре детектора и схеме измерений спектра на разных расстояниях в достаточно широком диапазоне расстояний вблизи реактора. Все эти преимущества сохранятся и в новой лаборатории. Благодаря созданию второй нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3 и нового детектора будет получен окончательный ответ на вопрос о существовании стерильного нейтрино с наблюдаемыми в эксперименте “Нейтрино-4” параметрами осцилляций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00079).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. LSND Collaboration. *Aguilar A. et al.* // Phys. Rev. D. 2001. V. 64. P. 112007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.112007>
2. MiniBooNE Collaboration. *Aguilar-Arevalo A.A. et al.* // Phys. Rev. Letters. 2018. V. 121. P. 221801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.221801>
3. *Mention G., Fechner M., Lasserre Th., Mueller Th.A., Lhuillier D., Cribier M., Letourneau A.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. P. 073006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.073006>
4. GALLEX Collaboration. *Hampel W. et al.* // Phys. Letters B. 1998. V. 420. P. 114. [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(97\)01562-1](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(97)01562-1)

5. SAGE Collaboration. *Abdurashitov J. et al.* // Phys. Rev. C. 1999. V. 59. P. 2246.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.59.2246>
6. BEST Collaboration. *Barinov V.V. et al.* // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. P. 065502.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.105.065502>
7. *Serebrov A.P., Samoilo v R.M., Ivochkin V.G., Fomin A.K., Zinoviev V.G., Neustroev P.V., Golovtsov V.L., Volkov S.S., Chernyj A.V., Zherebitsov O.M., Chaikovskii M.E., Petelin A.L., Izhutov A.L., Tuzov A.A., Sazontov S.A. et al.* // Phys. Rev. D. 2021. V. 104. P. 032003.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.032003>
8. Neutrino-4 Collaboration. *Samoilov R.M. et al.* // LXXI International conference “NUCLEUS–2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies”. St.Petersburg, September 20–25, 2021.
https://indico.cern.ch/event/1012633/contributions/4480300/attachments/2315193/3940949/Samoilov_neutrino-4_nucleus21.pdf
9. *Alekseev I., Belov V., Brudanin V., Danilov M., Egorov V., Filosofov D., Fomina M., Hons Z., Kazartsev S., Kobayashi A., Kuznetsov A., Machikhiliyan I., Medvedev D., Nesterov V., Olshevsky A. et al.* // Phys. Lett. B. 2018. V. 787. P. 56.
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.10.038>
10. NEOS Collaboration. *Ko Y.J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118. P. 121802.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.121802>
11. PROSPECT Collaboration. *Andriamirado M. et al.* // Phys. Rev. D. 2021. V. 103. P. 032001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.032001>
12. STEREO Collaboration. *Almazán H. et al.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. P. 052002.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.052002>