

Влияние учета детальной геометрии активной зоны на поток антинейтрино от реактора ВВЭР-1000

И. Н. Жутиков^{1)*}, Е. А. Литвинович^{†*}, В. А. Хватов[×]

[†] Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Москва, Россия

^{*} Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

[×] Филиал АО Концерн Росэнергоатом “Калининская атомная станция”, 171841 Удомля, Россия

Поступила в редакцию 11 декабря 2023 г.

После переработки 9 января 2024 г.

Принята к публикации 10 января 2024 г.

На основе данных топливной кампании 3-го энергоблока Калининской АЭС показано, что учет детальной геометрии реактора, его конечных размеров, распределения энерговыделения и состава топлива в различных точках активной зоны приводит к появлению неоднородности в потоке антинейтрино из активной зоны. Эта неоднородность особенно заметна на расстояниях, сравнимых с размерами активной зоны. На таких расстояниях детальный расчет дает больший поток антинейтрино в сравнении с упрощенными моделями, а также появляется зависимость потока от направления. Для нейтринных детекторов, осуществляющих поиск переходов нейтрино в стерильное состояние на малых расстояниях от реактора, это может заметно повлиять на измерения параметров осцилляций Δm_{14}^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$. Показано, что существуют выделенные направления на реактор, при которых по изменению скорости счета нейтринного детектора можно судить не только об изменении изотопного состава топлива, но и изменении распределения энерговыделения по объему активной зоны.

DOI: 10.31857/S1234567824030029, EDN: svlogt

1. Введение. В настоящее время большое пространство получили нейтринные эксперименты на атомных станциях с промышленными реакторами, которые обеспечивают большой поток электронных антинейтрино из активной зоны (АЗ). Перед такими экспериментами ставится ряд прикладных задач, связанных с мониторингом состояния реактора и измерением накопления плутония по антинейтрину, а также фундаментальные задачи, среди которых поиск переходов антинейтрино в стерильное состояние. Детектирование антинейтрино осуществляется, как правило, по продуктам реакции обратного бета-распада на протоне – позитрону, энергия которого однозначно связана с энергией антинейтрино ($E_{\bar{\nu}_e} = E_{e^+} + 0.784$ МэВ), и нейтрону, запаздывающая регистрация которого обеспечивает выделение “полезных” нейтринных событий взаимодействия среди маскирующих фоновых событий:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \rightarrow (e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma) + n.$$

Существующие ограничения на параметры осцилляций нейтрино в стерильное состояние Δm_{14}^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$ [1–5] требуют размещения нейтринного де-

тектора на малых расстояниях от центра АЗ. Методика поиска осцилляций заключается, как правило, в анализе отношения спектров антинейтрино, измеренных на различных расстояниях, и его сравнении с теоретически ожидаемым. Для реактора ВВЭР-1000 высота АЗ составляет 3.70 м, а диаметр – 3.16 м. Таким образом, при расчете ожидаемого потока и спектров антинейтрино от делящихся нуклидов из АЗ становится очевидной необходимость учета детальной геометрии реактора и эволюции топливной загрузки в ходе кампании. Ниже рассмотрены вопросы влияния на поток антинейтрино детальной геометрии АЗ реактора ВВЭР-1000, распределения мощности и долей деления нуклидов по ее объему в ходе топливной кампании.

2. Методика расчета потока антинейтрино от реактора. В общем виде поток антинейтрино Φ от реактора можно рассчитать по формуле:

$$\Phi(t, E_{\bar{\nu}_e}, \mathbf{L}_0) = \frac{1}{4\pi} \cdot \sum_k \frac{N_f(t, \mathbf{r}_k)}{(\mathbf{L}_0 - \mathbf{r}_k)^2} \cdot S_f(t, \mathbf{r}_k, E_{\bar{\nu}_e}), \quad (1)$$

где сумма по k берется по всем элементам АЗ, от которых вычисляется поток антинейтрино. В этой формуле $\mathbf{L}_0$ – расстояние между точкой, в которой рассчитывается поток, и центром АЗ, $\mathbf{r}_k$ – радиус-

¹⁾e-mail: Zhutikov_IN@nrcki.ru

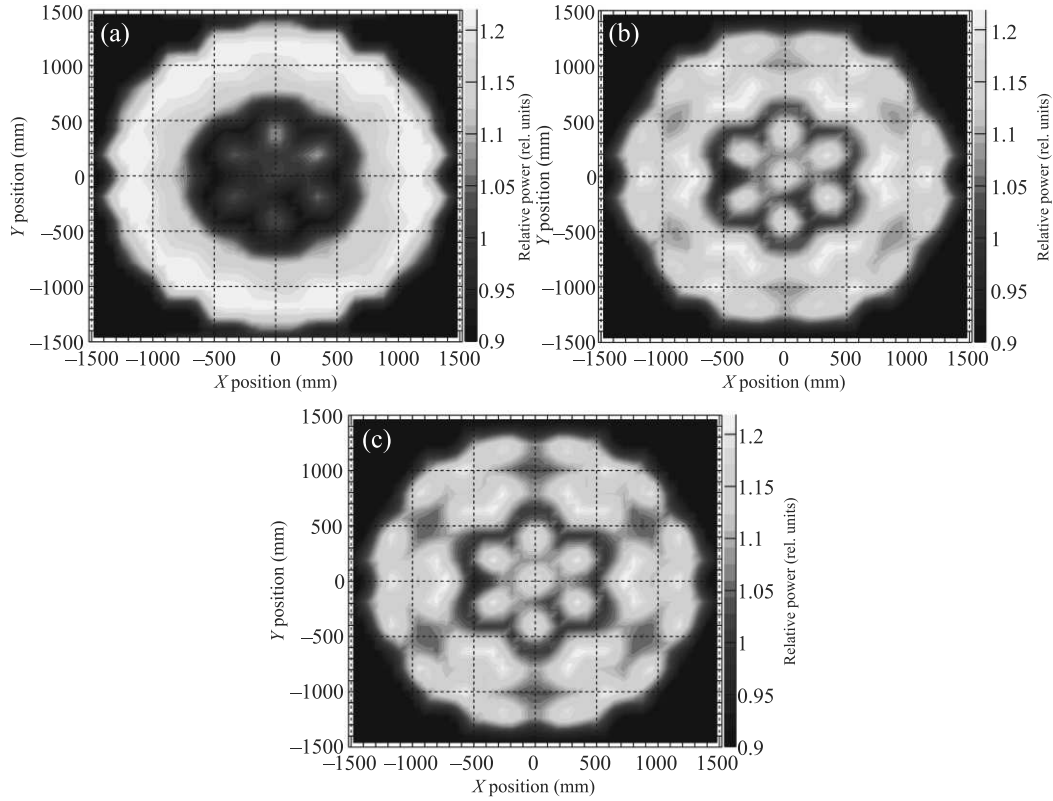


Рис. 1. (Цветной онлайн) Распределение усредненной по высоте активной зоны относительной мощности в зависимости от положения в горизонтальной плоскости XOY для: (a) – начала, (b) – середины и (c) – конца кампании

вектор от центра АЗ до k -го элемента АЗ, от которого вычисляется поток, $N_f(t, \mathbf{r}_k) = \frac{P_{th}(t, \mathbf{r}_k)}{E_f(t, \mathbf{r}_k)}$ – число делений в элементе АЗ, $P_{th}(t, \mathbf{r}_k)$ – тепловая мощность данного элемента, $E_f(t, \mathbf{r}_k) = \sum_i \alpha_i(t, \mathbf{r}_k) E_i$ – средняя тепловая энергия, выделяющаяся в данном элементе на одно деление, $S_f(t, \mathbf{r}_k, E_{\bar{\nu}_e}) = \sum_i \alpha_i(t, \mathbf{r}_k) S_i(E)$ – спектр антинейтрино, приходящийся на одно деление для данного элемента АЗ. $E_f(t, \mathbf{r}_k)$ и $S_f(t, \mathbf{r}_k)$ представляют собой средневзвешенное, соответственно, энергий деления E_i и кумулятивных спектров антинейтрино S_i для четырех основных делящихся изотопов $i = (^{235}\text{U}, ^{238}\text{U}, ^{239}\text{Pu}, ^{241}\text{Pu})$, взвешенных с соответствующими им долями деления α_i . Ниже будут представлены детальные расчеты потока антинейтрино от каждого элемента АЗ по данной формуле на примере данных за одну полную топливную кампанию 3-го энергоблока Калининской АЭС (28.05.2021 – 08.10.2022). Реакторная установка 3-го энергоблока относится к серии ВВЭР-1000.

Результаты детального расчета сравнивались с результатами расчетов по двум упрощенным моделям: точечная модель АЗ со статичным центром,

равным геометрическому (СЦ), и точечная АЗ, динамически меняющая положение своего центра относительно геометрического центра в ходе кампании из-за изменения распределения энерговыделения (ДЦ). Параметры для этих моделей рассчитываются на основании детального расчета, и, тем самым, отличия этих моделей носят чисто геометрический характер. Ниже, как в детальном, так и упрощенных расчетах будут использованы одинаковые значения E_i , взятые из [6], и S_i из [7], так что для всех приведенных сравнений результаты будут безразличны к их конкретным значениям. Также для большей общности все зависимости от времени были приведены в эффективных сутках для того, чтобы убрать явную зависимость потока антинейтрино от периодических изменений мощности реактора. Эффективные сутки (эфф. сут.) – это единица измерения длительности работы реактора в сутках в пересчете на работу на номинальной мощности, которая для ВВЭР-1000 составляет 3000 МВт. Длительность кампании реактора составила ≈ 510 эфф. сут. За начало кампании были приняты первые 10 эфф. сут., за середину – 250–260 эфф. сут. и за конец – последние 10 эфф. сут.

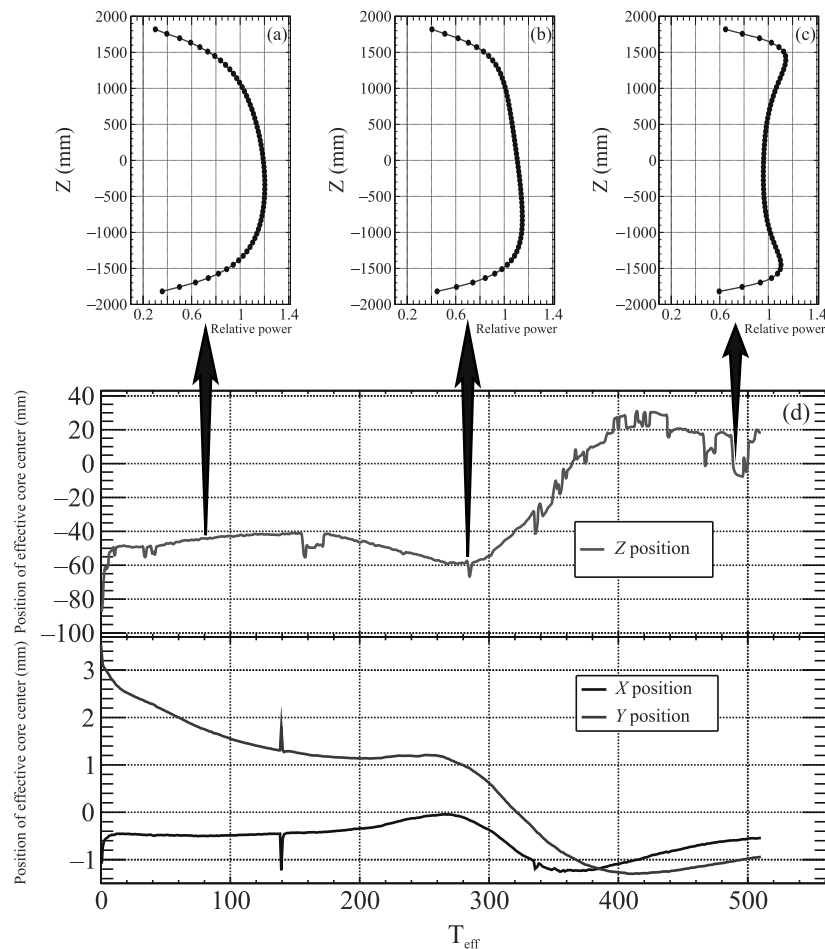


Рис. 2. (Цветной онлайн) Усредненные по горизонтальной плоскости профили энерговыделения для начала (а), середины (b) и конца (с) кампании; (d) – изменение положения эффективного центра АЗ относительно ее геометрического центра по осям Z (красная кривая), X (черная) и Y (синяя) в зависимости от эфф. сут.

3. Учет распределения выделяемой мощности по объему реактора. Одной из особенностей реактора ВВЭР-1000 является значительное изменение распределения мощности по объему АЗ в ходе топливной кампании. Для учета этого изменения при вычислении потока антинейтрино были проведены имитационные нейтронно-физические расчеты топливной кампании по программе БИПР-7А для фактически измеренной полной мощности реактора в течение кампании. Погрешность измерения полной тепловой мощности определена проектом реакторной установки ВВЭР-1000 и не превышает 2%. Программа БИПР-7А предназначена для проектных и эксплуатационных расчетов ВВЭР-1000 и позволяет имитировать состояния активной зоны в процессе выгорания топлива, проводить трехмерные расчеты полей глубин выгорания топлива, энерговыделения и потоков нейтронов. На рисунке 1 показано полученное распределение усредненной по высоте АЗ отно-

сительной мощности, приходящейся на один элемент АЗ, в зависимости от положения в горизонтальной плоскости XOY для начала (а), середины (b) и конца (с) кампании. Значения даны относительно средней мощности, приходящейся на один элемент АЗ, $\langle p \rangle = \frac{P_{th}}{N}$, где P_{th} – полная тепловая мощность реактора, а N – количество элементов АЗ. Видно, что на протяжении кампании распределение сильно неоднородно, причем в начале кампании более удаленные от центра кассеты давали, в среднем, на 20 % большую мощность. Отклонение расчетной и измеренной мощности отдельных ТВС имеет нормальный характер, среднеквадратичное отклонение расчетных значений для всех ТВС по данным внутриреакторного контроля составляет $\sim 2.8\%$.

Знание того, как распределено энерговыделение по объему АЗ, позволяет рассчитать изменение положения эффективного центра энерговыделения в те-

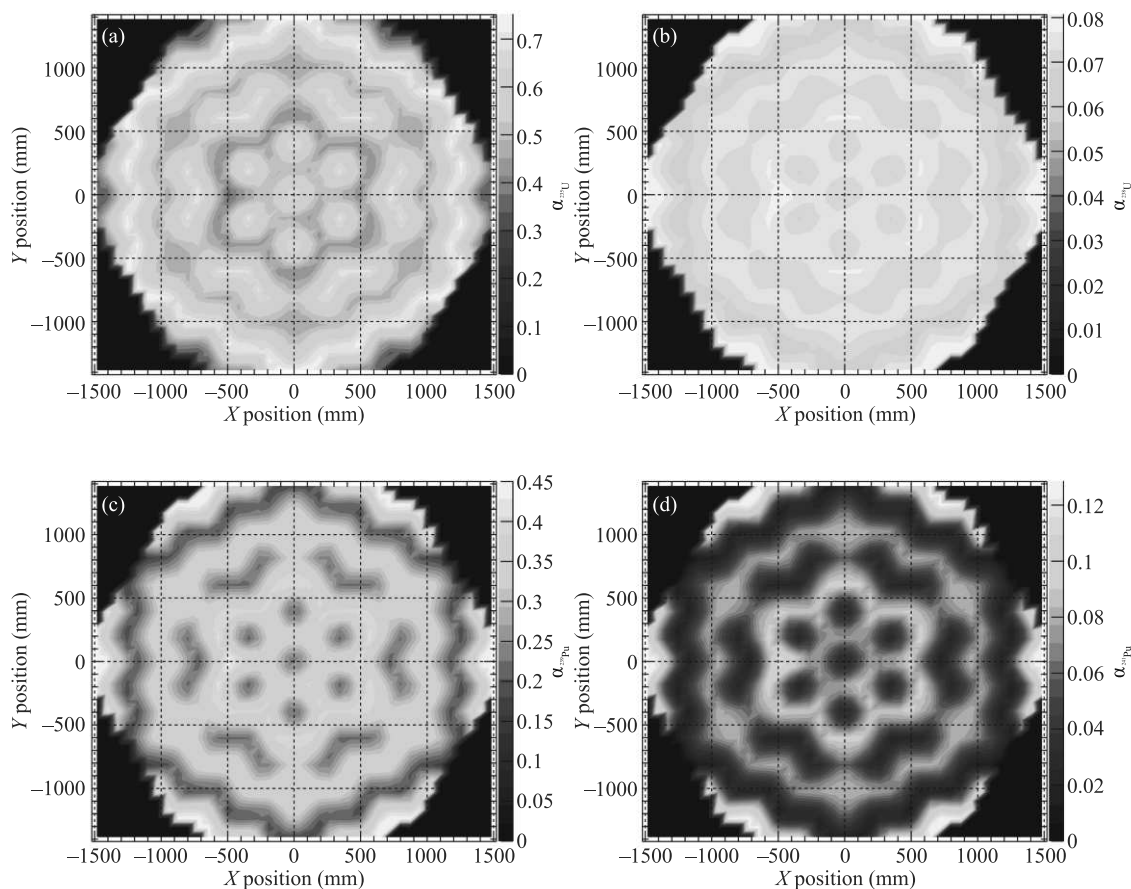


Рис. 3. (Цветной онлайн) Распределение усредненных за кампанию долей деления по объему АЗ для четырех основных изотопов: (а) – ^{235}U , (б) – ^{238}U , (с) – ^{239}Pu , (д) – ^{241}Pu

чение кампании. Радиус-вектор от геометрического центра АЗ до эффективного центра энерговыделения можно вычислить как $\mathbf{r}_{\text{eff}} = \sum_i \frac{p_i}{P_{th}} \mathbf{r}_i$, где p_i – мощность i -го элемента АЗ, $\mathbf{r}_i$ – расстояние до данного элемента, P_{th} – полная тепловая мощность реактора. На рисунке 2 представлено изменение координат эффективного центра АЗ относительно ее геометрического центра для начала (а), середины (б) и конца (с) кампании, а также изменение положения эффективного центра АЗ относительно геометрического центра (д) по осям Z (красная кривая), X (черная) и Y (синяя). Положение эффективного центра энерговыделения меняется в наибольшей степени по оси Z : в начале кампании эффективный центр расположен ниже геометрического на ~ 8 см, после ~ 300 эфф. сут. кампании начинает быстро подниматься, а после 400 эфф. сут. достигает максимального отличия в ~ 10 см от положения в начале. Такое изменение эффективного центра АЗ будет эффективно менять расстояние от него до точки, в которой вычисляется поток антинейтрино (1), качествен-

но меняя зависимость потока от времени в ходе кампании. По осям X и Y положение эффективного центра практически не меняется. Отметим, что такое изменение высотного профиля энерговыделения является универсальным для полугодовых топливных загрузок реактора ВВЭР-1000 и обусловлено особенностями выгорания топлива и выгорающего поглотителя нейтронов в АЗ.

4. Распределение долей деления по объему реактора. Программа БИПР-7А позволяет рассчитать объемное распределение мощности и глубины выгорания для всех 163 ТВС реактора ВВЭР-1000 в 60 слоях по высоте. Для перехода от энерговыделения и глубины выгорания к распределению долей деления использовались результаты расчетов по программе ТВС-М. Данная программа позволяет проводить расчеты изменения изотопного состава и долей деления (скоростей реакций деления) в процессе выгорания топлива, опираясь на точное описание геометрии и материального состава АЗ, в двумерном приближении (например, поперечное сечение ТВС). Зная зависимость долей деления от глубины

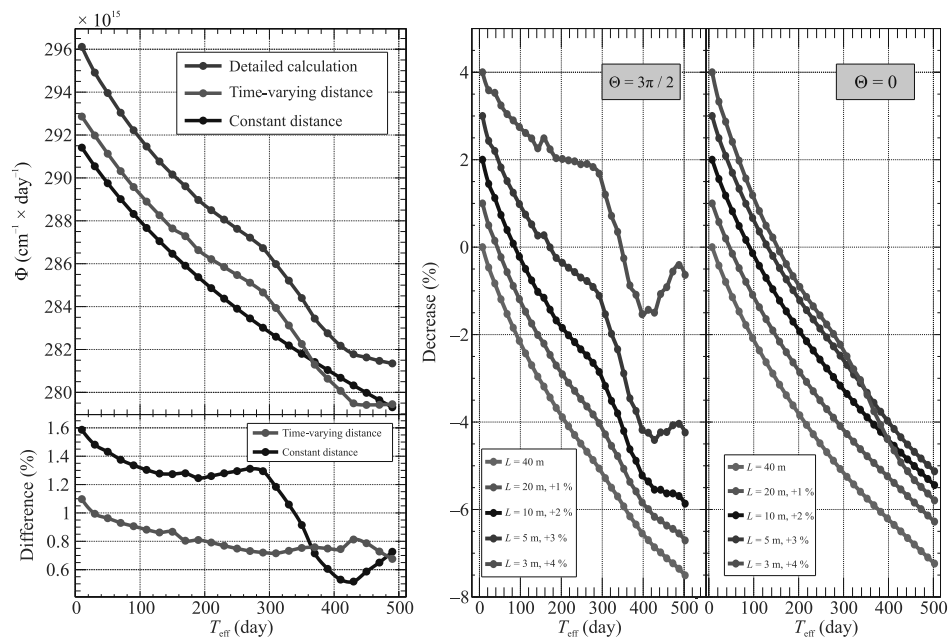


Рис. 4. (Цветной онлайн) Слева: поток антинейтрино в течение кампании на основе детального расчета (синий), модели ДЦ (красный) и СЦ (черный) – сверху, и отличие (в %) от детального расчета результатов по моделям ДЦ (красный) и СЦ (черный), для расстояния 20 м в направлении вниз от центра АЗ. Справа: изменение (%) потока антинейтрино в детальном расчете относительно начала кампании для направления вниз от центра АЗ ($\theta = 3\pi/2$) и вбок ($\theta = 0$), для различных расстояний от центра АЗ

выгорания топлива (из расчетов по программе ТВС-М) и распределение выгорания топлива и мощности по объему АЗ (из расчетов по программе БИПР-7А), определялось распределение долей деления по объему АЗ. Подобные расчеты были проделаны для каждого из трех отличающихся обогащением сортов топлива, загруженных в АЗ в начале кампании. Всего было загружено 163 ТВС, из которых 67 – свежих, 65 – на второй цикл эксплуатации и 31 – на третий цикл. Загрузка является типичной для ВВЭР-1000.

Из-за отличающегося изотопного состава и цикла эксплуатации, ТВС будут иметь разную зависимость долей деления от глубины выгорания. На рисунке 3 приведены усредненные за кампанию распределения по объему АЗ долей деления ^{235}U (а), ^{238}U (б), ^{239}Pu (с) и ^{241}Pu (д). Видно, что они распределены по АЗ весьма неоднородно, и, как следствие, это будет давать свой вклад в отличие детального расчета от упрощенных.

5. Анализ потока антинейтрино в детальной и упрощенных моделях АЗ. На рисунке 4 (слева) приведено сравнение результатов детального расчета потока антинейтрино в ходе кампании реактора с расчетами по упрощенным моделям СЦ и ДЦ для расстояния 20 м в направлении вниз от центра АЗ. На таком расстоянии размещен детектор

iDREAM [8] на 3-м энергоблоке Калининской АЭС. Как следует из рис. 4, на этом расстоянии детальный расчет дает на $\sim 1.5\%$ больший поток антинейтрино, чем модель СЦ, и на $\sim 1\%$ больший, чем модель ДЦ. Также стоит отметить возникновение “ступеньки” в районе 300 эфф. сут., которое вызвано началом поднятия в этот период кампании эффективного центра энерговыделения (см. также рис. 2d – красная кривая). На рисунке 4 (справа) показано, как меняется поток антинейтрино в детальном расчете относительно начала кампании для направления вниз от центра АЗ ($\theta = 3\pi/2$) и вбок ($\theta = 0$), для различных расстояний от центра АЗ. Графики для $L = 3$ м (серая кривая) и $L = 5$ м (синяя кривая) даны для иллюстрации, так как установка нейтринного детектора на таком расстоянии невозможна из-за особенностей конструкции реактора и биологической защиты. Видно, что по мере приближения к центру АЗ снизу ($\theta = 3\pi/2$), “ступенька” в области 300 эфф. сут. проявляется все сильнее и для небольших расстояний под реактором могла бы быть измерима. В целом, данное следствие говорит о том, что только по одному изменению потока антинейтрино можно определить изменение распределения энерговыделения внутри АЗ, а также момент начала подъема эффективного центра АЗ.

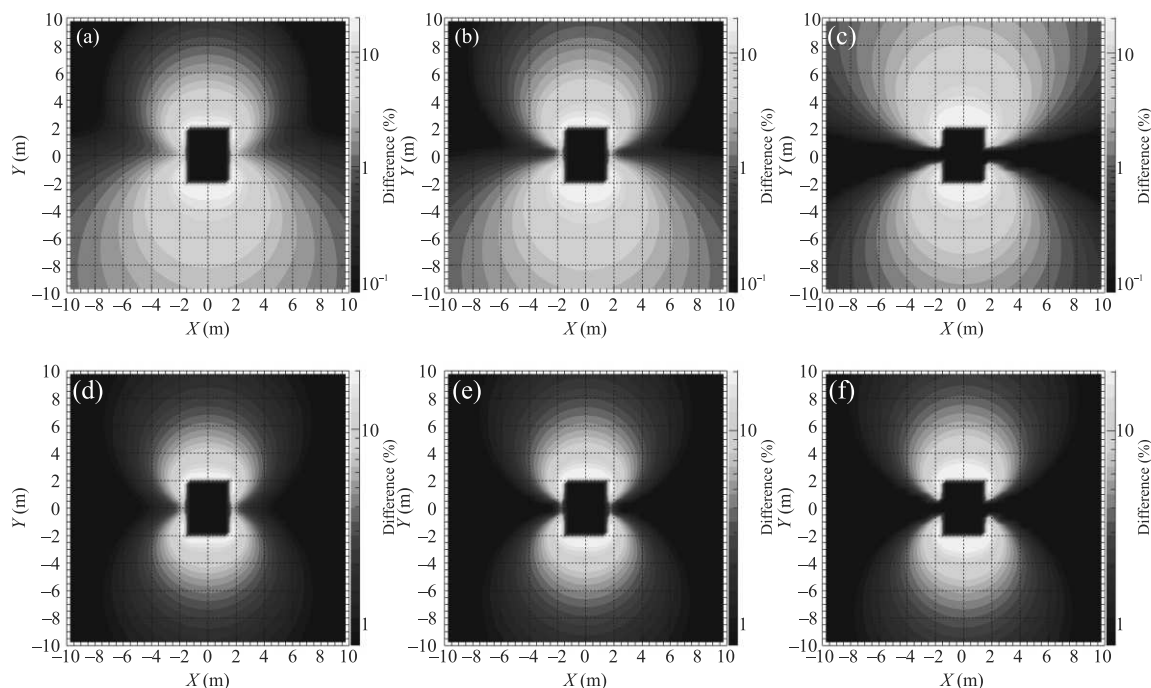


Рис. 5. (Цветной онлайн) Разность между детальным расчетом и упрощенной моделью СЦ (ДЦ) в зависимости от координаты в вертикальной плоскости XOZ для: а (d) – начала, (b), (e) – середины и (c), (f) – конца кампании

Для полноты картины приведем также двухмерный график зависимости от координаты в вертикальной плоскости XOZ разности между детальным и упрощенными расчетами, который представлен на рис. 5. Верхний ряд представляет собой разность между детальным расчетом и упрощенной моделью СЦ, в которой нет никакой анизотропии, в зависимости от угла, под которым наблюдается АЗ, и по сути выражает собой эту анизотропию. Видно, что в детальном расчете появляется явная анизотропия излучения между направлениями вбок или вверх и вниз, причем разница пропорционально увеличивается по мере приближения к АЗ. На рисунке 6 более

Таблица 1. Отношения потоков антинейтрино на 10 и 12 м, рассчитанные различными способами

Способ расчета	Начало	Середина	Конец
СЦ	0.6944	0.6944	0.6944
ДЦ	0.6930	0.6931	0.6947
Детальный расчет	0.6897	0.6893	0.6900

детально показана зависимость разности между детальным расчетом потока антинейтрино и расчетом по модели СЦ, для различных направлений на центр АЗ. Видно, что для расстояний порядка 10 м в направлении вниз от центра АЗ (рис. 6 красная кривая) она будет составлять уже $\sim 3\%$.

Необходимо отметить, что появление неоднородности повлияет и на отношение спектров антинейтрино, измеряемых на различных расстояниях от АЗ. Для изучения осцилляций антинейтрино в стерильное состояние ряд детекторов измеряет спектры антинейтрино на различных, достаточно малых расстояниях, и ищут проявление осцилляций в изменении отношения данных спектров (см., например, [9]). Для примера, в табл. 1 приведены значения отношений для начала, середины и конца топливной кампании для расстояний 10 и 12 м в направлении вниз от центра АЗ. Данное отношение без учета осцилляций нейтрино не будет зависеть от энергии антинейтрино, однако будет меняться со временем в ходе кампании. Для данных расстояний детальный расчет будет давать, в зависимости от этапа кампании, на $0.63\text{--}0.73\%$ ($0.48\text{--}0.68\%$) меньшее отношение спектров в сравнении с расчетом по модели СЦ (ДЦ). На рисунке 7 показано, как данное отношение будет отличаться от расчетов по моделям СЦ и ДЦ, в зависимости от ближнего (L_{near}) и дальнего (L_{far}) расстояний от нейтринного детектора до реактора. Видно, что при уменьшении ближнего и увеличении дальнего расстояний разница в отношении возрастает и достигает нескольких процентов, что должно влиять на измерения параметров осцилляций антинейтрино в стерильное состояние.

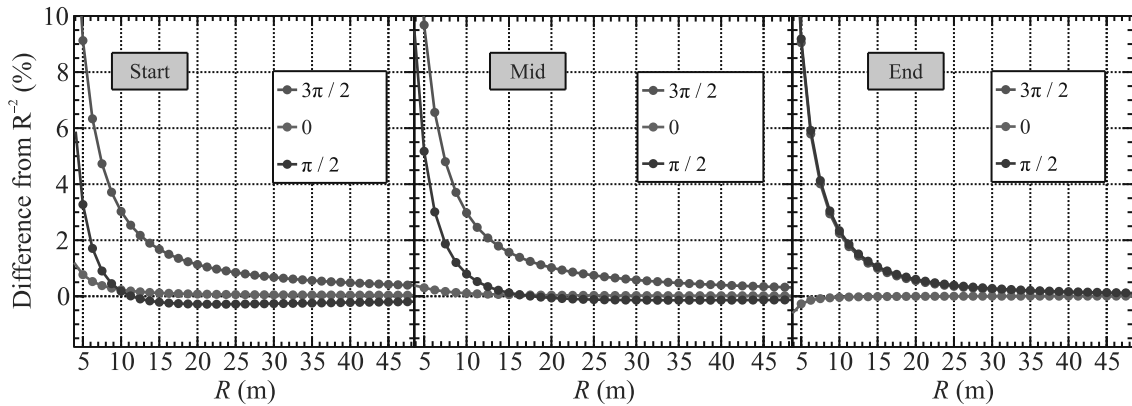


Рис. 6. (Цветной онлайн) Разность между детальным расчетом потока антинейтрино и расчетом по модели СЦ для направлений вниз ($\theta = 3\pi/2$), вбок ($\theta = 0$) и вверх ($\theta = \pi/2$) относительно центра АЗ, в зависимости от расстояния до центра АЗ, для начала (слева), середины (в центре) и конца (справа) кампании

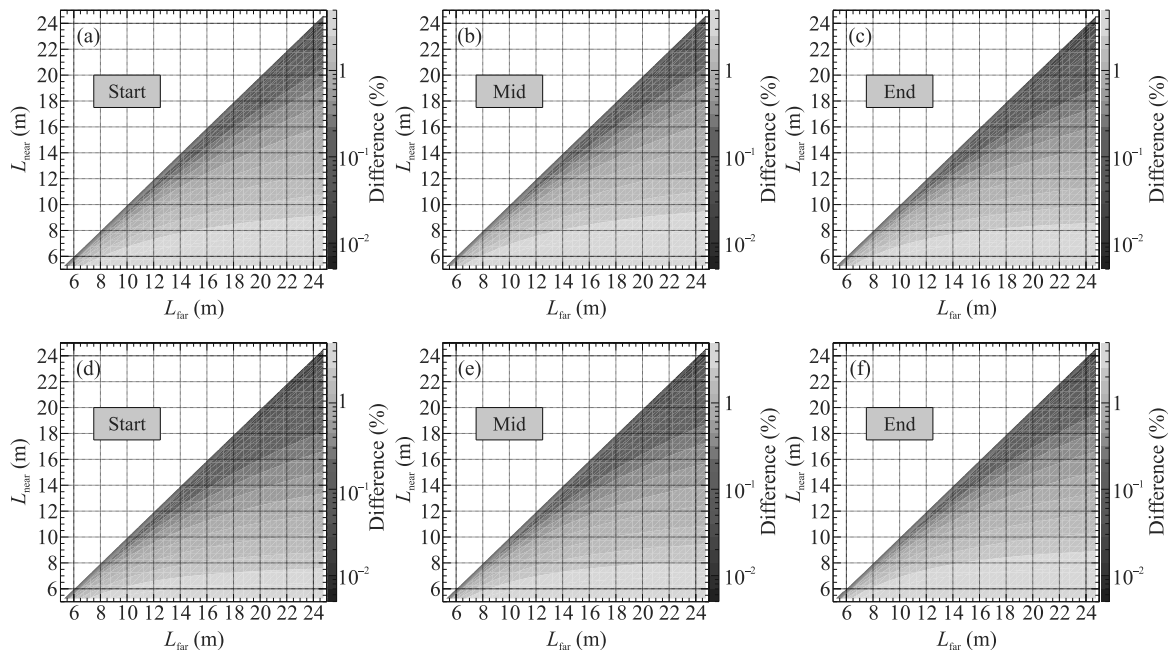


Рис. 7. (Цветной онлайн) Разница в отношении спектров между детальным расчетом и упрощенной моделью СЦ (ДЦ) в зависимости от ближнего (L_{near}) и дальнего (L_{far}) расстояния от детектора до реактора, для направления вниз от центра АЗ, для: (a), (d) – начала, (b), (e) – середины и (c), (f) – конца кампании

6. Заключение. Проведен расчет потока антинейтрино для топливной кампании 3-го энергоблока Калининской АЭС с учетом детальной геометрии АЗ и меняющихся в ходе кампании распределений энерговыделения и долей деления. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для небольших расстояний от реактора, сравнимых с размерами АЗ, поток антинейтрино зависит от направления на АЗ. В частности, наибольшее отличие между детальным расчетом и расчетом по упрощенным моделям достигается в направлении вниз от центра АЗ. При измере-

нии отношения спектров антинейтрино, регистрируемых нейтринным детектором на двух отличающихся расстояниях, должна появляться поправка, которая может повлиять на измеряемые параметры осцилляций антинейтрино в стерильное состояние.

7. Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект # 22-12-00219). Анализ данных проведен с использованием вычислительных ресурсов Объединенного вычислительного кластера НИЦ “Курчатовский институт”.

8. Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, описанную в данной статье.

-
1. M. Danilov, PoS **ICHEP2022**, 616 (2022).
 2. Z. Atif, J.H. Choi, and B.Y. Han et al. (RENO and NEOS Collaborations), Phys. Rev. D **105**, L111101 (2022).
 3. M. Andriamirado, A.B. Balantekin, and H.R. Band et al. (PROSPECT Collaboration), Phys. Rev. D **103**, 032001 (2021).
 4. H. Almazán, L. Bernard, and A. Blanchet et al. (STEREO Collaboration), Nature **613**(7943), 257 (2023).
 5. A. Serebrov, R. Samoilov, and V. Ivochkin et al. (Neutrino-4 Collaboration), Phys. Rev. D **104**(3), 032003 (2021).
 6. V. Kopeikin, L. Mikaelyan, and V. Sinev, Phys. Atom. Nucl. **67**, 1892 (2004).
 7. V. Kopeikin, M. Skorokhvatov, and O. Titov, Phys. Rev. D **104**(7), L071301 (2021).
 8. A. Abramov, A. Chepurnov, and A. Etenko et al. (iDREAM Collaboration), JINST **17**(09), P09001 (2022).
 9. I. Alekseev, V. Belov, and V. Brudanin et al. (DANSS Collaboration), JINST **11**(11), P11011 (2016).