

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

**ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ПОТОК АНТИНЕЙТРИНО ОТ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ
НЕЙТРОНАХ БН-800**

Студент

В. А. Вакуленко

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

Е. А. Литвинович

Москва 2024

1. Введение.

Реакторы на быстрых нейтронах (БН) имеют уникальные особенности, делающие их более эффективными и безопасными по сравнению с традиционными реакторами на тепловых нейтронах. Одно из главных преимуществ БН — возможность работы в замкнутом топливном цикле, что позволяет перерабатывать отработавшее топливо и минимизировать накопление радиоактивных отходов.

Для измерения мощности в БН применяются разнообразные методы, включая нейтронный мониторинг, анализ температуры теплоносителя, измерение расхода и температуры теплоносителя, а также использование гамма-излучения и изотопного анализа. Эти подходы обеспечивают точность оценки мощности на уровне 2 – 10% в зависимости от особенностей конструкции реактора и методов измерения.

Альтернативным методом измерения мощности, рассматриваемым для реакторов на быстрых нейтронах, может являться измерение потока антинейтрино. Этот метод показал свою эффективность для других типов реакторов как исследовательских, так и коммерческих типа ВВЭР, и вполне может применяться так же для других перспективных типов реакторов, таких как реакторы на быстрых нейтронах. Однако принципы работы реакторов БН и ВВЭР различаются: ВВЭР работают на тепловых нейтронах, замедляемых водой, выполняющей функции замедлителя и теплоносителя, тогда как БН используют быстрые нейтроны и жидкий натрий в качестве теплоносителя.

Следовательно реакторы типа БН обладают более жестким спектром нейтронов, относительно ВВЭР, что обуславливает большее число захватов нейтронов на ^{238}U для БН.

Кроме того, топливный цикл ВВЭР основан на урановом топливе с низким обогащением ($\sim 3 - 5\% \text{ } ^{235}\text{U}$), а БН используют еще и смешанное оксидное топливо (МОКС).

Вследствие различий в загрузке топлива, количества захвата нейтронов для реакторов типов БН и ВВЭР интересно рассмотреть влияние этих параметров на поток антинейтрино. Ниже представлен его расчёт для реактора типа БН.

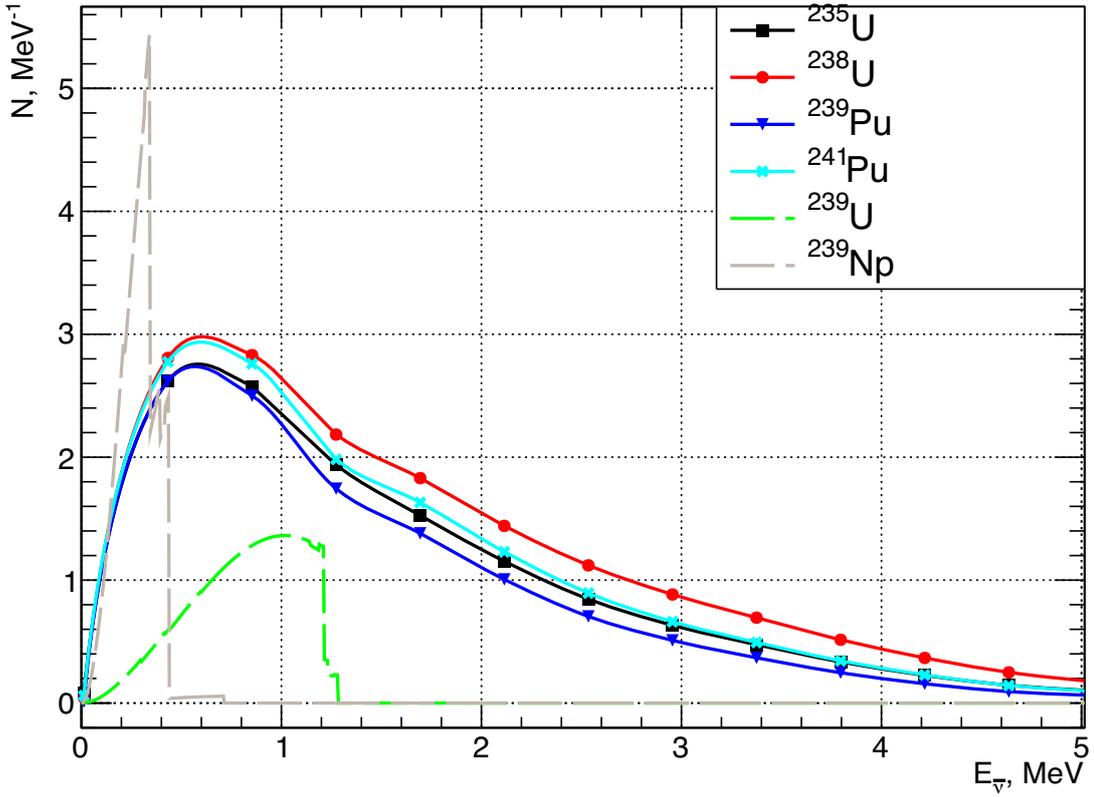


Рисунок 1 — Спектры антинейтрино от делящихся изотопов для модели Fallot и спектры бета-распадов от ^{239}U и ^{239}Np

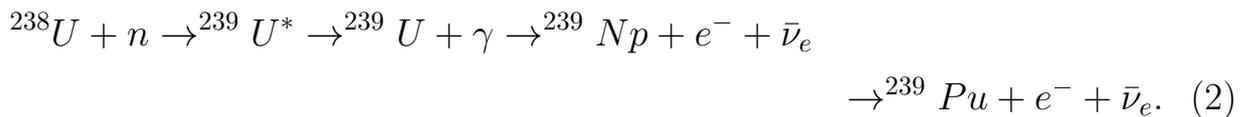
2. Методика расчёта потока антинейтрино от реактора. Расчёт потока был произведён по аналогии с [1]. В общем виде поток антинейтрино Φ от реактора можно рассчитать по формуле:

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

где сумма по k берётся 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-вектор от центра АЗ до k -го элемента АЗ, от которого вычисляется поток, $N_f(t, \mathbf{r}_k) = \frac{P_{\text{th}}(t, \mathbf{r}_k)}{E_f(t, \mathbf{r}_k)}$ — число делений в элементе АЗ, $P_{\text{th}}(t, \mathbf{r}_k)$ — 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 четырёх 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 показаны результаты расчёта потока антинейтрино основанные на симуляции первой кампании 4 энергоблока Белоярской АЭС, реакторная установка которого относится к серии БН-800. В этой кампании зона была загружена смешанным топливом, загрузка состояла примерно на $\sim 16\%$ из МОКС топлива, остальная часть была загружена урановым топливом с обогащением 18.5-24% в зависимости от зоны АЗ(18,5% -центральная часть ,21% - средняя часть, 24% -периферийная часть). В дальнейших расчётах были использованы значения E_i , взятые из [2], и S_i из [3]. В качестве спектров для делящихся изотопов использовать расчётную модель, так как конверсионные модели позволяют получить спектры только с больших порогов. Так же важной особенностью таких реакторов является большее число захватов нейтронов на ^{238}U , обусловленных более жестким спектром нейтронов, относительно ВВЭР. После такого захвата образуется ^{239}U который распадается по следующей цепочке



Изотоп урана ^{239}U имеет период полураспада 23.45 минуты, и соответственно распадается практически сразу, ^{239}Np имеет больший период полураспада 2.33 дня. Равновесие в радиоактивных цепочках определяется наибольшим периодом полураспада, а потому именно ^{239}Np оказывает значительное влияние на изменение потока антинейтрино, на протяжении примерно ≈ 7 дней (три периода полураспада ^{239}Np от начала кампании). Эти распады приводят к появлению двух дополнительных бета-распадов, а следовательно, и двух дополнительных антинейтрино в общем потоке.

Спектры для бета-распадов ^{239}U и ^{239}Np , представленные на рисунке [1] были рассчитаны, используя функцию Ферми с учетом поправок на конечный размер ядра, экранирование ядра электронами с оболочек, а так-

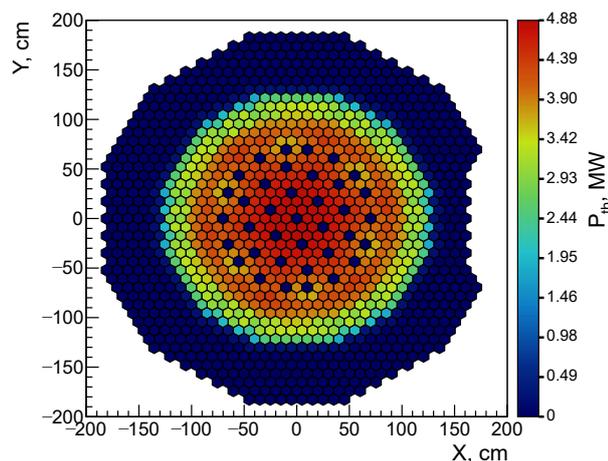


Рисунок 2 — Распределение мощности по плоскости XOY для БН-800

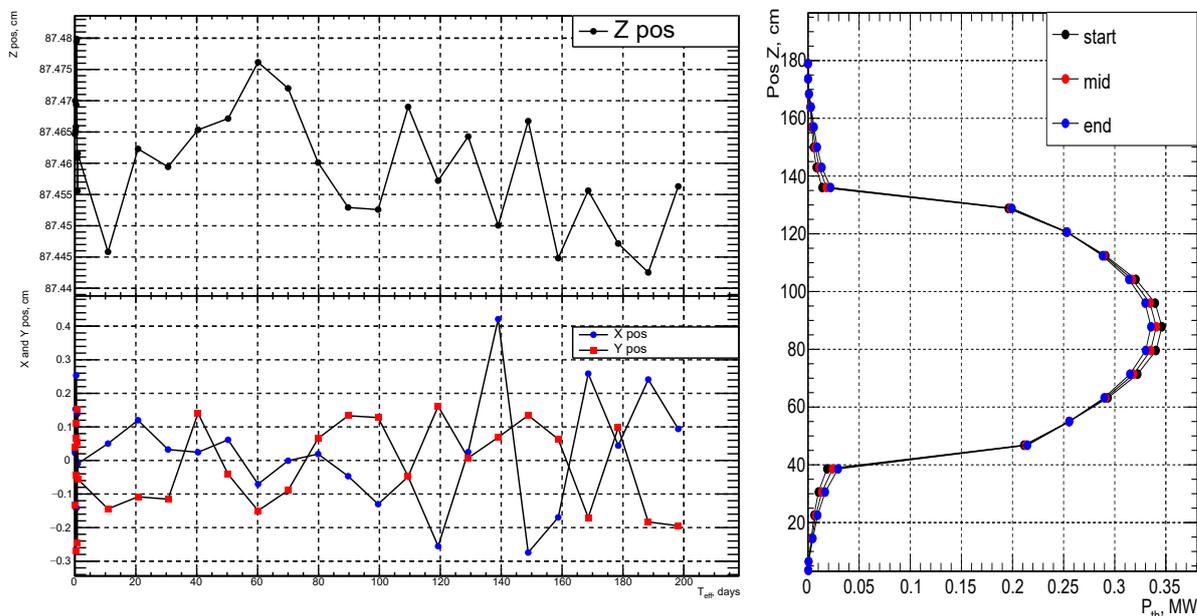


Рисунок 3 — Положение центра энерговыделения для модели БН-800 (слева) и профили энерговыделения по высоте (справа)

же радиационные поправки КЭД, связанные с испусканием виртуальных и реальных фотонов заряженными частицами. На этом рисунке также представлены спектры от делящихся изотопов для модели Fallot [3].

Кроме того, для большей общности, все зависимости от времени были приведены в эффективных сутках, 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 БН-800 составляет 2100 МВт. Длительность кампании реактора

составила ≈ 198 эфф. сут.

3. Симуляция кампании реактора.

Для расчета потока антинейтрино от активной зоны реактора БН-800 был использован программный комплекс КИР. Комплекс КИР (версия С) разработан для моделирования стационарных и нестационарных нейтронно-физических процессов с использованием метода Монте-Карло в системах с трёхмерной геометрией, как в однородных, так и неоднородных средах. Нестационарные процессы рассчитываются с помощью приближенных методов и прямого метода Монте-Карло с учетом запаздывающих нейтронов, что позволяет проводить высокоточные расчеты нейтронной кинетики без необходимости дискретизации по времени, энергии и пространству. История каждого нейтрона моделируется на основе файлов оцененных ядерных данных из международных библиотек.

Программный комплекс КИР-С включает модуль нуклидной кинетики для моделирования процесса «выгорания» топлива. Первоначально модуль был разработан для программного комплекса UNK, однако впоследствии он был модифицирован, распараллелен и адаптирован для КИР-С. Библиотека модуля содержит данные по выходам продуктов деления, периодам полураспада нестабильных нуклидов, а также каналам переходов при распаде или нейтронном взаимодействии. Эта библиотека позволяет рассчитывать источники энерговыделения за счет распада нестабильных нуклидов и спектры гамма-квантов, возникающих при их распаде. Погрешности энерговыделение получаемые данной программой составляют $\leq 1\%$.

Условная модель реактора БН-800 (1233 гомогенизированные ТВС), идея создания которой была заимствована из работ [4] [5], представлена на рисунке 2. В процессе моделирования «выгорания» реактора за 198.16 суток (30 шагов) была установлена постоянная мощность 2100 МВт. Причём первые сутки моделировались 10-ю шагами по 0.1 сутки на шаг, а остальные 197.16 суток – 20-ю, т.е. по 9.858 суток на шаг.

По итогу, данной симуляцией были получены зависимости скоростей реакций для основных делящихся изотопов и для захватов нейтронов на ^{238}U . Результаты симуляции показаны на рисунках [2]-7. На рисунке 2 представлено распределение средней мощности в плоскости XOY. В приложении показаны изменения этой мощности в процессе работы реактора, а

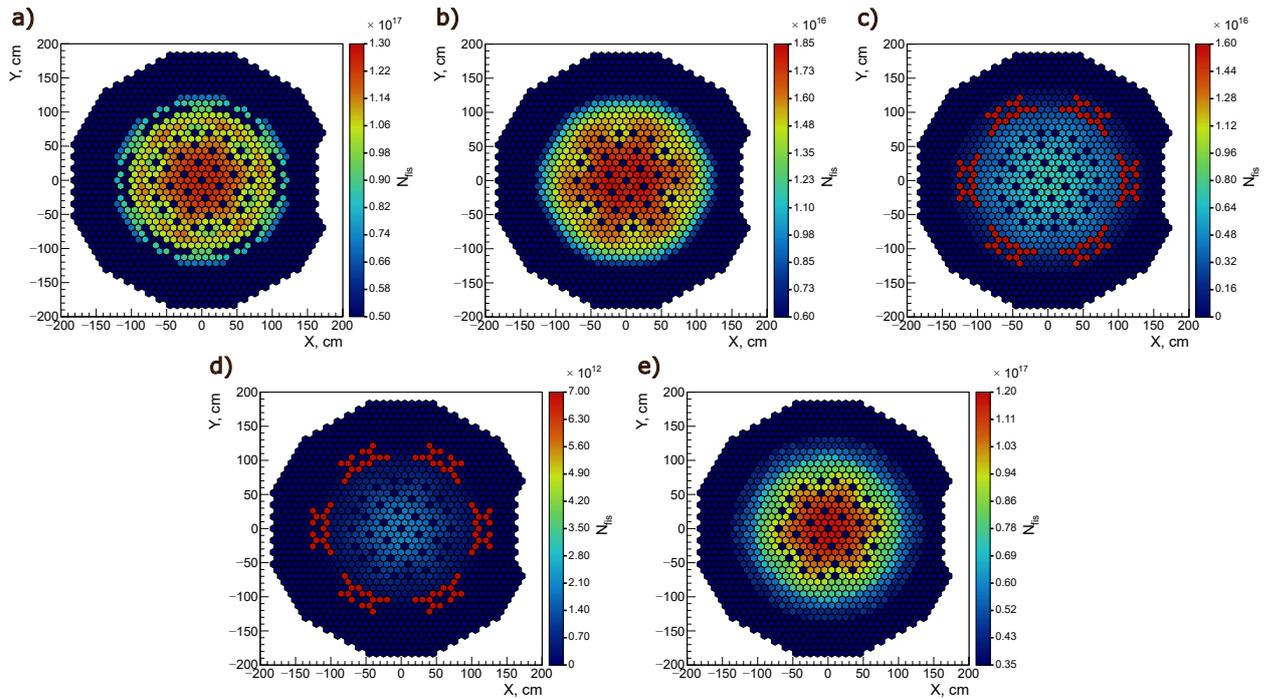


Рисунок 4 — Распределение количества делений по плоскости XOY для а) — ^{235}U , б) — ^{238}U , в) — ^{239}Pu , д) — ^{241}Pu и е) — (n, γ)

также отдельно разница между значениями мощности в начале и конце кампании. При этом распределение энерговыделения в АЗ имеет достаточно симметричный вид, не изменяющийся со временем. На рисунке [3] изображено положение центра энерговыделения для модели БН-800 (слева) и профили энерговыделения по высоте (справа). Для ВВЭР (см. рис. 2 в работе [1]) наоборот наблюдается заметная зависимость от времени. На нем видно изменение положения эффективного центра АЗ для ВВЭР-1000, а именно увеличение координаты Z. Такое изменение эффективного центра АЗ будет менять расстояние от него до точки, в которой вычисляется поток антинейтрино, меняя зависимость потока от времени в ходе кампании. По осям X и Y положение эффективного центра практически не меняется. Для нашей симуляции таких изменений распределения энерговыделения не наблюдается. На рисунке 4 представлены распределения делений для основных изотопов и захватов нейтронов на ^{239}U .

Как видно из данных распределений, деления изотопов происходят весьма неоднородно для смешанной загрузки топлива. Их динамика в ходе кампании показана в приложении. При этом количество делений и количество захватов нейтронов на ^{239}U примерно одинаковы. На рисунке [5] представлена зависимость долей деления от времени для делящихся изото-

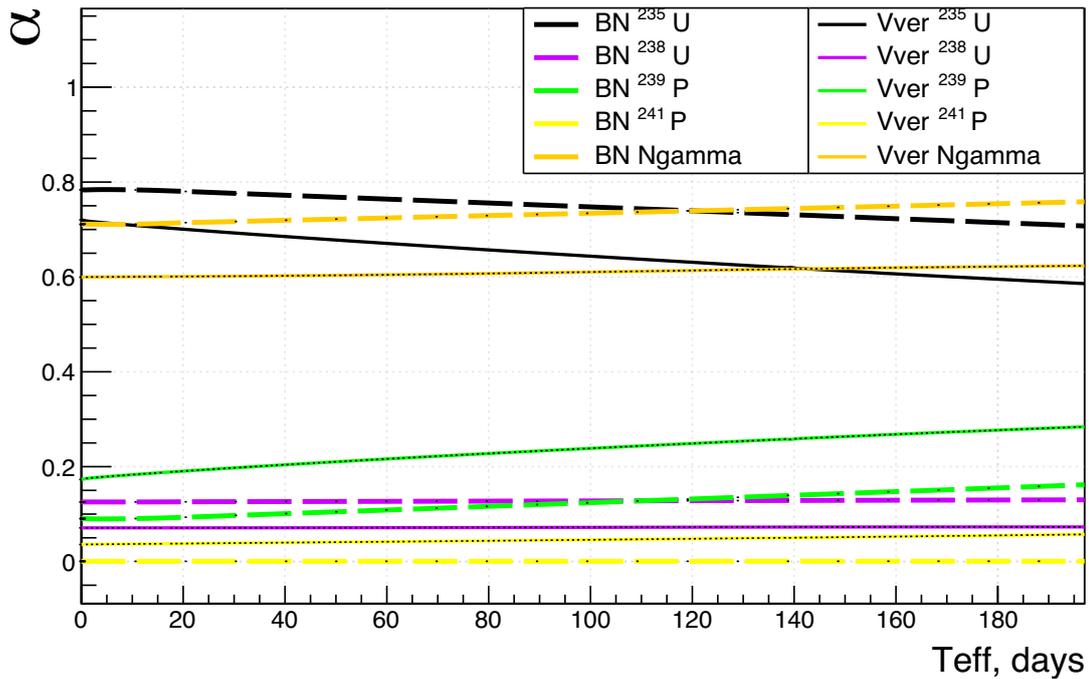


Рисунок 5 — Зависимость долей деления от времени

пов, а также отнормированное на полное число делений количество захватов нейтронов. Из данного графика видно, что количество таких захватов сравнимо с количеством делений ^{235}U , но в отличие от него количество захватов растёт в ходе кампании, поскольку оно пропорционально потоку нейтронов, который растёт в ходе кампании.

4. Анализ потока антинейтрино от БН. Результат расчёта по формуле [1](#) для полученных распределений деления основных изотопов и захватов нейтронов на ^{239}U представлены на рисунке 6. На нём показан поток антинейтрино за одни сутки в плоскостях XOY и XOZ для середины кампании, а также зависимость потока антинейтрино, нормированного на отношение мощностей, от эффективного времени для разных порогов (0 и 1.806 МэВ). Из-за отсутствия сильных асимметрий в распределениях энерговыделения относительно центра АЗ поток антинейтрино для нашей модели от такого типа реакторов получился достаточно однородным относительно угла, под которым наблюдается АЗ.

Спектр потока антинейтрино для середины кампании показан на рисунке ???. Наличие захватов нейтронов на ^{239}U даёт два дополнительных бета-распада, которые формируют пики при энергиях 0.5 и 1 МэВ. Кроме того, на рисунке 7 показаны спектры для начала и конца кампании с

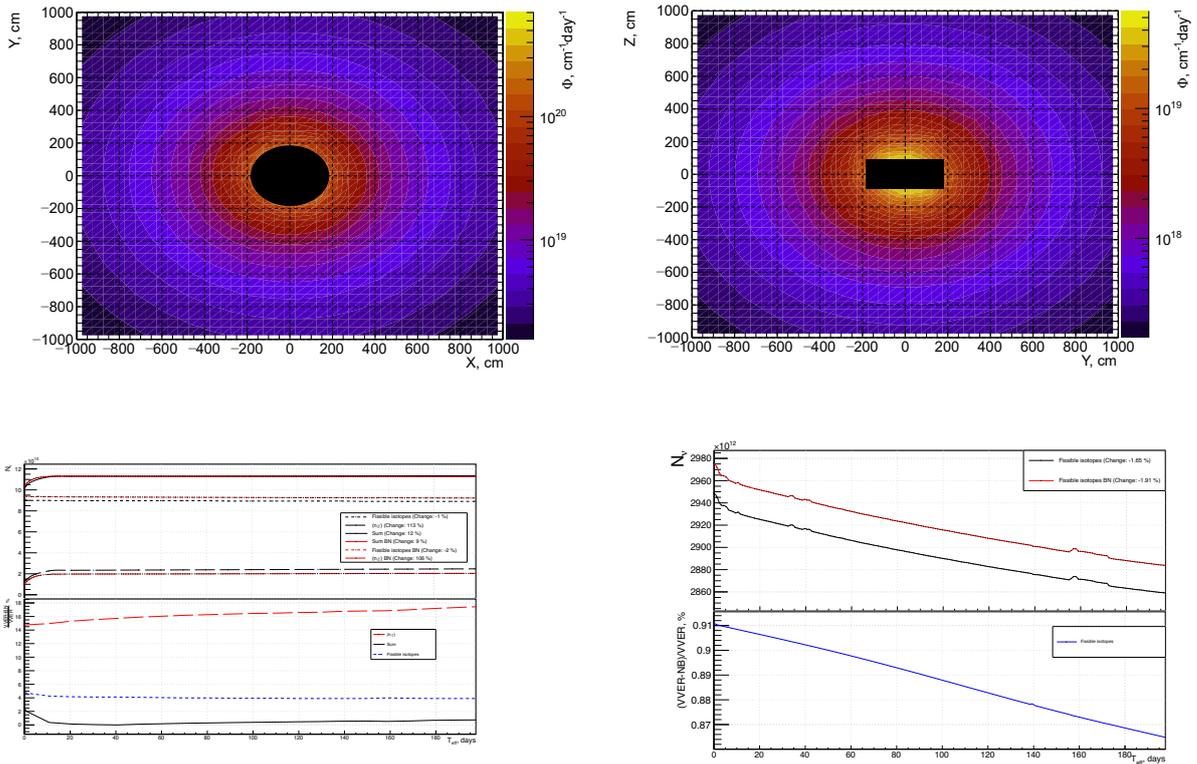


Рисунок 6 — Зависимость потока антинейтрино от координат в плоскостях XOY и XOZ для середины кампании (сверху) и зависимость потока антинейтрино от эффективного времени без порога (снизу слева) и с порогом обратного бета распада (снизу справа)

различными пороговыми значениями (0 и 1,806 МэВ), нормированные на отношение мощностей, для обоих типов реакторов.

Так как число реакций захвата с последующими двумя бета-распадами в реакторах типа ВВЭР ниже, чем в реакторах типа БН, на соответствующих графиках наблюдаются различия. Распад ^{239}Np имеет период полураспада ≈ 2.33 дня, из-за чего поток в начале нарастает постепенно в течении первых ≈ 7 суток за которые его рождение приходит в равновесие с распадом. При этом если рассматривать наименьший порог для антинейтрино, то увеличение потока за счёт захватов нейтронов будет сильнее чем уменьшение потока от изменения изотопного состава.

В мягкой области наблюдаются наибольшие различия в спектрах. С большего же порога изменение спектра будет примерно таким же как и для ВВЭР, так как в рассматриваемой загрузке было всего $\approx 16\%$ ТВС с МОКС топливом, что дало количество делений изотопов в БН схожее с ВВЭР.

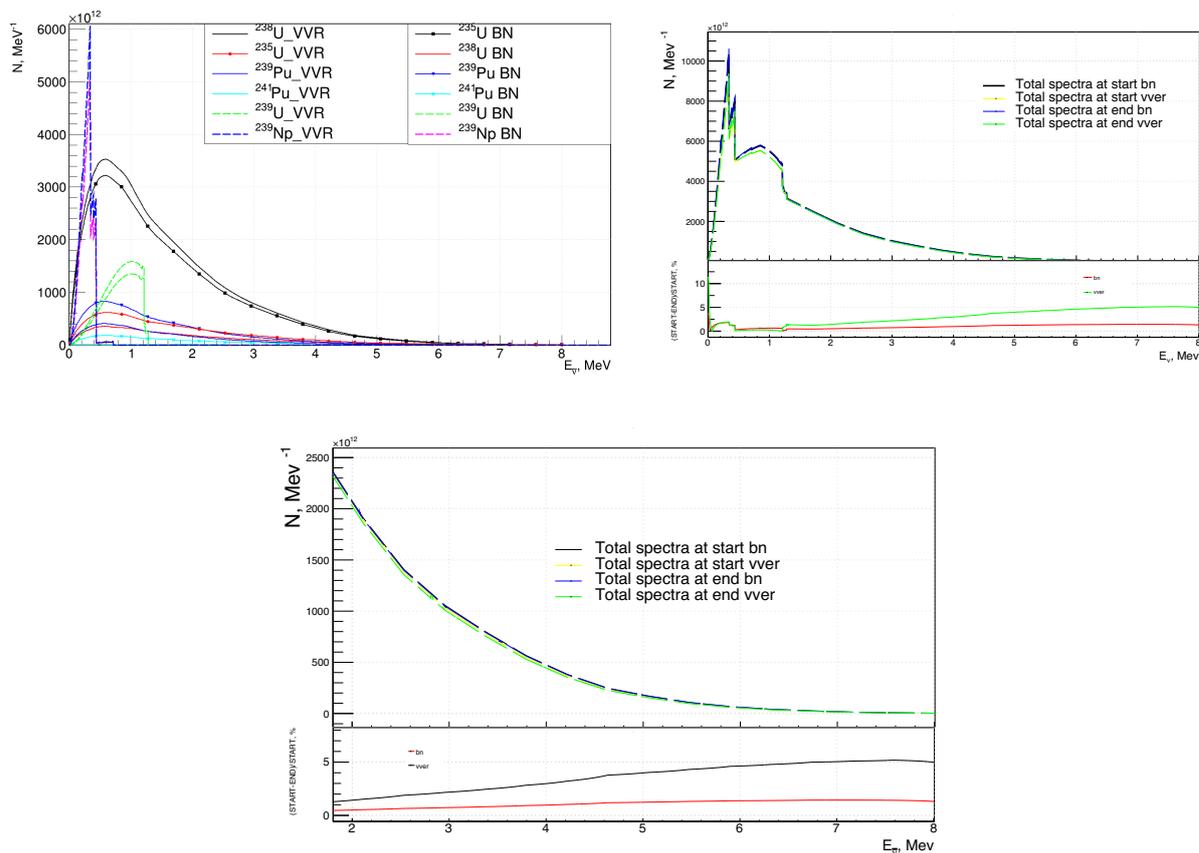


Рисунок 7 — Спектр антинейтрино для середины кампании с его изотопным составом(слева), полный спектр в начале и конце кампании(справа) и полный спектр в начале и конце кампании с порога обратного бета распада(снизу)

5. Заключение. В данной работе была произведена симуляция кампании реактора на быстрых нейтронах со смешанной загрузкой топлива. Для нее были получены распределения скоростей реакций по объёму АЗ, с помощью которых были рассчитаны спектр и поток антинейтрино. Поскольку число захватов нейтронов на ^{239}U для реакторов типа БН больше, чем для ВВЭР, наблюдается заметное отличие в спектрах антинейтрино от реакторов обоих типов. Это приводит и к отличию в изменении потока антинейтрино: из-за захватов он увеличивается в ходе кампании. Однако с большего порога бета распада, где преобладают антинейтрино от делящихся изотопов, спектры и потоки реакторов типа БН и ВВЭР имеют аналогичный характер, так как в симуляции использовалась смешанная загрузка в основном состоящая из уранового топлива. Схожий характер изменения спектров БН и ВВЭР при энергиях, больших энергии обратного бета распада, дает нам право рассматривать реакторы типа БН применимыми для

решения ряда задач, характерных для реакторов типа ВВЭР.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] I. N. Zhutikov, E. A. Litvinovich, and V. A. Khvatov, “Effect of the Inclusion of the Detailed Geometry of the Reactor Core on the Calculated Antineutrino Flux from a VVER-1000 Reactor,” *JETP Lett.*, vol. 119, no. 3, pp. 158–165, 2024.
- [2] V. Kopeikin, L. Mikaelyan, and V. Sinev, “Reactor as a source of antineutrinos: Thermal fission energy,” *Phys. Atom. Nucl.*, vol. 67, pp. 1892–1899, 2004.
- [3] M. Estienne, M. Fallot, A. Algora, J. Briz-Monago, V. M. Bui, S. Cormon, W. Gelletly, L. Giot, V. Guadilla, D. Jordan, L. Le Meur, A. Porta, S. Rice, B. Rubio, J. L. Taín, E. Valencia, and A.-A. Zakari-Issoufou, “Updated summation model: An improved agreement with the daya bay antineutrino fluxes,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, p. 022502, Jul 2019.
- [4] Березнев, *Разработка нейтронно-физического кода CORNER для анализа стационарных и нестационарных процессов в реакторах на быстрых нейтронах*. PhD thesis, ИБРАЭ РАН, Москва, 2017. Диссертация на соискание учёной степени к.т.н.: 05.14.03.
- [5] Чернова, *Создание и использование программ полномасштабной пространственной кинетики для расчётов реакторов на быстрых нейтронах*. PhD thesis, ИБРАЭ РАН, Москва, 2017. Диссертация на соискание учёной степени к.т.н.: 05.14.03.

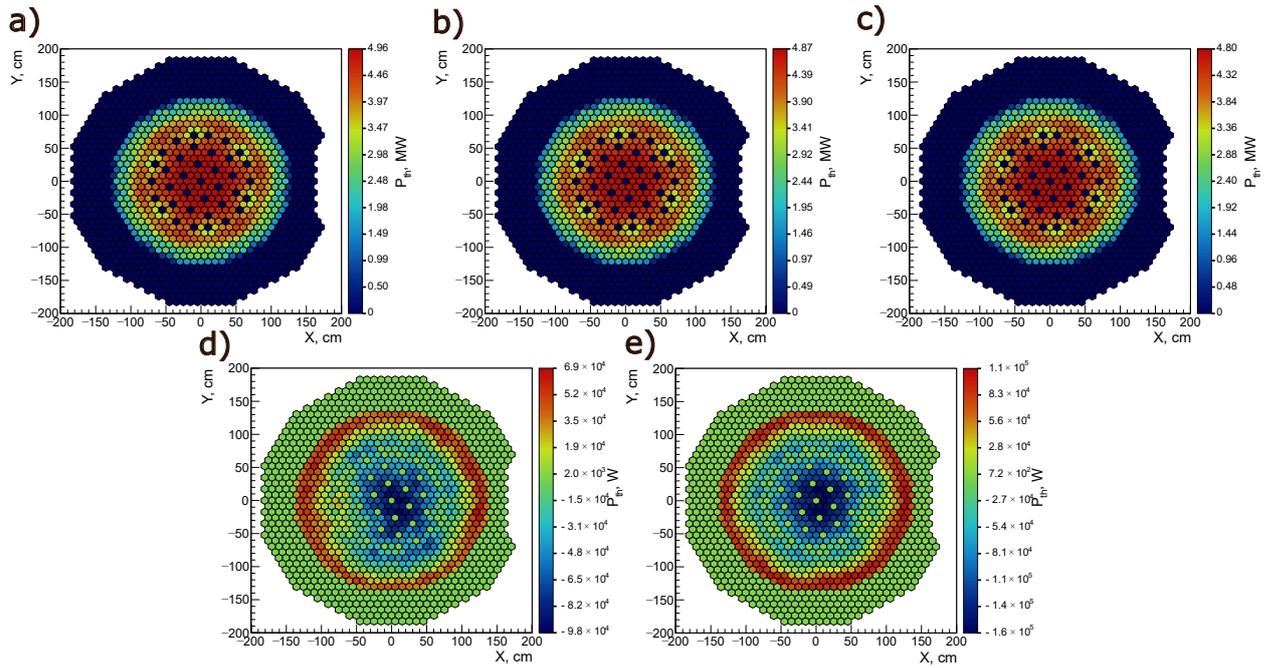


Рисунок 8 — Распределение мощности в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании, д)– разница между началом и серединой кампании, е)– разница между началом и концом кампании

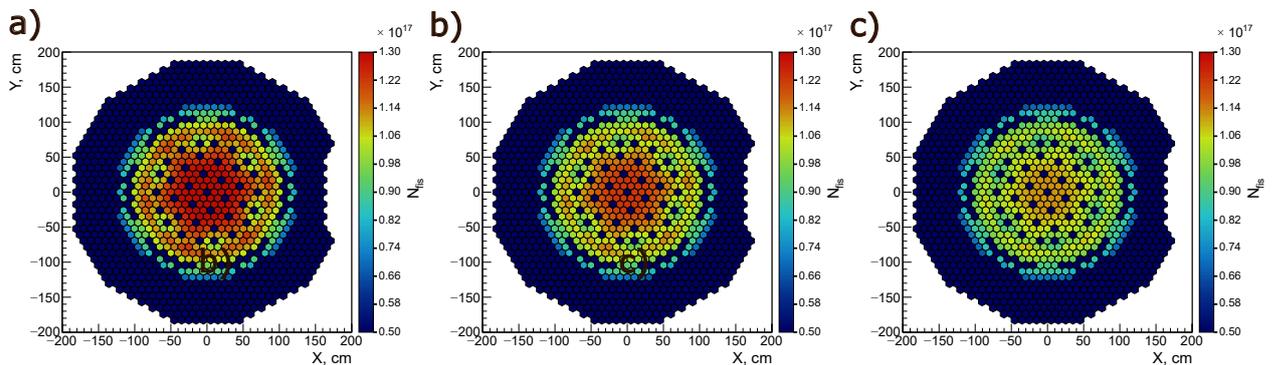


Рисунок 9 — Распределение количества делений ^{235}U в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании

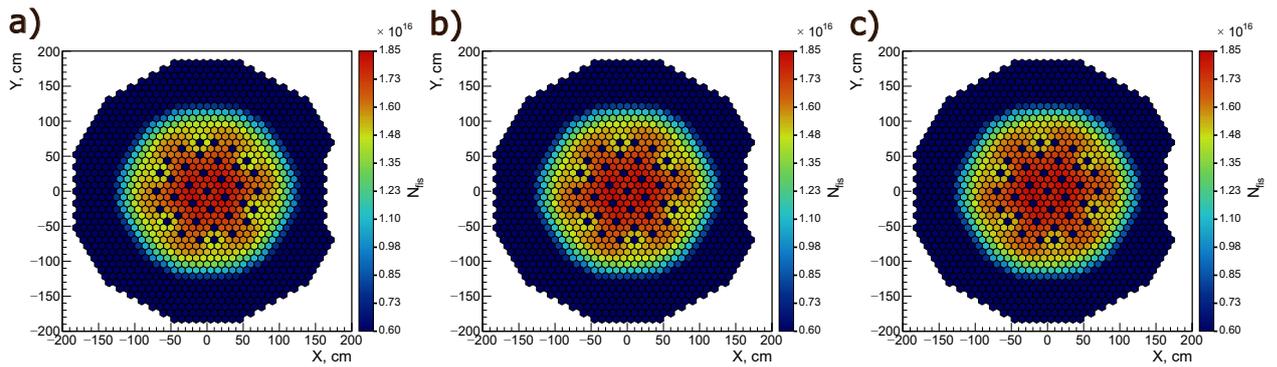


Рисунок 10 – Распределение количества делений ^{238}U в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании

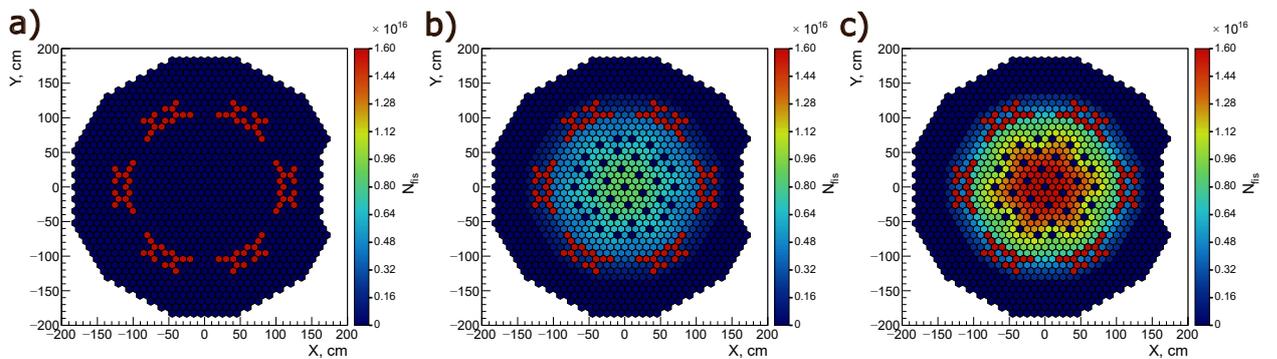


Рисунок 11 – Распределение количества делений ^{239}Pu в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании

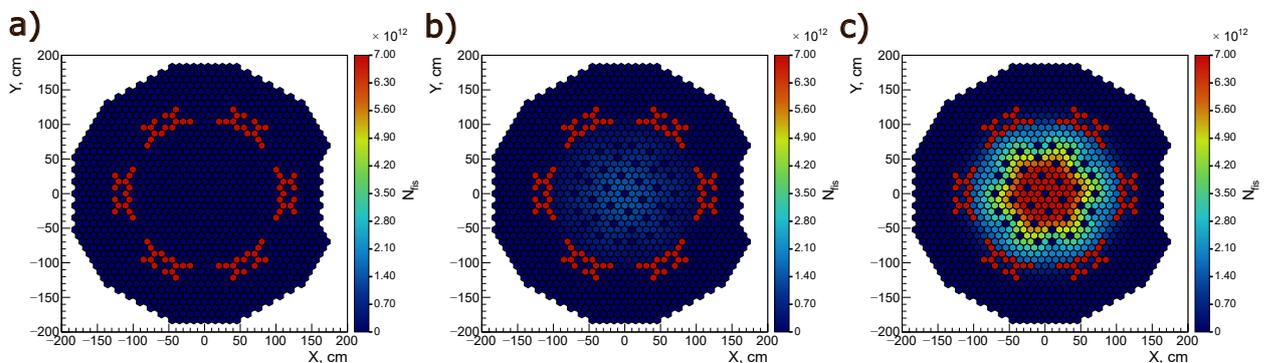


Рисунок 12 – Распределение количества делений ^{241}Pu в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании

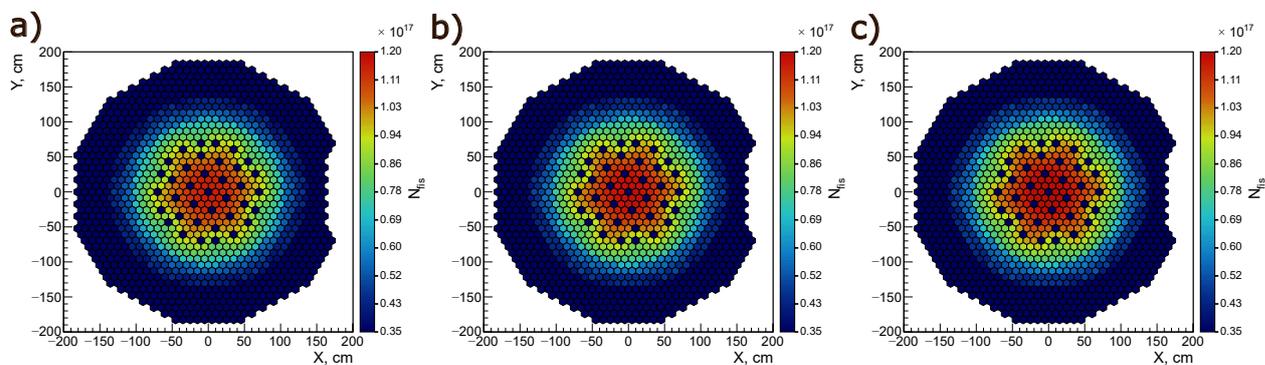


Рисунок 13 — Распределение количества реакций (n, γ) в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, с)– конец кампании