

**Влияние концентрации МОКС-топлива на
характеристики
нейтринного излучения реактора БН-800**

Выполнила В.А Вакуленко

Науч. руководитель Е. А. Литвинович

Москва, 2026

Актуальность

❖ Реакторы на быстрых нейтронах с МОКС-топливом работают с плутониевой компонентой и рассматриваются в контексте замкнутого ядерного топливного цикла. Поэтому для них важен независимый неинвазивный контроль мощности и топливного состояния.

❖ Антинейтринный метод потенциально даёт такой неинвазивный канал контроля, но для быстрых реакторов типа БН-800 его применимость ранее не исследовалась.

Задачи

- ❖ **Оценить влияние концентрации МОКС-топлива на интегральный поток и энергетический спектр антинейтрино.**
- ❖ **Оценить изменение потока и спектра антинейтрино по мере выгорания топлива.**

ВВЭР-1000

- ❖ **Тип нейтронов:** тепловые
- ❖ **Замедлитель:** вода
- ❖ **Теплоноситель:** вода
- ❖ **Материал топлива:** Урановое топливо с обогащением 3 - 5 %

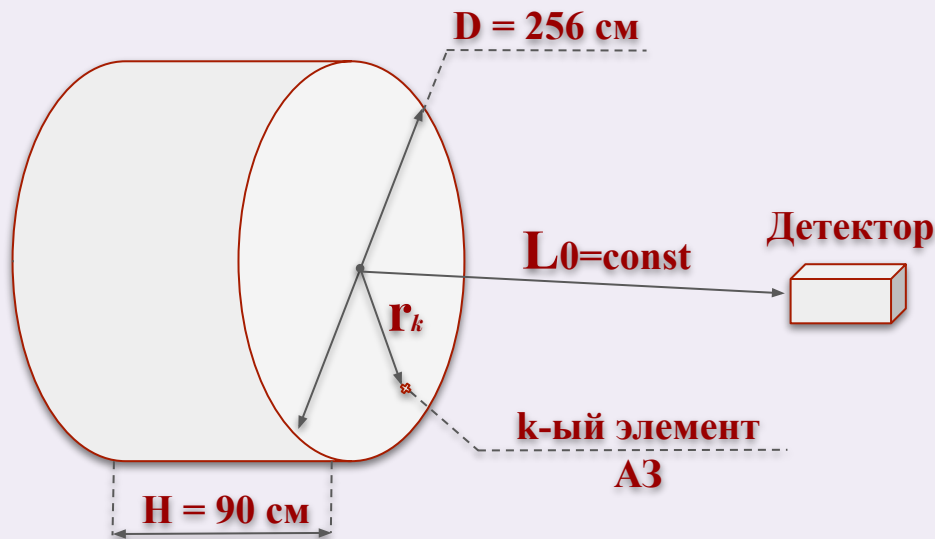
БН-800

- ❖ **Тип нейтронов:** быстрые
- ❖ **Замедлитель:** нет
- ❖ **Теплоноситель:** жидкий натрий
- ❖ **Материал топлива:** Смесь оксидного топлива (МОКС*) ~16 %, остальные 84% это урановое топливо с обогащением 18,5-24 %

* (Mixed Oxide Fuel, смешанное оксидное топливо) включает смесь оксидов урана и плутония

Методика расчета потока антинейтрино от реактора БН

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

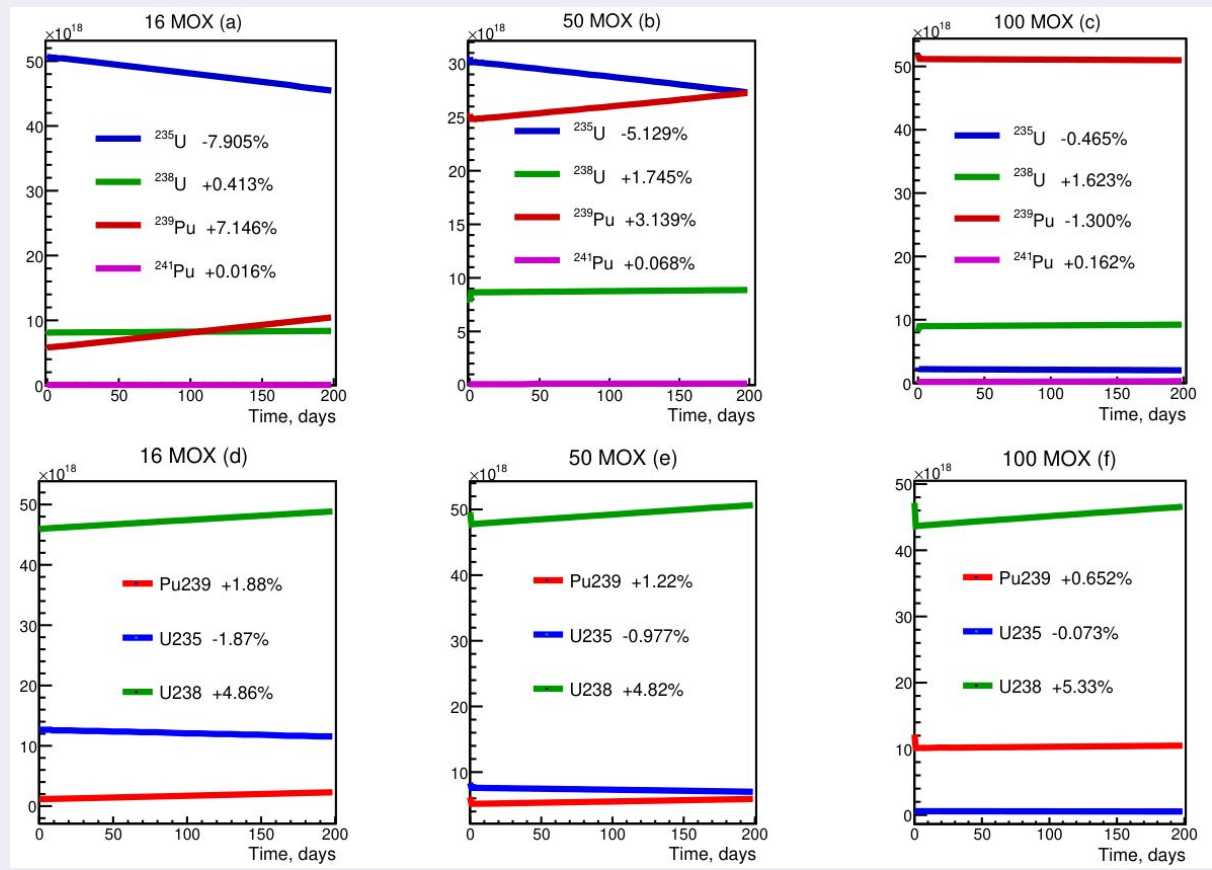


- $N_f(t, \vec{r}_k)$ — число делений в ед. времени;
- $E_f(t, \vec{r}_k) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}_k) e_i$ — Тепловая энергия одного деления;
- $P_{th}(t, \vec{r}_k) = N_f(t, \vec{r}_k) \cdot E_f(t, \vec{r}_k)$ — Тепловая мощность;
- $S_f(t, \vec{r}_k, E_{\bar{\nu}_e}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}_k) S_i(E)$ — Спектр антинейтрино;
- $S_i(E)$ и e_i — спектры антинейтрино и энергии деления i -го нуклида;
- $\alpha_i(t, \vec{r}_k)$ — доля делений i -го нуклида, причём $\sum_i \alpha_i = 1$;

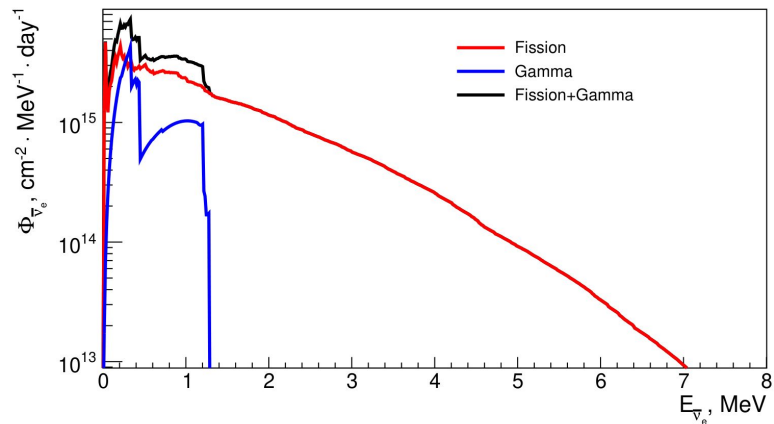
❖ При росте доли МОКС уменьшается вклад ^{235}U и возрастает вклад ^{239}Pu .

❖ Скорость делений и захватов ^{238}U меняется слабее: его содержание близко в урановом и МОКС-топливе.

❖ Реакции захвата в БН-800 в основном определяются ^{238}U , что связано с быстрым нейтронным спектром.

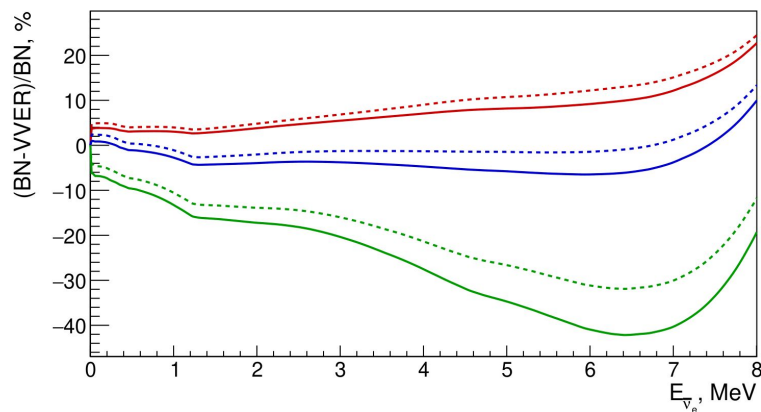


Зависимость скорости реакций деления (сверху) и захватов (снизу) от времени для 16%, 50% и 100% МОКС-топлива



Сверху: Спектры антинейтрино для середины кампании реактора БН-800 с загрузкой 100% МОКС, обусловленные реакциями деления (**красный**), (n, γ)-реакциями на ^{238}U (**синий**) и их сумма (черный);

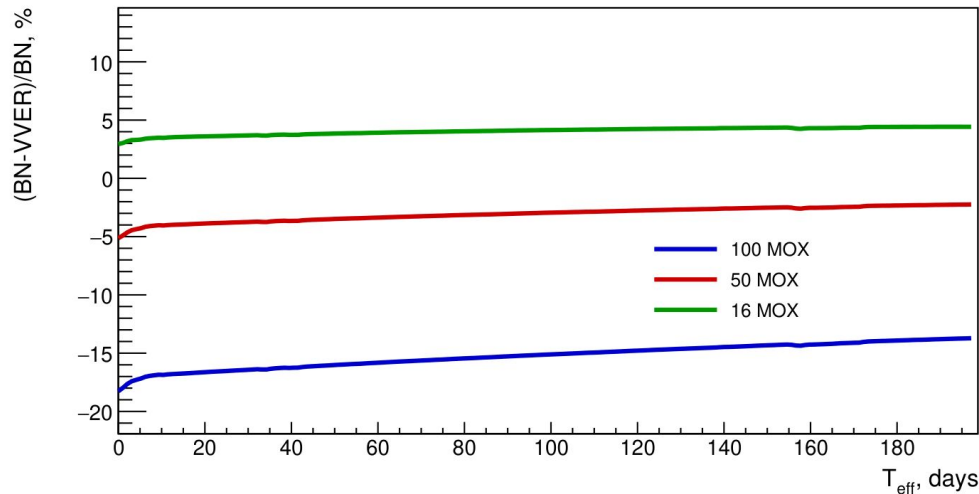
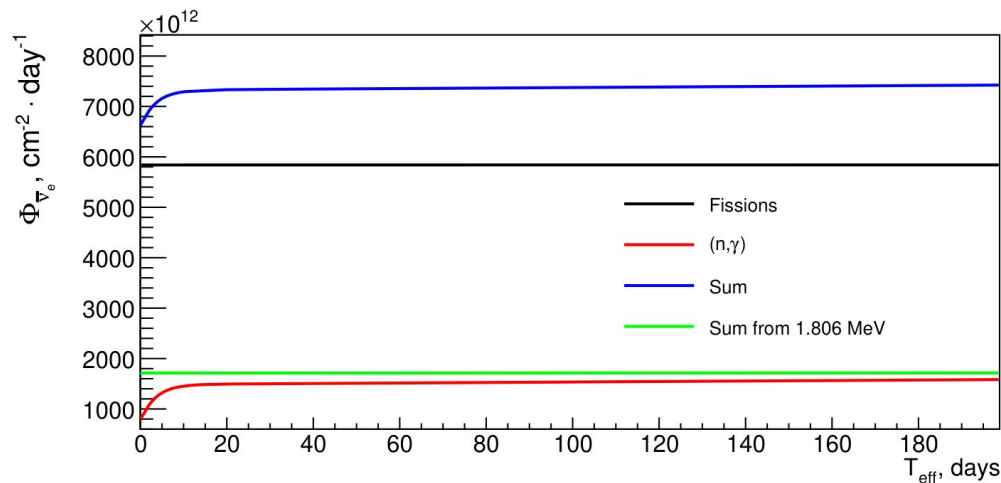
Снизу: Относительное изменение спектров для 16% (**красный**), 50% (**синий**) и 100% (**зеленый**) МОКС-топлива для начала (сплошная) и конца (пунктир) кампании.

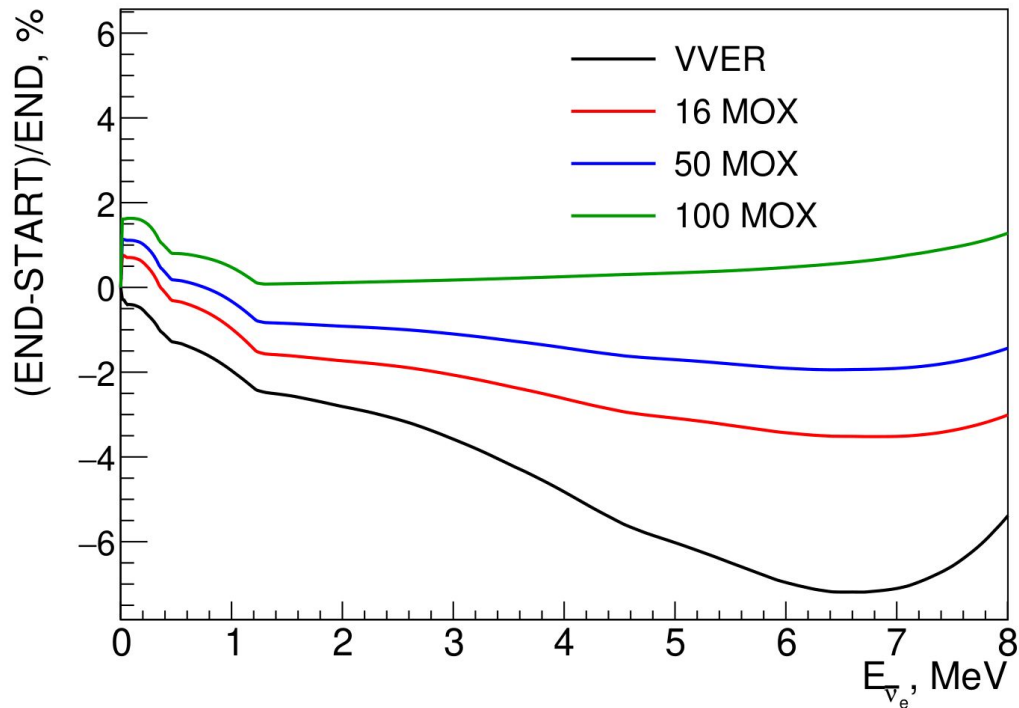


Спектр антинейтрино чувствителен к концентрации МОКС-топлива: при переходе к 100% МОКС меняется форма спектра, особенно в высокоэнергетической области. Это связано с преобладанием делений ^{239}Pu вместо ^{235}U .

Сверху: Поток антинейтрино реактора БН-800 для 100% загрузки АЗ МОКС-топливом для реакций деления (черный), (n, γ) -реакций на ^{238}U (красный), суммарного потока (синий), а также суммарного потока выше порога реакции обратного β -распада на протоне 1,804 МэВ (зеленый).

Снизу: Поток антинейтрино выше порога реакции ОБР в сравнении с потоком реактора ВВЭР-1000, нормированном на мощность 2100 МВт, для 16% (зеленый), 50% (красный) и 100% (синий) загрузки БН-800 МОКС-топливом





Интегральная разность (%) спектров между концом и началом кампании для загрузки 16% (красный), 50% (синий), 100% (зеленый) МОКС и реактора ВВЭР-1000 (черный)

- ❖ Для 50% и 100% МОКС изменение спектра не превышает примерно 2%.
- ❖ Для 16% МОКС изменение также небольшое — менее 3% в области $E_{\nu} > 6,5 \text{ МэВ}$.
- ❖ У ВВЭР-1000 изменение спектра заметно сильнее и достигает примерно 7% при $E > 6,5 \text{ МэВ}$.

Итоги

- ❖ При переходе от 16% к 100% МОКС поток антинейтрино выше порога ОБР уменьшается примерно на 20%.
- ❖ Форма спектра также меняется: различия между загрузками становятся наиболее заметны при $E > 6,5$ МэВ.
- ❖ В течение кампании реактора БН 800 спектр антинейтрино меняется слабо: менее 3% для всех вариантов загрузки МОКС-топливом.
- ❖ Антинейтринный сигнал БН-800 чувствителен к концентрации МОКС-топлива, но при этом достаточно стабилен во времени. Слабая временная эволюция потока и спектра делает антинейтринный сигнал БН-800 перспективным для задач долговременного неинвазивного мониторинга.

Апробация работы

Публикации:

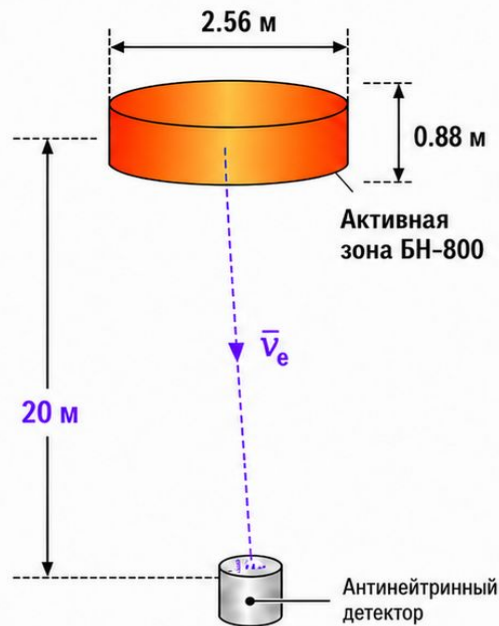
- ❖ В. И. Белоусов, В. А. Вакуленко, И. Н. Жутиков, М. В. Иоаннисиан, Е. А. Литвинович, Д. В. Попов, К. Ф. Раскач, М. Д. Скорохватов. *Поток и спектр антинейтрино реактора на быстрых нейтронах БН-800 со смешанной загрузкой* // **Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов**. 2025. Вып. 2. С. 4–11.
- ❖ Влияние концентрации МОКС-топлива на характеристики нейтринного излучения реактора БН-800 (в процессе рецензирования, ВАНТ)

Конференции:

- ❖ XVIII Курчатовская молодёжная научная школа НИЦ «Курчатовский институт», 2025 г. Опубликован тезис доклада в сборнике тезисов.
- ❖ IX Международная молодёжная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», НИЯУ МИФИ, 2025 г. Опубликован тезис доклада в сборнике тезисов.

Спасибо за внимание!

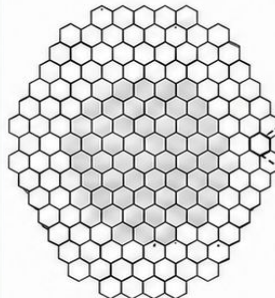
Антинейтринный мониторинг реактора БН-800



О программе КИР-С

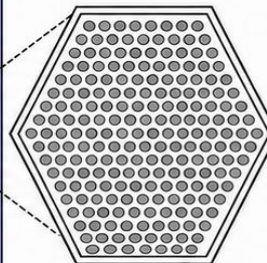
- Для моделирования кампании реактора БН-800 использовался программный комплекс КИР-С.
- Комплекс предназначен для расчёта стационарных и нестационарных нейтронно-физических процессов методом Монте-Карло в трёхмерной геометрии.
- Включает модуль выгорания топлива и позволяет рассчитывать энерговыделение в элементах активной зоны.
- Погрешность расчёта энерговыделения в элементе АЗ не превышает 5 %.

Расположение ТВС в активной зоне (вид сверху)



Всего 565 ТВС

Одна ТВС



шестигранная ТВС

127 ТВЭЛов

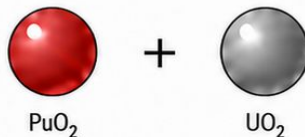
ТВЭЛ



ТВЭЛ содержит топливо MOX или UO_2

МОКС-топливо

смесь оксидов $PuO_2 + UO_2$



Загрузка МОКС в расчётах:

16 %, 50 %, 100 %

Урановое топливо

UO_2



^{235}U : 18,5–24 %

^{238}U : 76–81,5 %