

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

УДК 539.12.01

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Изучение потока антинейтрино по данным полей выгорания  
реактора ВВЭР-1000**

Студент \_\_\_\_\_ В. А. Вакуленко

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н \_\_\_\_\_ Е. А. Литвинович

Москва 2024

# Содержание

<b>1 Введение</b>	<b>2</b>
1.1 ИЗУЧЕНИЕ ПОТОКА АНТИНЕЙТРИНО ОТ РЕАКТОРА . . . . .	2
1.2 МОЩНОСТЬ РЕАКТОРА . . . . .	2
<b>2 КАРТОГРАММЫ</b>	<b>4</b>
<b>3 АНАЛИЗ ДАННЫХ</b>	<b>4</b>
3.1 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ . . . . .	4
3.2 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛЕЙ ДЕЛЕНИЯ . . . . .	5
<b>4 РАСЧЕТ ПОТОКОВ АНТИНЕЙТРИНО</b>	<b>6</b>
4.1 ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ДЕТЕКТОРА . . . . .	7
<b>5 Заключение</b>	<b>10</b>

# 1 Введение

## 1.1 ИЗУЧЕНИЕ ПОТОКА АНТИНЕЙТРИНО ОТ РЕАКТОРА

Поток антинейтрино от реактора можно рассчитать по формуле:

$$\Phi(t, E_{\bar{\nu}_e}) = \frac{1}{4\pi} \cdot \int \frac{P_{th}(t, \vec{r})}{(\vec{L}_0 - \vec{r})^2 E_f(t, \vec{r})} \cdot S_f(t, \vec{r}, E_{\bar{\nu}_e}) dV,$$

где интеграл берётся по всему объёму АЗ. В этой формуле  $\vec{L}_0$  — расстояние между точкой, в которой рассчитывается поток, и центром АЗ,  $\vec{r}$  — радиус вектор от центра АЗ до элемента АЗ от которого вычисляется поток,  $P_{th}(t, \vec{r})$  — тепловая мощность данного элемента АЗ,  $E_f(t, \vec{r}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}) E_i$  — средняя тепловая энергия, выделяющаяся в данном элементе активной зоны на одно деление,  $S_f(t, \vec{r}, E_{\bar{\nu}_e}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}) S_i(E)$  — спектр антинейтрино, приходящийся на одно деление для данного элемента АЗ.  $E_f(t, \vec{r})$  и  $S_f(t, \vec{r})$  представляют собой средневзвешенное, соответственно, энергий  $E_i$  и спектров  $S_i$  для четырёх основных изотопов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ), взвешенных с соответствующими им долями деления  $\alpha_i$ . В данной формуле, выделяющаяся в активной зоне тепловая энергия делится на энергию, выделяющуюся в одном акте деления; таким образом, получается число делений, которое умножается на спектр антинейтрино от одного деления, давая поток антинейтрино от реактора.

## 1.2 МОЩНОСТЬ РЕАКТОРА

Мощность реактора является по сути главным, определяющим фактором потока антинейтрино от реактора, так как она напрямую входит в формулу для потока, и изменение мощности ведёт к практически прямо пропорциональному изменению потока антинейтрино, соответственно, погрешность мощности будет оказывать существенное влияние на погрешность потока антинейтрино. [1] Мощность реактора можно вычислить различными методами, каждый из которых имеет свою погрешность. Для примера можно привести следующие методы расчёта мощности реактора и их примерные погрешности [8]:

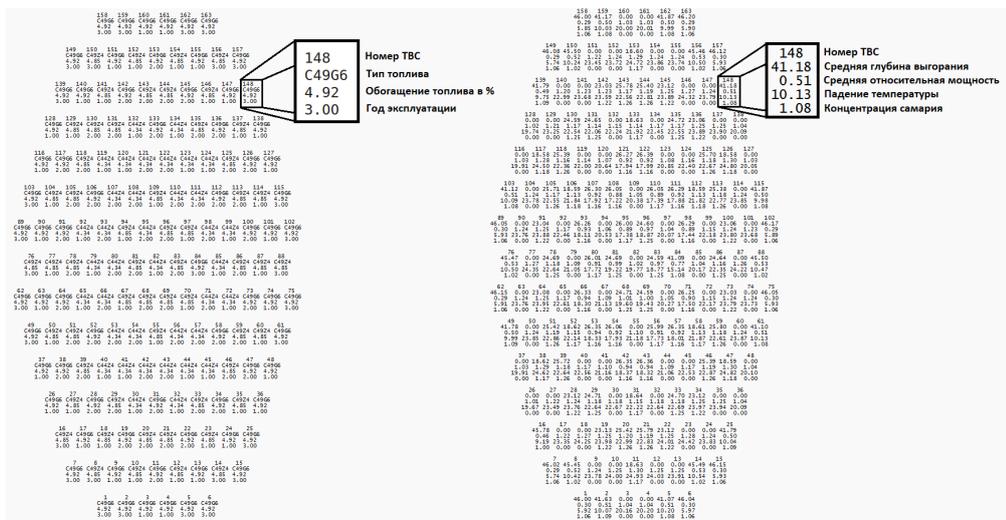
1. По теплотехническим параметрам первого контура (по расходу теплоносителя и подогреву на петлях) — 5,1% (наибольшую погрешность вносит погрешность расчета расхода теплоносителя в петлях 1-го контура);
2. По расходу питательной воды на парогенераторах (ПГ) и теплосодержанию питательной воды на входе в ПГ и пара на выходе ПГ — 1,1% (наибольшую погрешность вносит погрешность измерения расхода питательной воды перед ПГ);

3. По расходу питательной воды на подогревателях высокого давления (ПВД) и теплосодержанию питательной воды за ПВД и пара на выходе ПГ – 1,5(наибольшую погрешность вносит погрешность измерения расхода питательной воды перед ПВД);
4. По показаниям внутриреакторных датчиков прямой зарядки (ДПЗ) – 4,5(наибольшую погрешность вносит погрешность расчета коэффициентов чувствительностей);[2]
5. По показаниям внереакторных ионизационных камер (ИК) – 2,9% (наибольшую погрешность вносит погрешность нормировочных коэффициентов для связи сигналов ионизационных камер, расположенных в каналах вне реактора, с тепловой мощностью реактора).

Приведённые значения погрешностей являются оценочными, реальные же погрешности данных методов зависят как от состояния измерительных средств,[3] так и от режима работы реактора (уровня мощности и т.д.) и определяются исходя из балансных испытаний. На 3 энергоблоке Калининской АЭС используются три способа измерения мощности: по параметрам теплоносителя 1-го контура с погрешностью 2.9%, по параметрам питательной воды перед парогенераторами с погрешностью 2.5%, по показаниям внутриреакторных датчиков прямой зарядки с погрешностью 3.6%. К данным способам может также добавляться и показание внереакторных ионизационных камер, которое тарируется, при необходимости, по средне-взвешенному значению тепловой мощности реактора.[4]

**Цель исследования** заключается в обработке массива данных по активной зоне блока №3 КАЭС для текущей кампании и анализе данных, полученных их картограмм активной зоны. Так же нас интересует вопрос о наиболее оптимальном расположении детектора относительно реактора с точки зрения регистрации наибольшего[5] изменения потока антинейтрино за время кампании.

## 2 КАРТОГРАММЫ



Данные реактора содержат в себе картограммы, представленные выше. Они несут информацию о номере ТВС, виде топлива, годе эксплуатации и так далее. Так же в данных представлено распределение характеристик (мощности, долей деления и т.д.) по высоте, что позволяет производить анализ в объеме.

## 3 АНАЛИЗ ДАННЫХ

### 3.1 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ

По данным картограмм были получены распределения мощности в плоскости XY в начале и конце кампании соответственно. Из графиков видно, как к концу кампании некоторые участки заметно потемнели, что говорит о низком значении мощности. В особенности это касается центра.

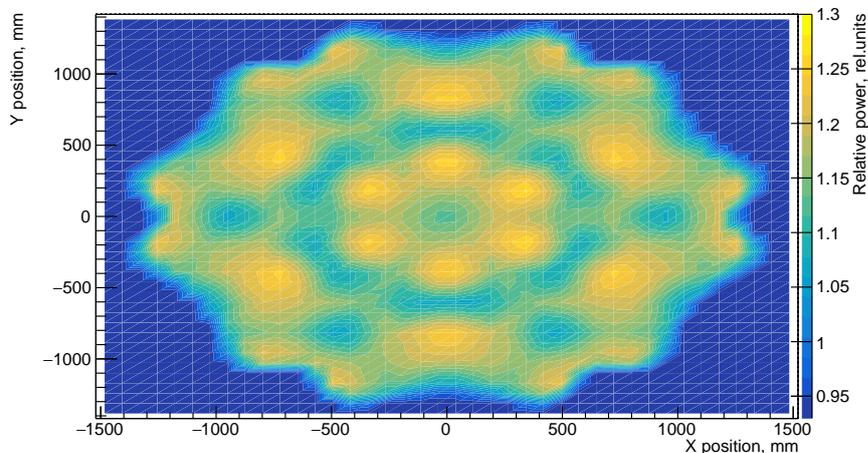


Рис. 1: Распределение мощности в плоскости XY в начале кампании

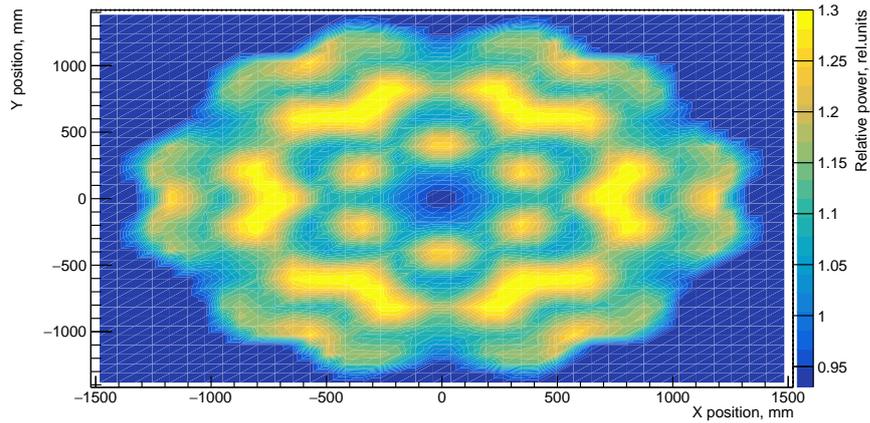


Рис. 2: Распределение мощности в плоскости XY в конце кампании

### 3.2 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛЕЙ ДЕЛЕНИЯ

Из картограмм так же получено распределение долей деления изотопа  $U^{235}$  в плоскости XY в начале и в конце кампании. Рассматривается именно этот изотоп, так как он дает наибольший вклад в поток антинейтрино, о чем пойдет речь ниже. Аналогично распределению мощности заметны значительные потемнения на графике, соответствующем концу кампании. Это соответствует снижению количества делений в данных областях.

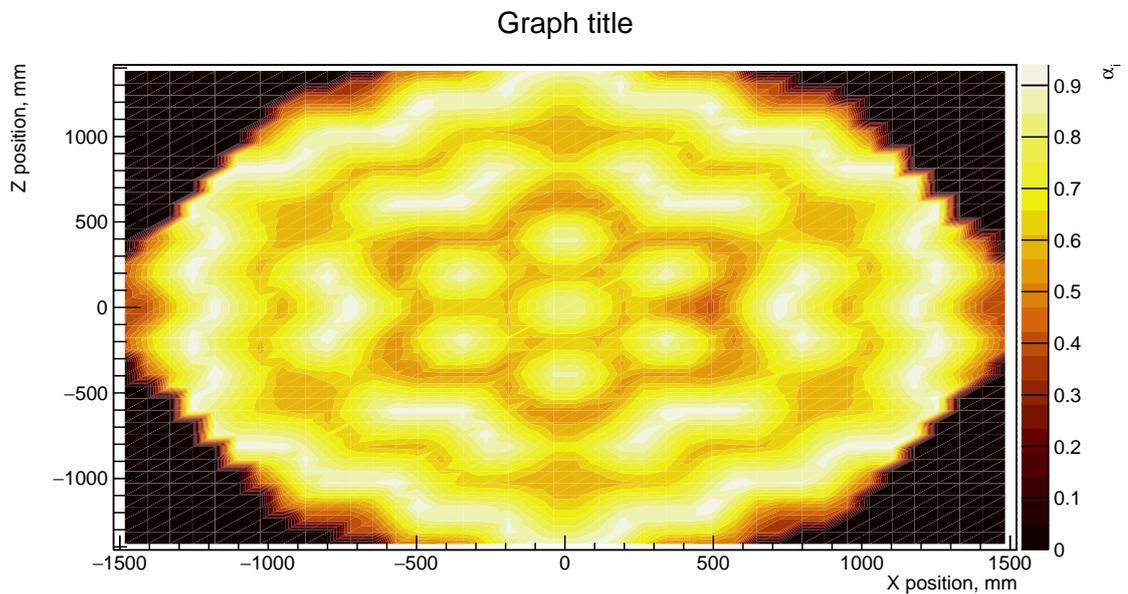


Рис. 3: Распределение долей деления изотопа  $U^{235}$  в плоскости XY в начале кампании

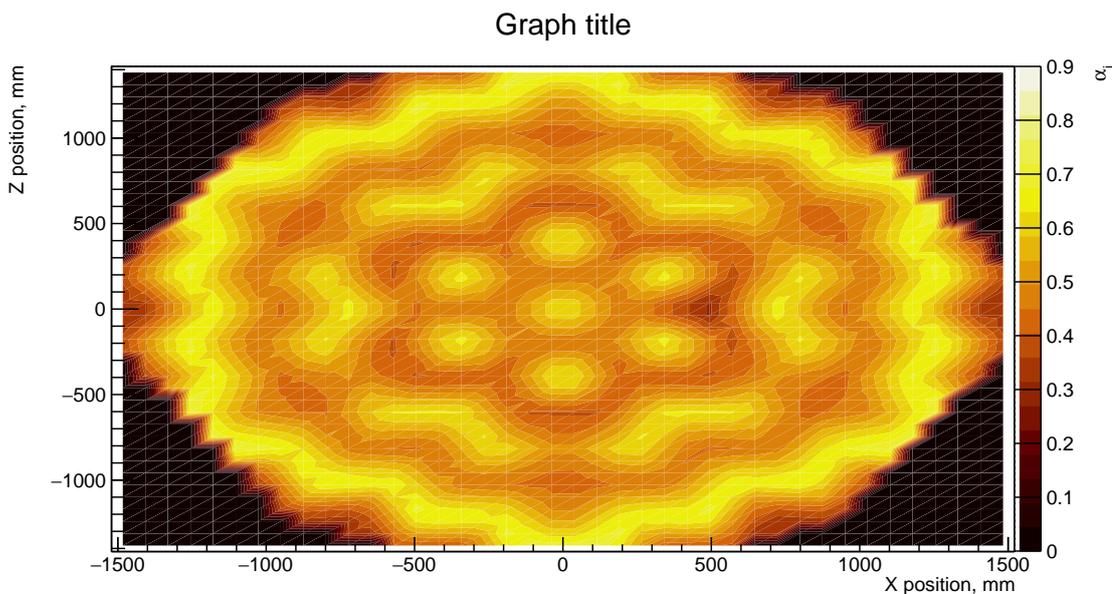


Рис. 4: Распределение долей деления изотопа  $U^{235}$  в плоскости XY в конце кампании

#### 4 РАСЧЕТ ПОТОКОВ АНТИНЕЙТРИНО

По формуле, описанной в 1 главе введения, были построены спектры антинейтрино в начале и в конце кампании. Из рисунков видно не только уменьшение общего числа антинейтрино, но и изменение формы. Так же необходимо отметить, что за время кампании количество урана 235 значительно уменьшается, а 239 плутоний увеличивается. Уменьшение суммарного потока антинейтрино по всем изотопам составляет примерно 7.3%.

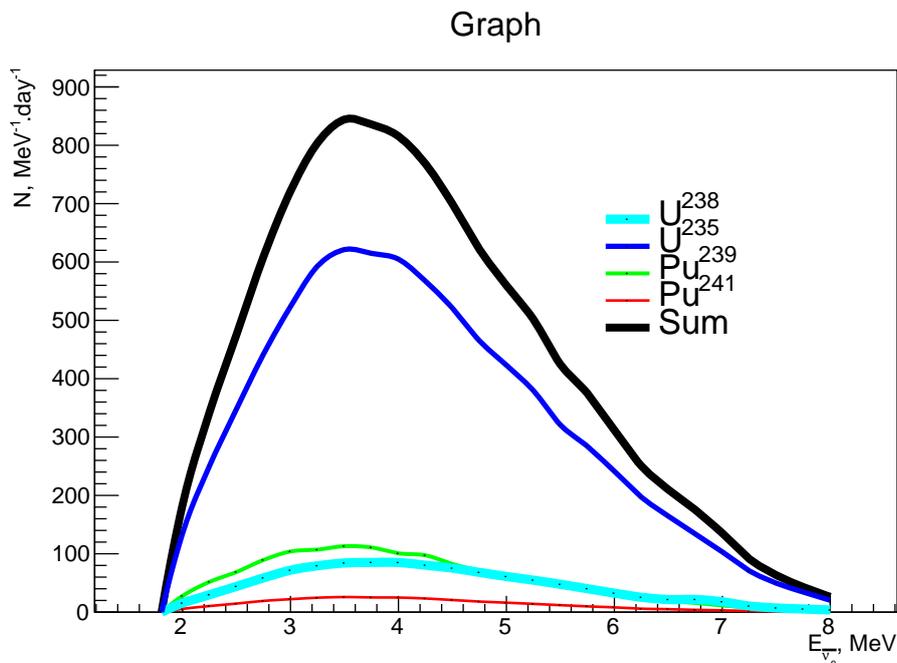


Рис. 5: Зависимость потока антинейтрино от энергии в начале кампании

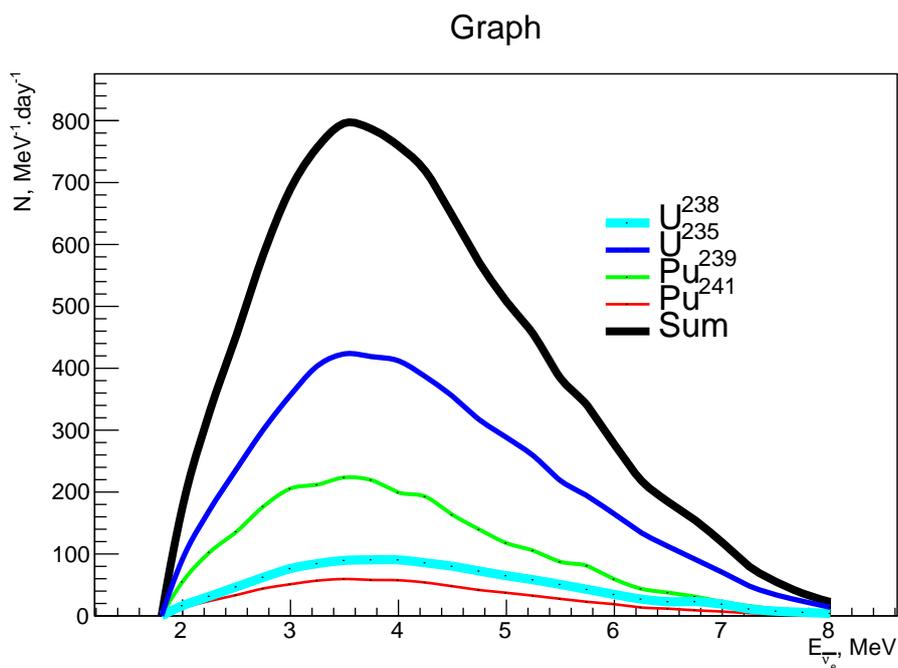


Рис. 6: Зависимость потока антинейтрино от энергии в конце кампании

#### 4.1 ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ДЕТЕКТОРА

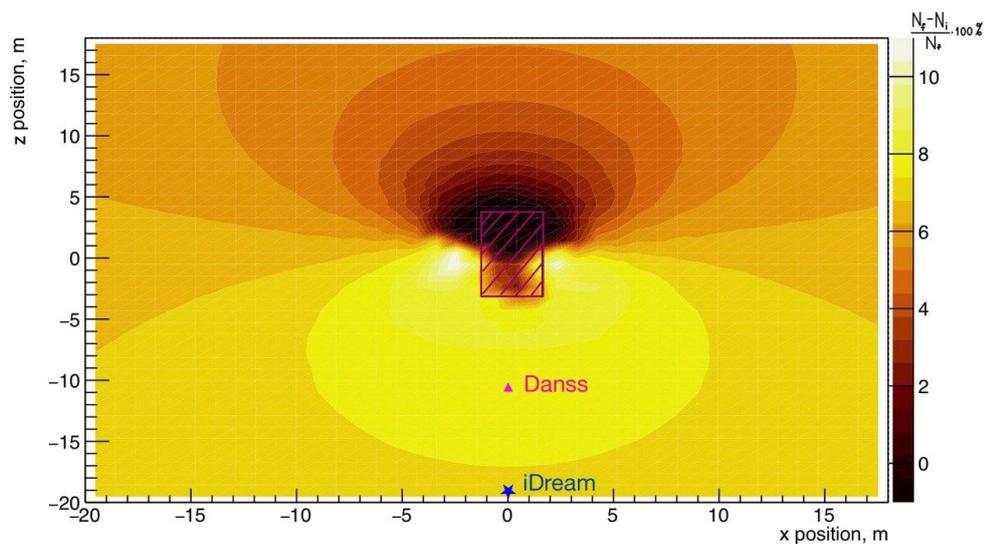


Рис. 7: Распределение скорости изменения антинейтрино со временем в координатной плоскости XZ

Для определения оптимального положения детектора относительно регистрации максимальной величины изменения потока антинейтрино мы находим отношение разности потоков в начале и в конце кампании, деленную на величину потока в начале для каждой точки рассматриваемой плоскости. Домножив полученную величину на 100 мы получим значение, выраженное в процентах:

$$\frac{N_f - N_i}{N_f} * 100\%$$

На графике так же отмечены положения детекторов в экспериментах iDream и Danss. Согласно графику iDream соответствует 7%, а эксперименту Danss-8%. Штрихованная часть соответствует непосредственно самой активной зоне. Наиболее выгодными положениями являются самые светлые пятна. Как видно, имеется два белых пятна у краев активной зоны. Однако, эти области находятся слишком близко к реактору, поэтому мы их не учитываем.

Для исследования поведения данной величины в одной точке плоскости с течением времени были построены следующие графики.

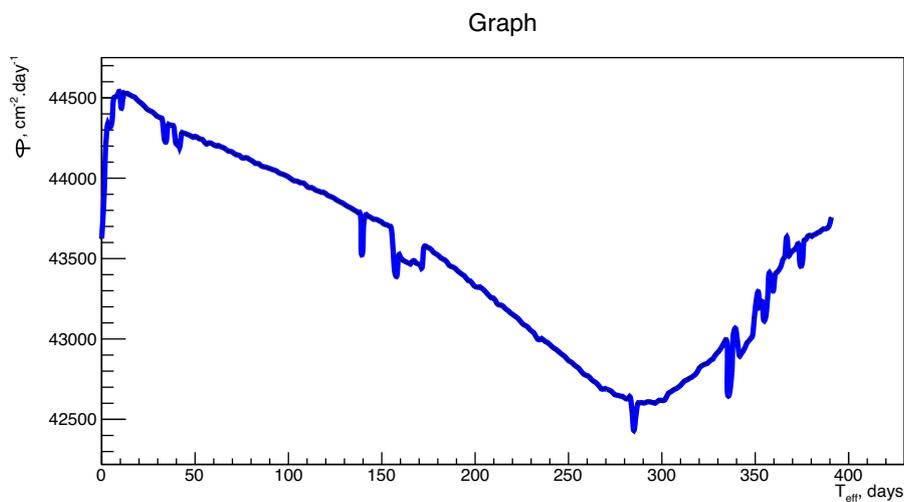


Рис. 8: Зависимость потока антинейтрино в точке (0,0,5)м от времени

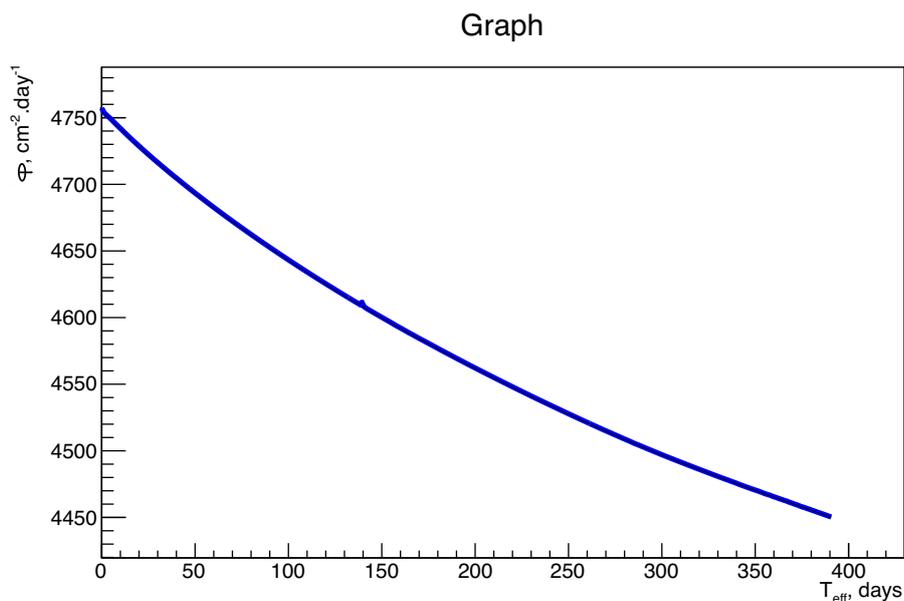


Рис. 9: Зависимость потока антинейтрино в точке (15,0,0)м от времени

Видно, что в точке над реактором зависимость нелинейная, наблюдается

Graph

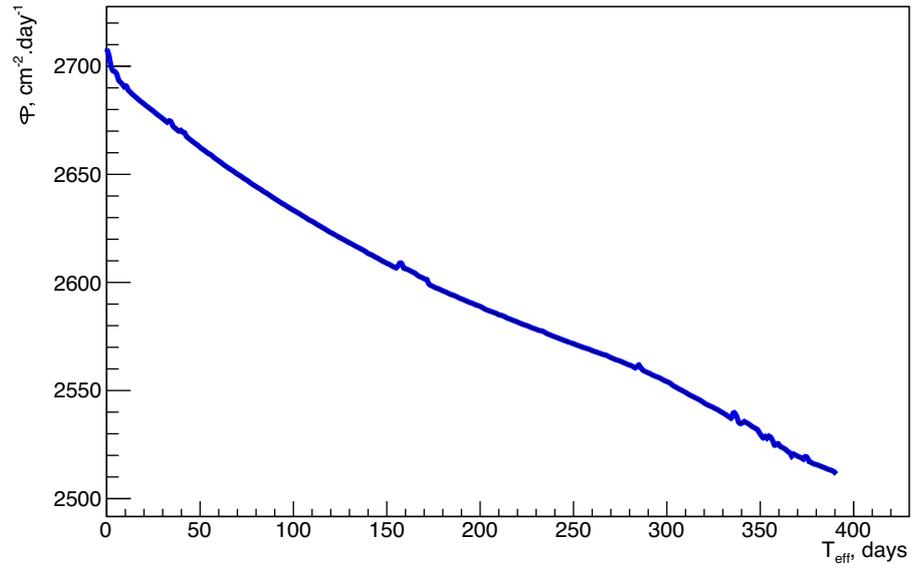


Рис. 10: Зависимость потока антинейтрино в точке  $(0,0,-20)\text{м}$  от времени

повышение, из чего следует незначительное изменение потока антинейтрино, что не подходит для наших задач.

В противовес первой точке, сбоку и снизу от ректора происходит значительное изменение потока антинейтрино, что мы и видим на графиках.

## 5 Заключение

В ходе работы были получены следующие результаты:

Проведены обработка и анализ картограмм выгорания блока №3 КАЭС для текущей кампании, получены распределения мощности и долей деления изотопа  $U^{235}$  в плоскости XY.

Рассчитаны потоки антинейтрино из активной зоны реактора ВВЭР-1000 в рамках Курчатовской модели спектров.

Исследован вопрос о наиболее выгодном расположении детектора относительно реактора с точки зрения регистрации наибольшего изменения потока антинейтрино за время кампании. Так, было выяснено, что наиболее оптимальным будет расположение снизу от реактора.

## Список литературы

- [1] Alessandro Strumia и Francesco Vissani. «Precise quasielastic neutrino/nucleon cross-section». В: *Physics Letters B* 564.1–2 (июль 2003), с. 42–54. ISSN: 0370-2693. DOI: 10.1016/S0370-2693(03)00616-6. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0370-2693\(03\)00616-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0370-2693(03)00616-6).
- [2] А. Abramov и др. «iDREAM: industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant». В: *Journal of Instrumentation* 17.09 (сент. 2022), P09001. ISSN: 1748-0221. DOI: 10.1088/1748-0221/17/09/p09001. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/09/P09001>.
- [3] К. Akiba и др. «Characterisation of Medipix3 silicon detectors in a charged-particle beam». В: *Journal of Instrumentation* 11.01 (январь. 2016), P01011–P01011. ISSN: 1748-0221. DOI: 10.1088/1748-0221/11/01/p01011. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/01/P01011>.
- [4] Н. Almazán и др. «Accurate Measurement of the Electron Antineutrino Yield of  $\langle \text{mml:math xmlns:mml="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="inline"} \langle \text{mml:mrow} \rangle \langle \text{mml:mmultispace} \rangle \langle \text{mml:mathvariant="normal"} \rangle U \langle \text{mml:mi} \rangle \langle \text{mml:mrow} \rangle \langle \text{mml:mprescripts} / \rangle \langle \text{mml:none} / \rangle \langle \text{mml:mrow} \rangle$  Fissions from the STEREO Experiment with 119 Days of Reactor-On Data». В: *Physical Review Letters* 125.20 (нояб. 2020). ISSN: 1079-7114. DOI: 10.1103/physrevlett.125.201801. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.201801>.
- [5] Xubo Ma и др. «Investigation of antineutrino spectral anomaly with reactor simulation uncertainty». В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 906 (окт. 2018), с. 97–102. ISSN: 0168-9002. DOI: 10.1016/j.nima.2018.08.002. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.002>.