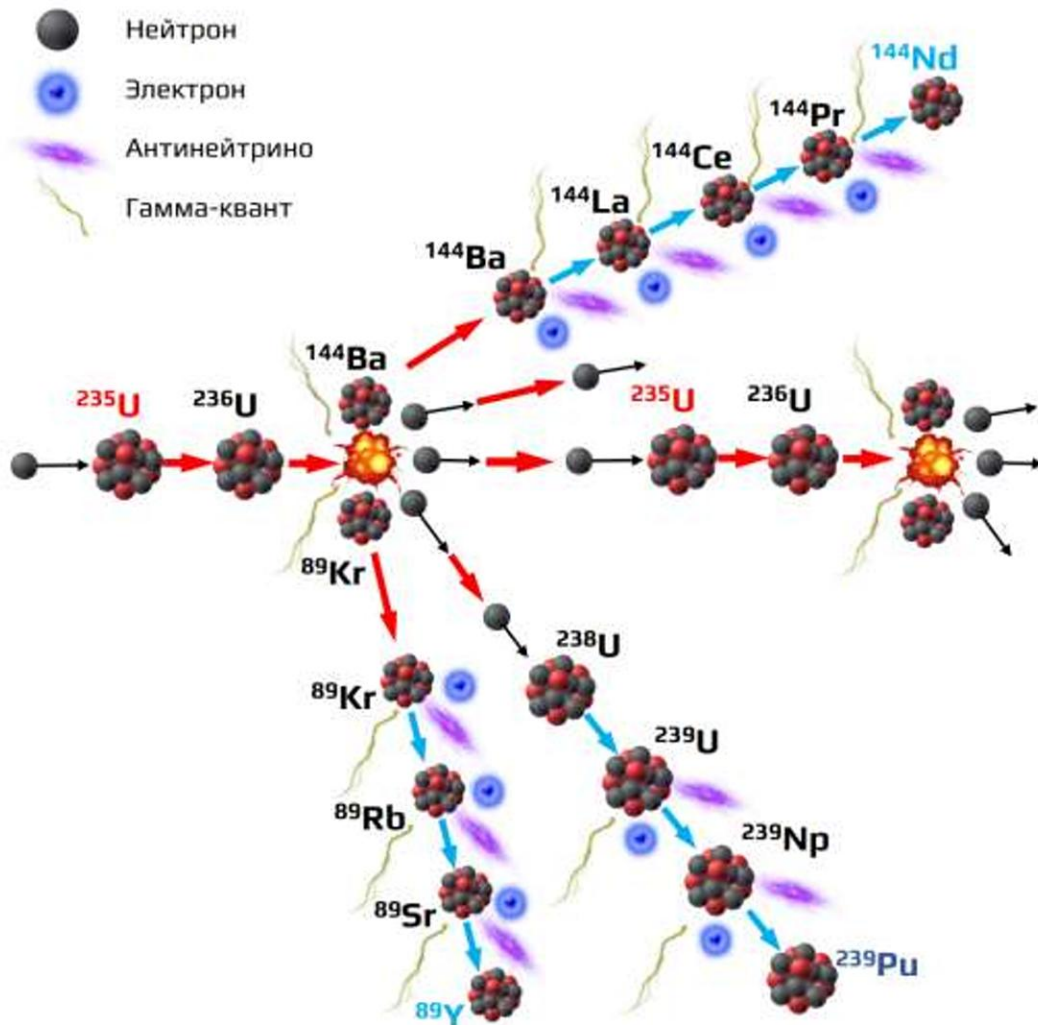




Моделирование неравновесных процессов в физике реакторных антинейтрино и её приложениях

Научный руководитель: Попов Д. В

Студент: Фахрутдинов Э. А.



«Любой неравновесный процесс»

Активности осколков деления
выходят из равновесия

Энергетический спектр
антинейтрино меняется со
временем

Цель данной работы заключается в разработке модели расчёта неравновесного энергетического спектра электронных антинейтрино и бета-частиц

Задачи:

- Проверить корректность учёта поправок на самоэкранирование нейтронных полей в разрабатываемой модели;
- Провести верификацию работы модели на экспериментальных данных;
- На основе верифицированной программы реализовать алгоритм расчёта неравновесного спектра электронных антинейтрино и бета-частиц.

$$\rho_{\nu}^{(i)}(E_{\nu}, t) = \sum_k A_k^{(i)}(t) \rho_{\nu}^{(k)}(E_{\nu}) \rightarrow \sum_k CY_k^{(i)} \rho_{\nu}^{(k)}(E_{\nu}) \quad (1)$$

Динамика спектра i -ого
изотопа

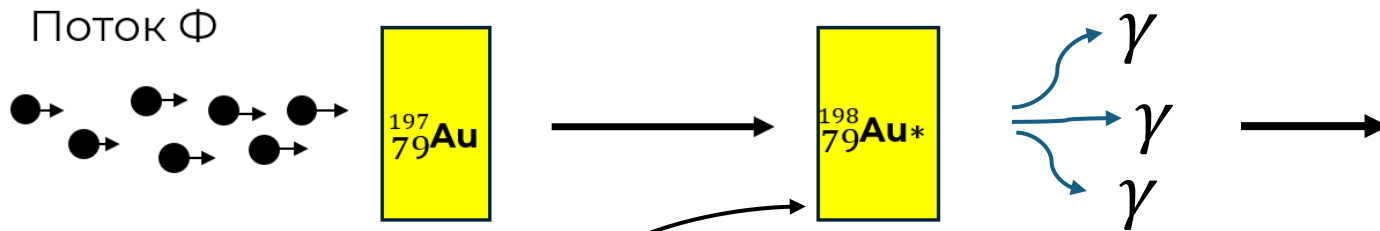
Равновесный спектр i -
ого изотопа

- $A_k^{(i)}(t)$ – активность k -ого продукта деления i -ого изотопа;
- $CY_k^{(i)}$ – кумулятивный выход k -ого продукта деления i -ого изотопа;
- $\rho_{\nu}^{(k)}(E_{\nu})$ – спектр антинейтрино k -ого продукта деления;

Реконструкция спектральной плотности потока нейтронов

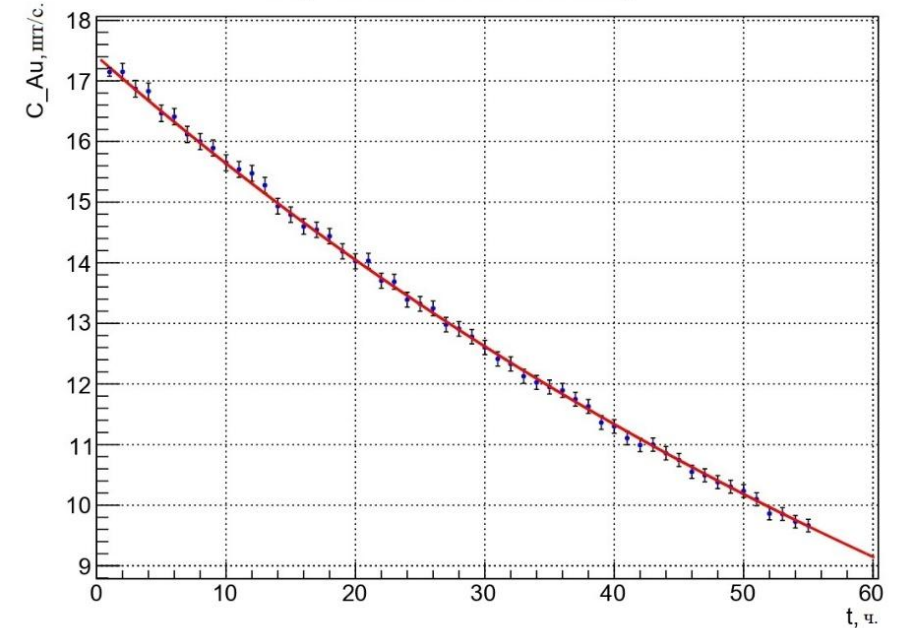
Спектральная плотность потока

$$\frac{d\Phi_n}{dE} = \Phi_{th} \left(\frac{E}{kT_n} e^{-\frac{E}{kT_n}} + CR \cdot \frac{\Delta(\frac{E}{kT_n})}{E^{1+\alpha}} \right)$$



$$A_i(t) = \begin{cases} \langle \Phi \sigma n \rangle \cdot (1 - e^{-\lambda t}), & 0 < t < t_{irr} \\ \langle \Phi \sigma n \rangle \cdot (1 - e^{-\lambda t_{irr}}) \cdot e^{t_{irr} - t}, & t_{irr} < t \end{cases}$$

Скорость счёта гамма-детектора



По кривой спада скорости счёта спектрометра определяется активность на момент конца облучения:

$$C(t) = C(t_{irr}) e^{-\lambda(t-t_{irr})} \Rightarrow A(t_{irr}) = \frac{C(t_{irr})}{\epsilon p}$$

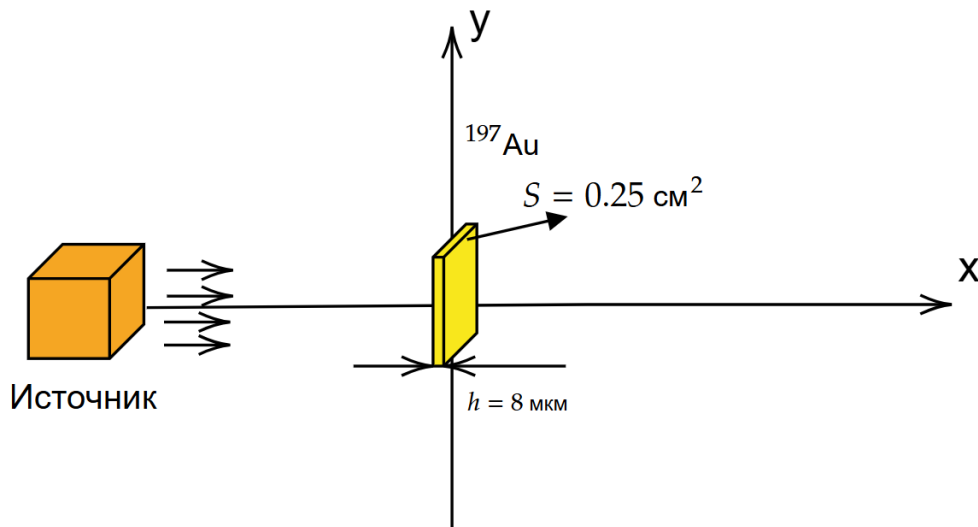
ϵ – эффективность регистрации
 p – вероятность испускания гамма – кванта

Реконструкция спектральной плотности потока нейтронов

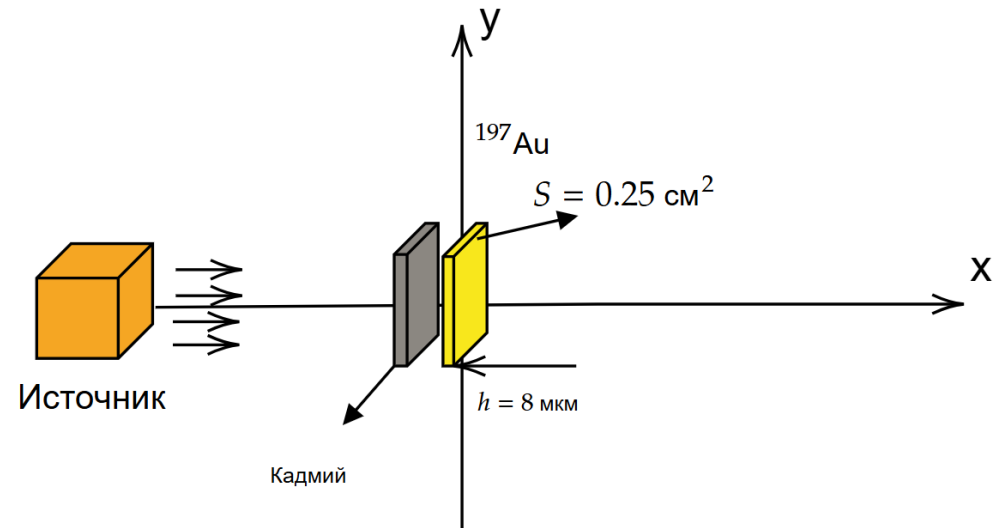
Спектральная плотность потока

$$\frac{d\Phi_n}{dE} = \Phi_{th} \left(\frac{E}{kT_n} e^{-\frac{E}{kT_n}} + CR \cdot \frac{\Delta(\frac{E}{kT_n})}{E^{1+\alpha}} \right)$$

T_n - температура нейтронного газа
 α - поправка на отклонение от классического распределения Ферми
 CR - кадмиевое отношение

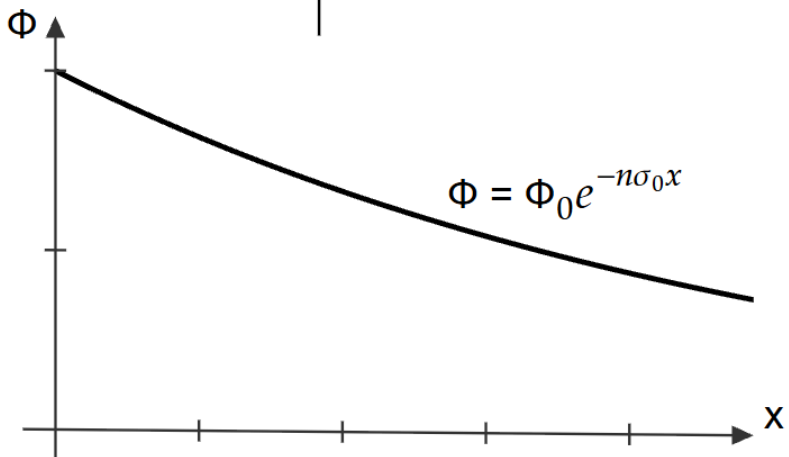
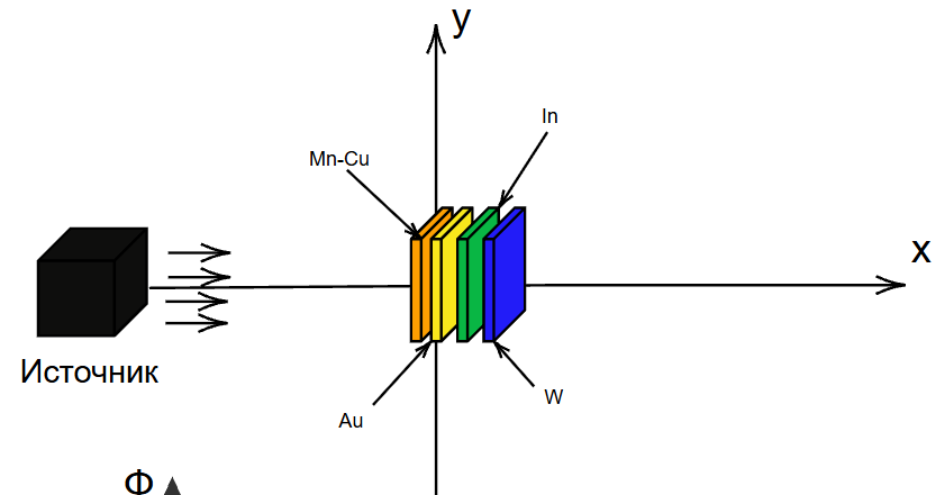


Определяется нормировка теплового потока



Кадмий поглощает тепловые нейтроны.
 Определяется кадмиевое отношение

Реконструкция спектральной плотности потока нейтронов



Самозранировка – ослабление потока нейтронов в материале из-за взаимодействия нейтронов со средой

Изотоп	Сечение активации тепловыми нейтронами (25,3 мэВ) σ_{a0}	Фактор Весткота при комнатной температуре g	Положение первого резонанса	Резонансный интеграл активации I_a
^{115}In	(160 ± 2) барн (по ^{116}In)	1,023	$\sim 1,5$ эВ	(2600 ± 80) барн (по ^{116}In)
^{197}Au	$(98,65 \pm 0,09)$ барн	1,0086	~ 5 эВ	(1550 ± 30) барн
^{186}W	$(38,1 \pm 0,5)$ барн	1,005	~ 20 эВ	(480 ± 15) барн
^{55}Mn	$(13,36 \pm 0,05)$ барн	1,004	~ 300 эВ	$(13,3 \pm 0,5)$ барн

Методическое преимущество такого размещения – активация всех образцов идентичным потоком при одинаковых условиях облучения



Проверка корректности учёта явления самозранировки в Serpent, используемой при расчёте динамики спектров

Реконструкция спектральной плотности потока нейтронов

$$\frac{d\Phi_n}{dE} = \Phi_{th} \left(\frac{E}{kT_n} e^{-\frac{E}{kT_n}} + CR \cdot \frac{\Delta(\frac{E}{kT_n})}{E^{1+\alpha}} \right)$$

Спектральная плотность потока

Монте-Карло модель

Наведённые активности мишеней $A_i(t_0)$

$$A_i^{(model)} = \Phi_{th}(\gamma_i(T_n) + CR \cdot \beta_i(\alpha))$$

Минимизация функции χ^2

- Из минимизации функции χ^2 находим искомые параметры нейтронного потока

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{A_i^{exp} - A^{(model)_i}}{\sigma_i} \right)^2 + \left(\frac{T_n - 317}{15} \right)^2$$

$$CR = 0,168 \pm 0.014$$

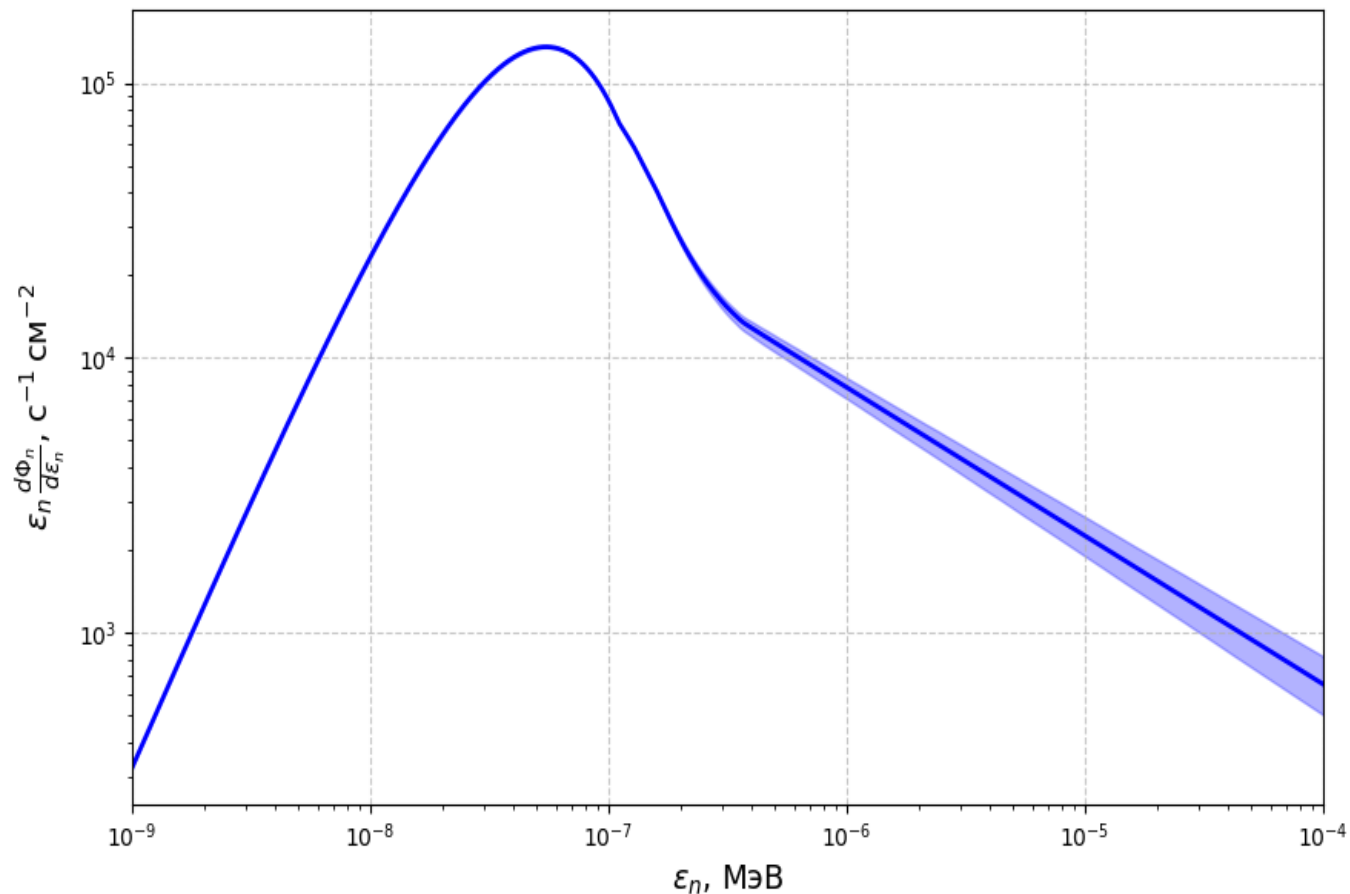
$$\alpha = 0,54 \pm 0.03$$

$$T_n = 317 \pm 15$$

Реконструкция спектральной плотности потока нейтронов

Тепловой поток, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	Мишень	$A_i^{(\text{model})}$, Бк	$\frac{A_i^{\text{model}} - A_i}{\sigma_i}$
$\Phi_{th} = 14,7 \cdot 10^5$	Au	482	0,2
	Au в кадмии	280	-0,4
$\Phi_{th} = 2,5 \cdot 10^5$	Mn	1630	0,3
	Au	2500	3,0
	In	28330	-0,6
	W	1280	0,9
$\Phi_{th} = 4,6 \cdot 10^5$	In	53280	-1,2
	In в кадмии	8700	2,0

Сопоставление модельных активностей с экспериментальными

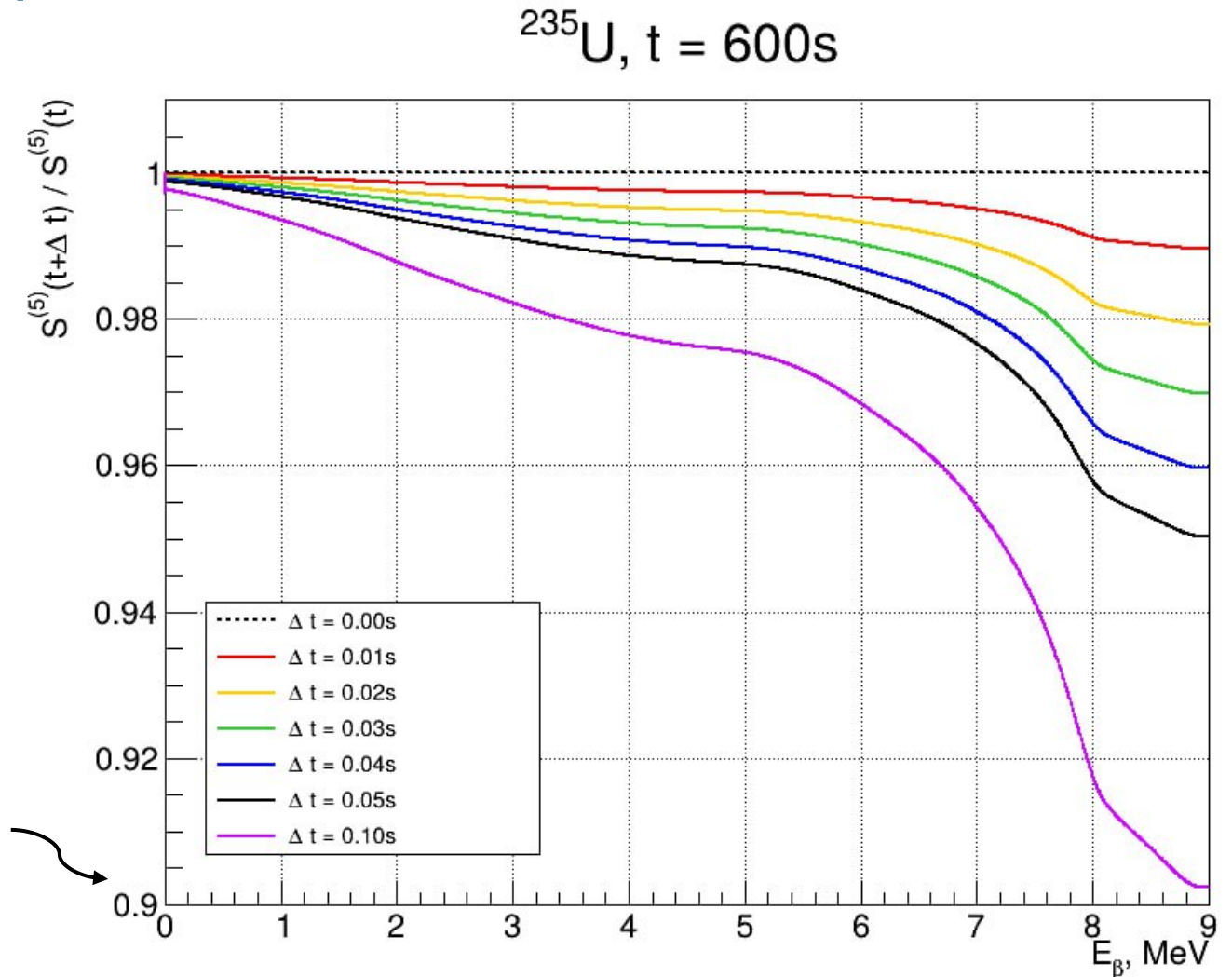


Реконструированная спектральная плотность нейтронов

Реализация алгоритма расчёта неравновесных спектров на основе верифицированной модели

- Разработанная модель была применена для расчёта динамики спектра β -частиц продуктов деления изотопа урана-235, после облучения в потоке нейтронов реконструированной спектральной плотности.

Динамика отношения спектра β -частиц в течение 0.1 секунды после облучения урана-235, длительностью 600 секунд, к спектру на момент конца облучения.



В настоящей работе была проведена верификация разработанной модели расчёта динамики спектров $\bar{\nu}_e$ и β -частиц продуктов деления ядерного топлива.

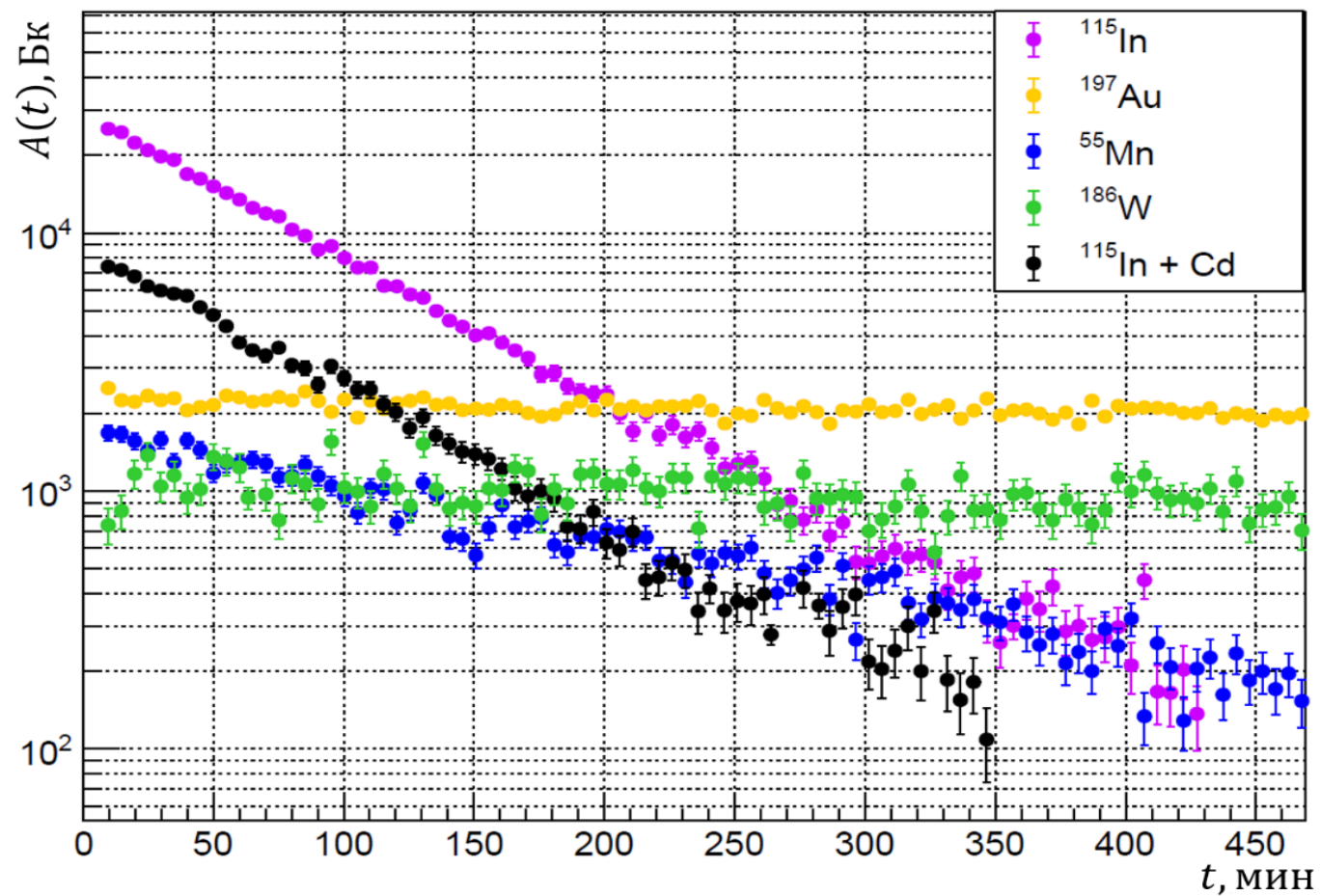
- Проверена корректность учёта поправок на самоэкранирование нейтронных полей на основе моделирования эксперимента по реконструкции спектральной плотности потока нейтронов.
- С помощью верифицированной модели была промоделирована динамика спектра β -частиц продуктов деления урана-235 после его облучения нейтронами реконструированной спектральной плотности потока.

Таким образом, разработанная модель расчёта динамики спектров может быть использована для моделирования различных неравновесных процессов в физике реакторных антинейтрино и возвращает корректные результаты, согласующиеся с экспериментальными данными.

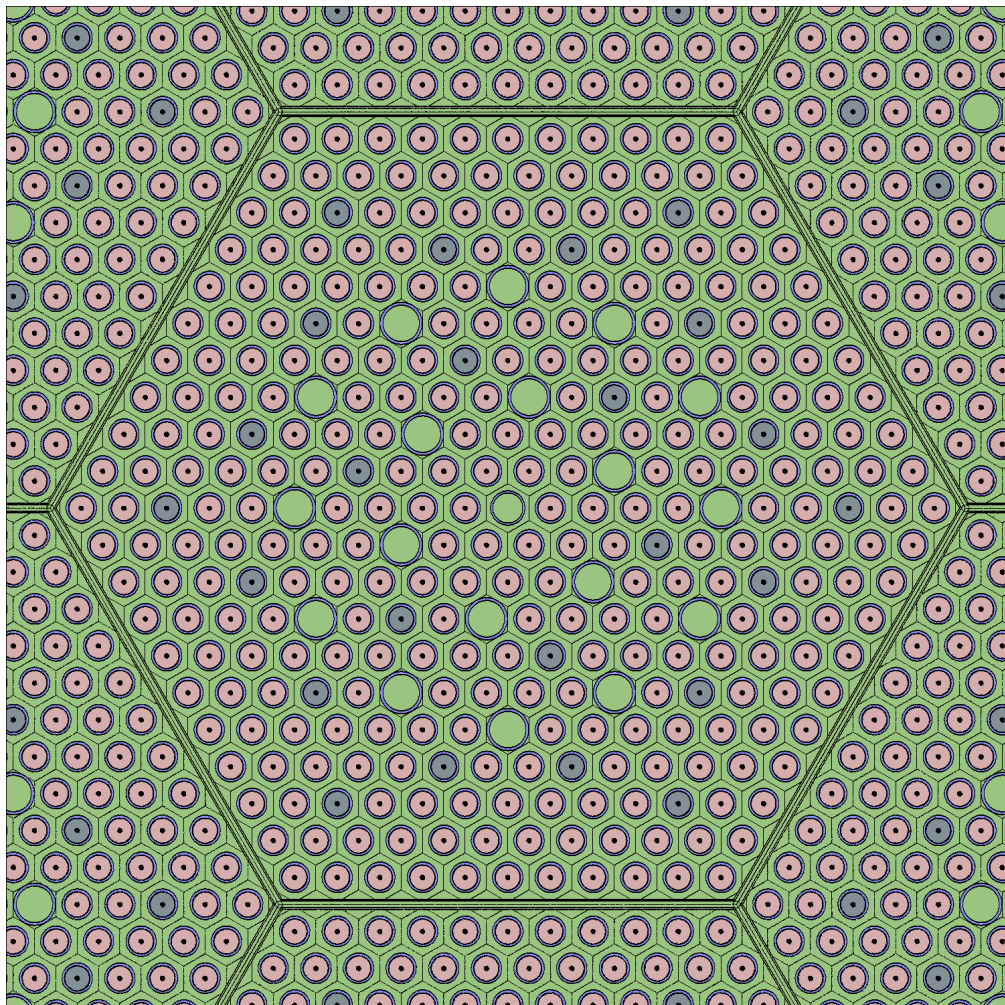


**Спасибо
за внимание!**

Кривые спада активностей облученных индикаторов



Заложенная модель ТВС реактора ВВЭР-1000



Модель ТВС

C49G6

C49Z4

C44Z4

Обогащение

4.92%

4.85%

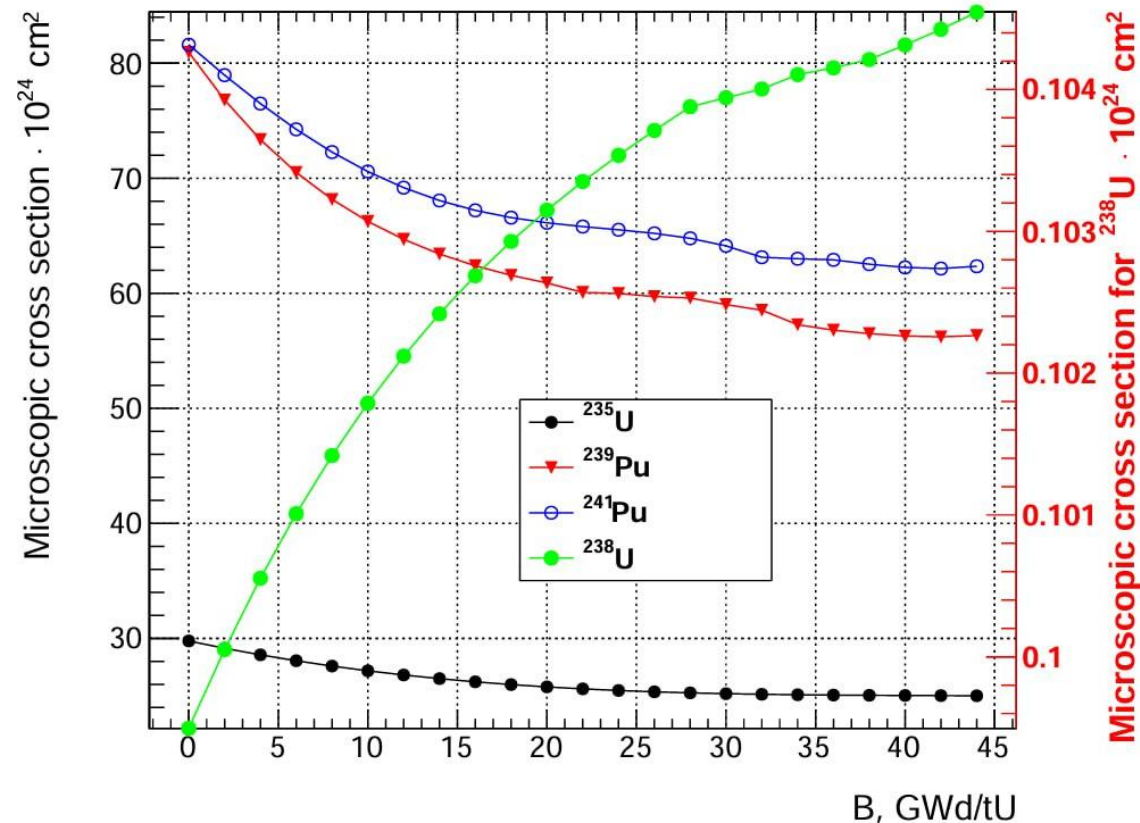
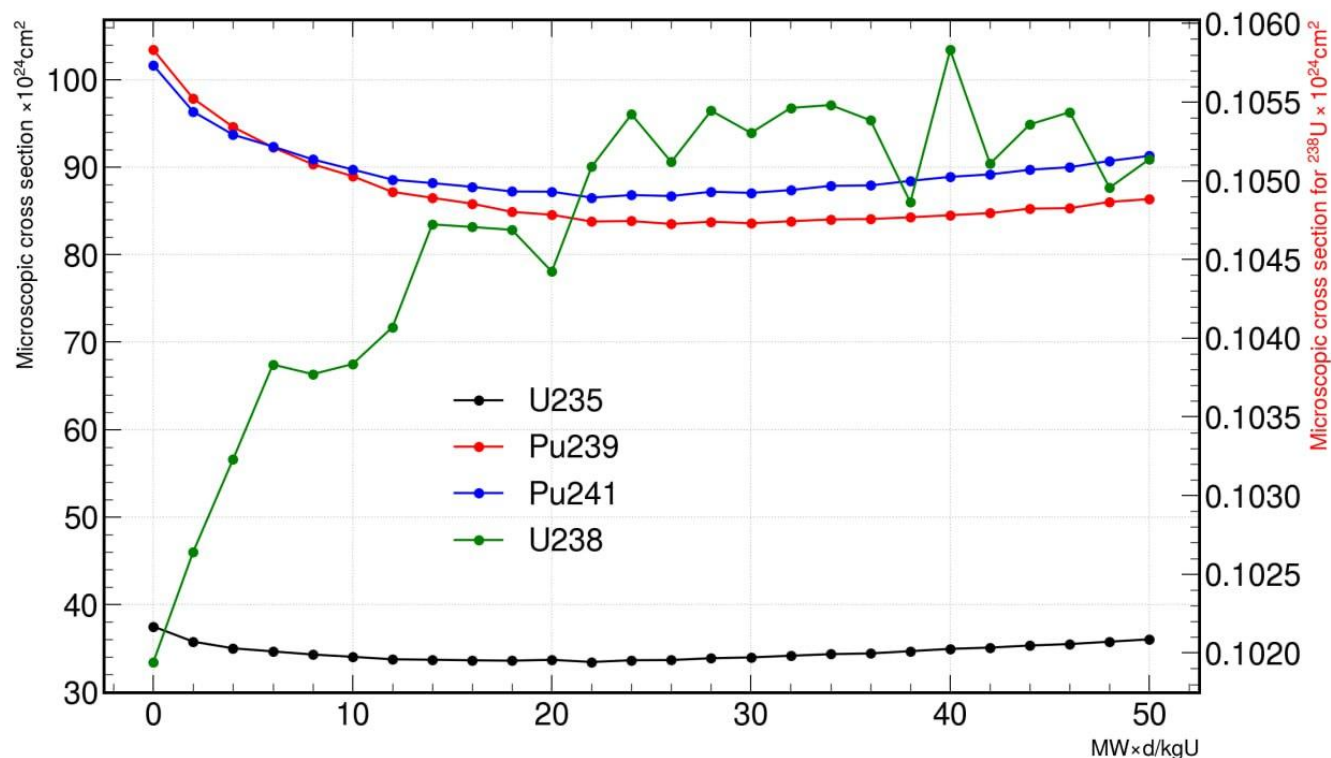
4.34%

Геометрия ТВС C49Z4, заложенная в модель.

Сводная информация об этапах эксперимента

Мишень	Длительность облучения t_{int}	Время выдержки t_{exp}	Активность на момент конца облучения
Au	1331 мин	7.3 мин	(0.47 ± 0.05) кБк
Au в кадмиевом чехле 0.5 мм	2722 мин	7.1 мин	(0.30 ± 0.05) кБк
Стопка фольг	1412 мин	4.7 мин	(1.6 ± 0.1) кБк (Mn)
			(2.2 ± 0.1) кБк (Au)
			(28.8 ± 0.8) кБк (In)
			(1.1 ± 0.2) кБк (W)
In	146.8 мин	3.8 мин	(53.4 ± 0.1) кБк
In в кадмиевом чехле 0.5 мм	70.8 мин	4.4 мин	(8.0 ± 0.1) кБк

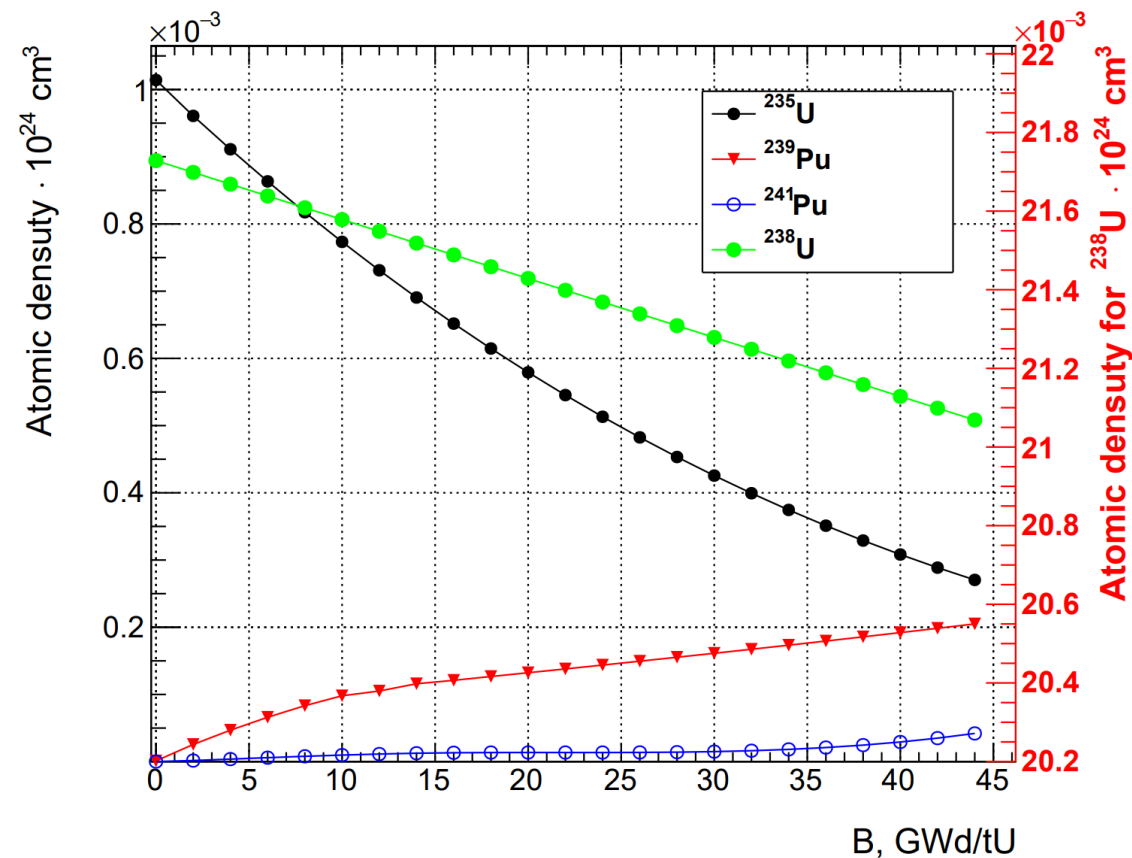
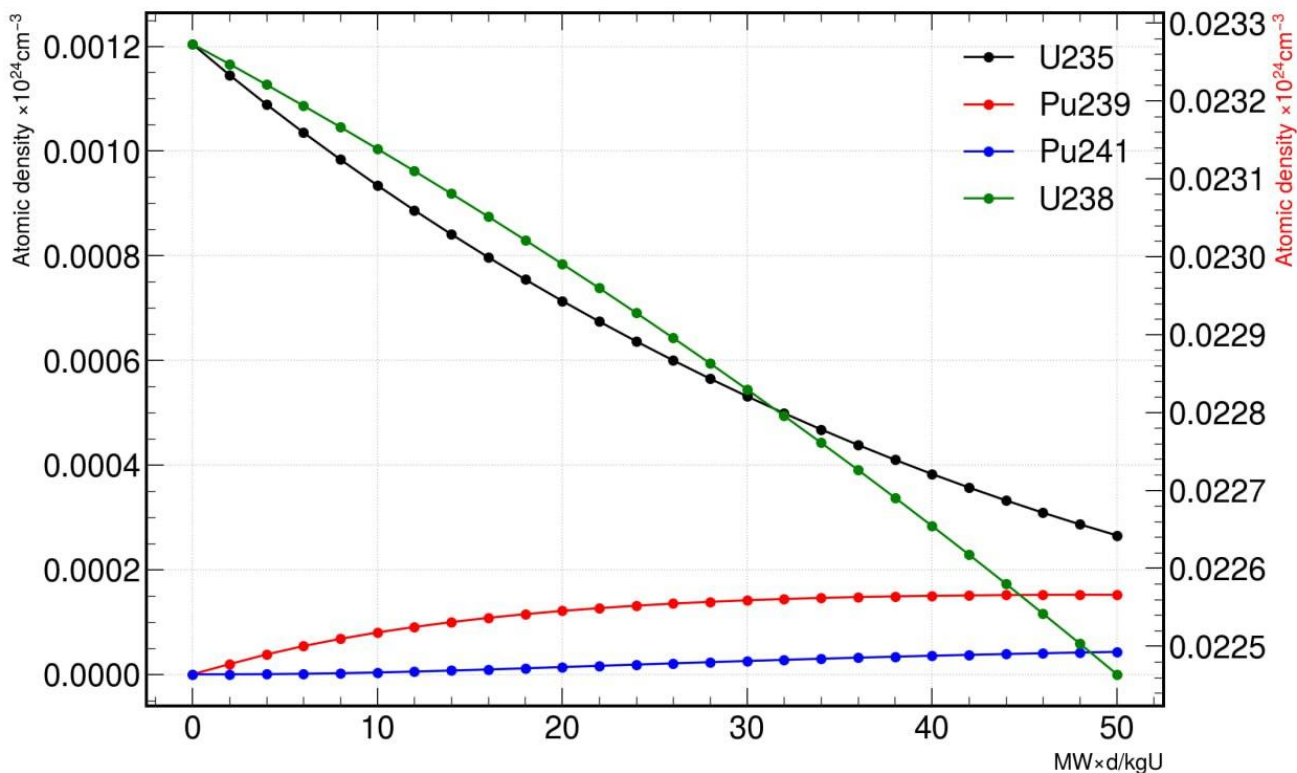
Верификация работы модели на расчёте динамики одногрупповых сечений деления



Динамика одногрупповых сечений деления основных изотопов в топливе реактора ВВЭР-1000 в зависимости от глубины выгорания и аналогичная динамика реактора PWR, представленная в работе [1].

[1] X. B. Ma, R. M. Qiu, and Y. X. Chen. A new mc-based method to evaluate the fission fraction uncertainty at reactor neutrino experiment. 07. 2016.

Верификация работы модели на расчёте динамики концентраций изотопов топлива



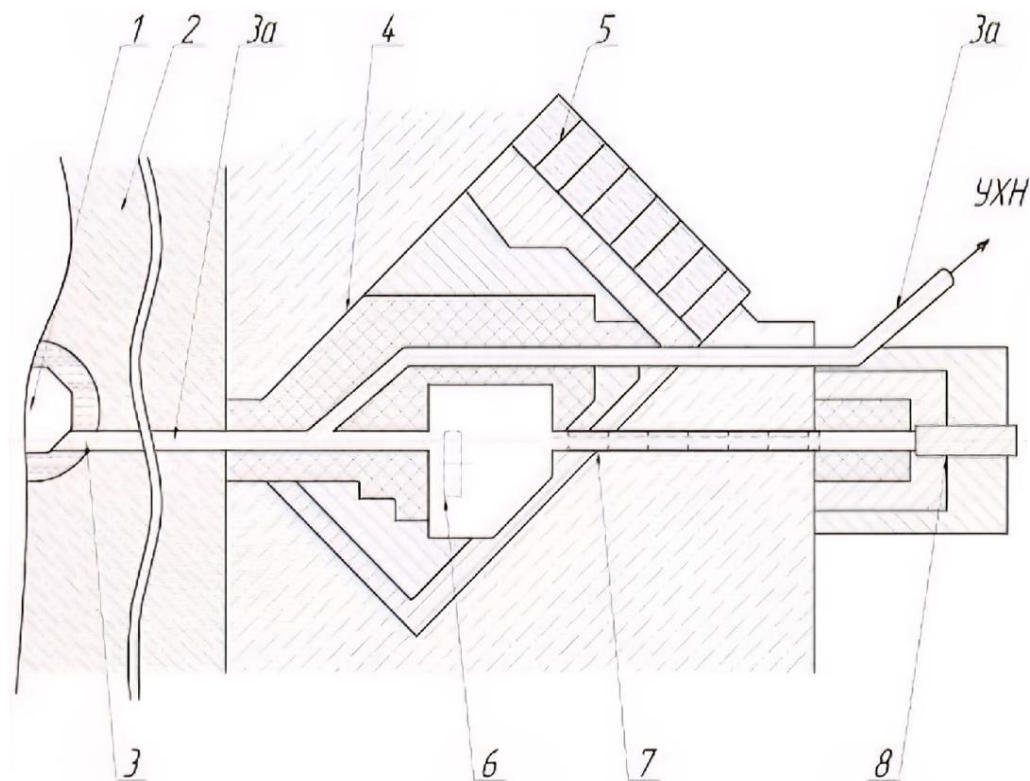
Динамика атомных плотностей основных изотопов в топливе реактора ВВЭР-1000 в зависимости от глубины выгорания и аналогичная динамика реактора PWR, представленная в работе [1].






[1] X. B. Ma, R. M. Qiu, and Y. X. Chen. A new mc-based method to evaluate the fission fraction uncertainty at reactor neutrino experiment. 07. 2016

Нейтронно-физические характеристики используемых изотопов

Изотоп	Сечение активации тепловыми нейтронами (25,3 мэВ) σ_{a0}	Фактор Весткота при комнатной температуре g	Положение первого резонанса	Резонансный интеграл активации I_a
^{115}In	(160 ± 2) барн (по ^{116}In)	1,023	~ 1,5 эВ	(2600 ± 80) барн (по ^{116}In)
^{197}Au	(98,65 ± 0,09) барн	1,0086	~ 5 эВ	(1550 ± 30) барн
^{186}W	(38,1 ± 0,5) барн	1,005	~ 20 эВ	(480 ± 15) барн
^{55}Mn	(13,36 ± 0,05) барн	1,004	~ 300 эВ	(13,3 ± 0,5) барн

Схема формирования пучка тепловых нейтронов ГЭК-11 исследовательского реактора ИР-8.



-  - сталь
-  - свинец
-  - тяжелый бетон
-  - дистиллированная вода
-  - барированный полиэтилен

Эксперимент по определению доли тепловых и надтепловых нейтронов

Калибровка: $^{152}_{63}\text{Eu}$ γ -кванты линия $E = 411,1165$ кэВ
 Вероятность испускания линии $p = 0.02235$.

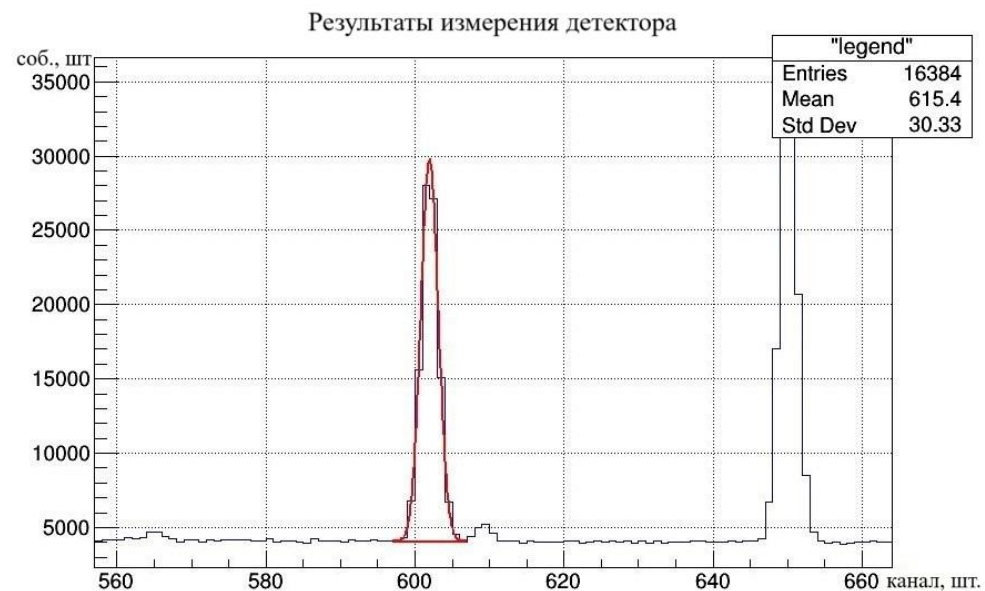


Рис. 1 — Результат измерения детектором γ -квантов при его калибровке с помощью образца ^{152}Eu .

Итого: эффективность регистрации $\varepsilon = 0.00087$.

Определение скорости счёта в начальный момент времени:

