



**Выпускная квалификационная работа бакалавра**  
**Моделирование измерительного модуля**  
**детектора реакторных антинейтрино на**  
**основе пластикового сцинтиллятора**

**Студент: Д.С. Прокопов**

**Научный руководитель: Д.В. Попов**

**Научный консультант: Д.А. Чмыхало**

**Москва, 2025**



# Введение

Нейтринный метод контроля состояния реактора является универсальным и применим для любых типов реакторов (ВВЭР, ИРТ, РБМК, БН).

**Регистрация антинейтринного излучения позволяет решать следующие задачи:**

- Дистанционный и независимый от оператора энергоблока контроль энерговыработки реактора;
- Мониторинг отработавшего ядерного топлива;
- Выявление несанкционированных режимов работы реактора.

При регистрации антинейтрино используется метод задержанных совпадений. Сначала регистрируется позитрон, после чего – нейтрон. По энергии позитрона можно восстановить энергию антинейтрино. Нейтрон служит индикатором протекания реакции ОБР.



Реакция обратного бета-распада

# Цели и задачи

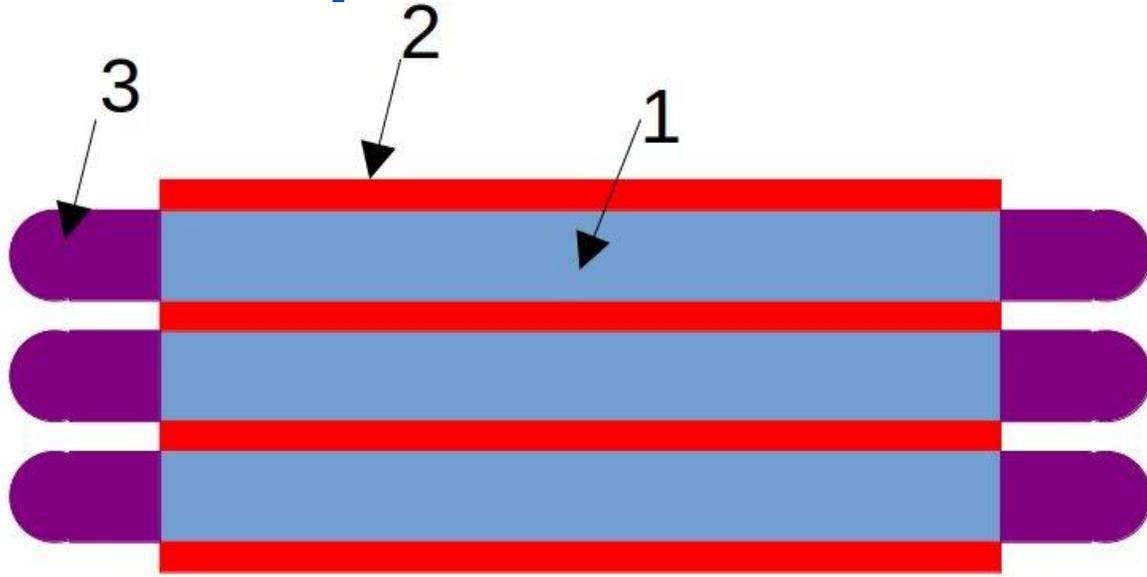
## Цель

Моделирование измерительного модуля детектора реакторных антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора.

## Задачи:

- 1) Определение характеристик опытного образца сцинтиллятора;
- 2) Определение оптимальных размеров пластикового сцинтиллятора;
- 3) Исследование различных нейтронных поглотителей.

# Схема сборки детектора реакторных антинейтрино



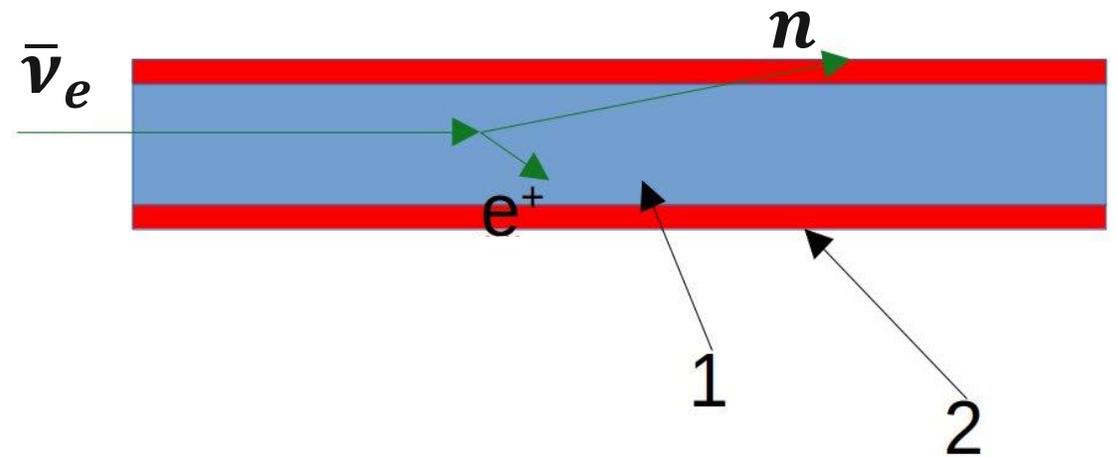
1 – твердотельный органический сцинтиллятор 5·5·70 см (полистирол + р-терфенил + РОРОР);

2 – нейтронный поглотитель;

3 – ФЭУ.



Ядро атома Н



# Определение световыхода сцинтиллятора

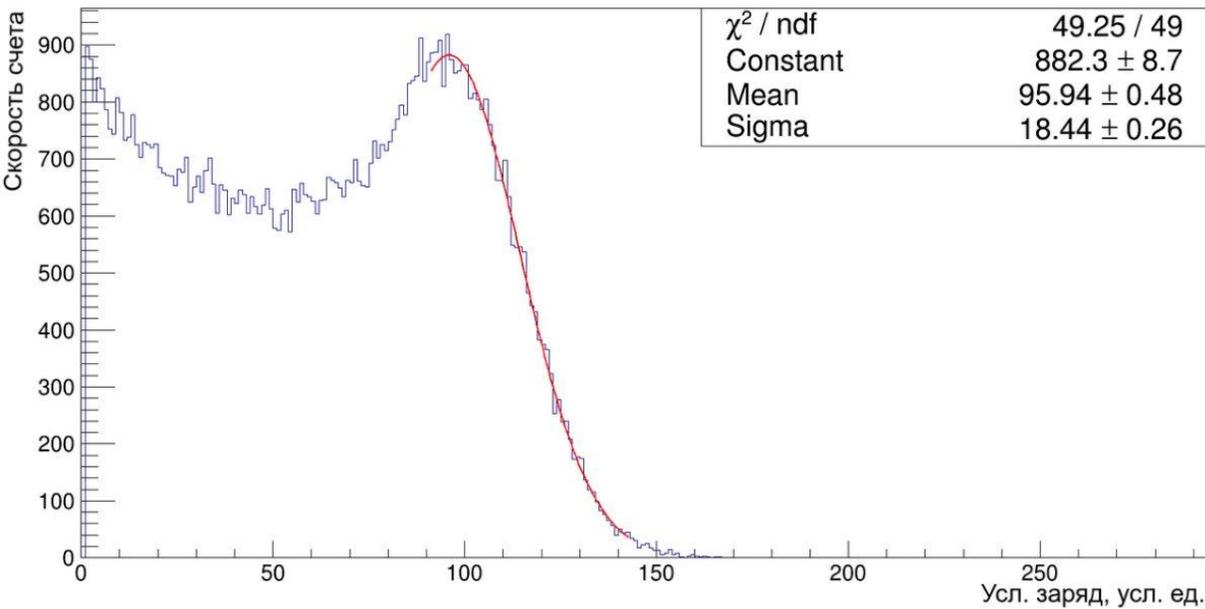


Рис.1. Модельный спектр гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  в сцинтилляторе

$$\Delta = \frac{\sigma}{\mu} = (19,3 \pm 0,2)\%$$

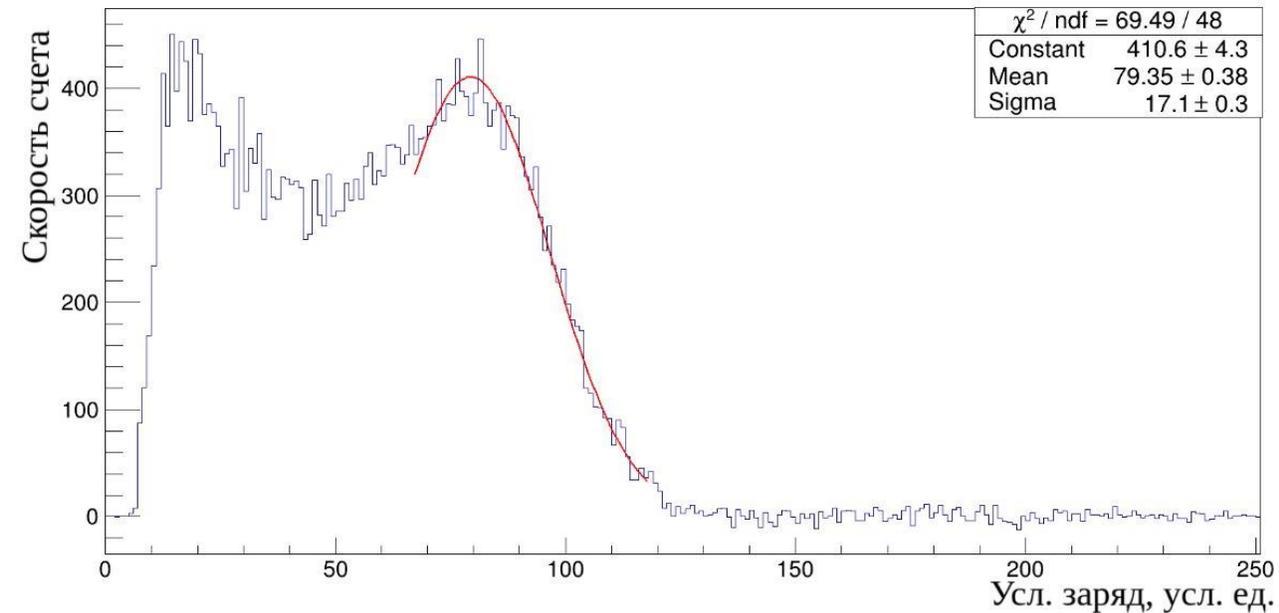
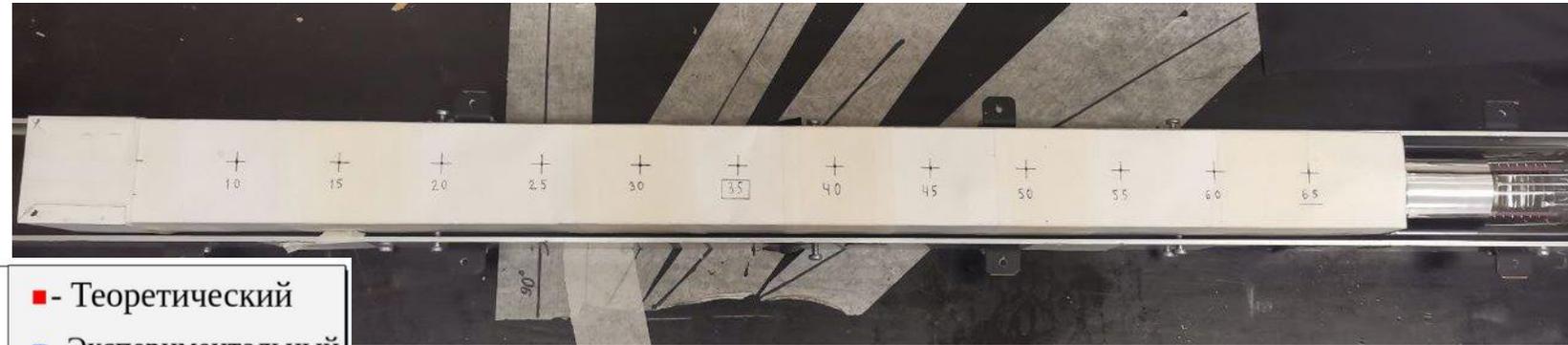
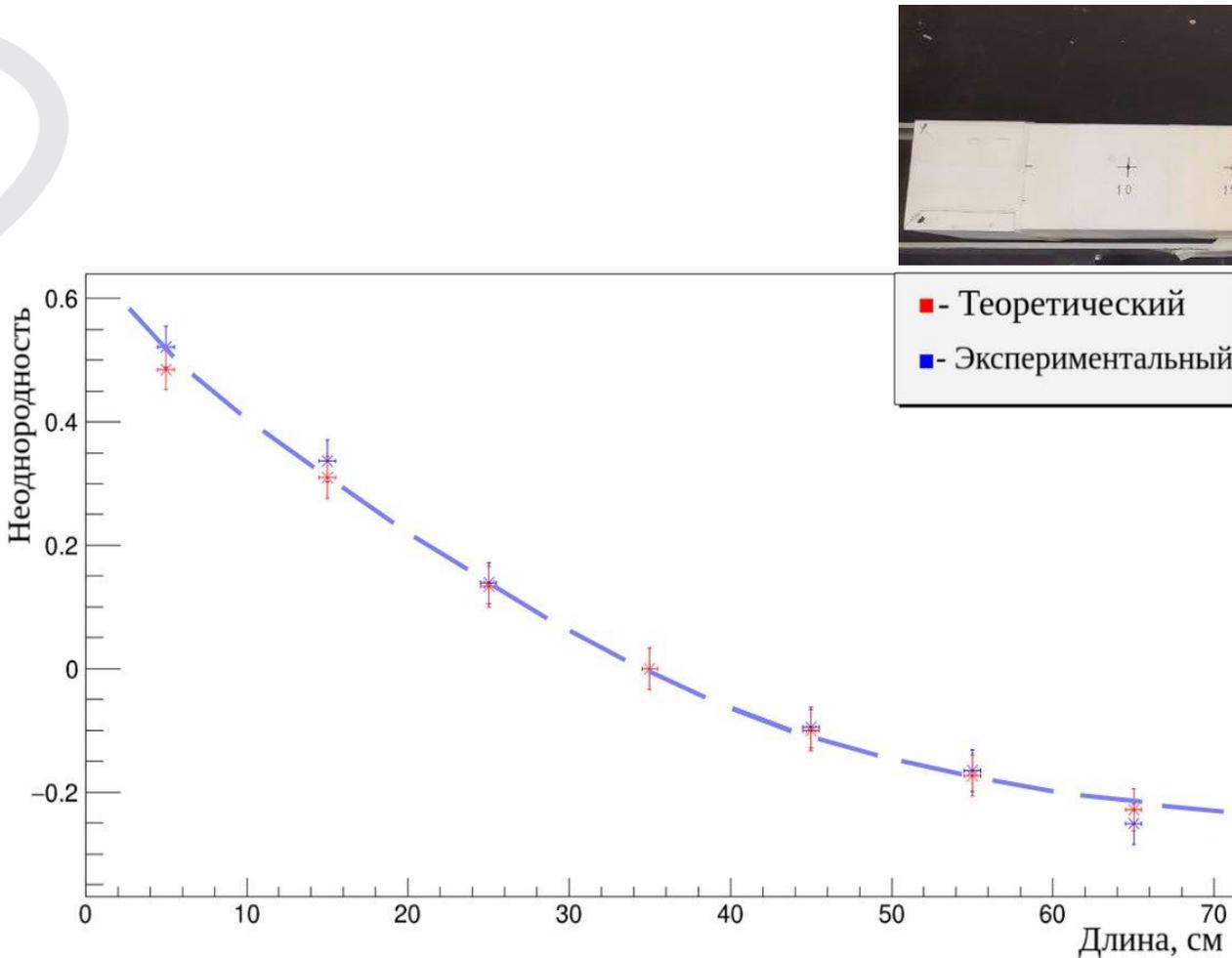


Рис.2. Экспериментальный спектр гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  в сцинтилляторе

$$E_{\text{компт.края}} = 477 \text{ кЭВ}$$

Световыход: 10 000 фотонов/МэВ

# Определение длины ослабления света сцинтиллятора



$$h(x) = \frac{\bar{\mu}(x)}{\bar{\mu}(l/2)} - 1 \quad (1)$$

$$f(x) = e^{-\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{2}} - 1 \quad (2)$$

$$\lambda = (300 \pm 10) \text{ см}$$

Рис.3. Экспериментально полученный и модельный графики неоднородности светособирания в пластиковом сцинтилляторе

# Определение оптимальных размеров пластикового сцинтиллятора

Отклонение от оптимальности

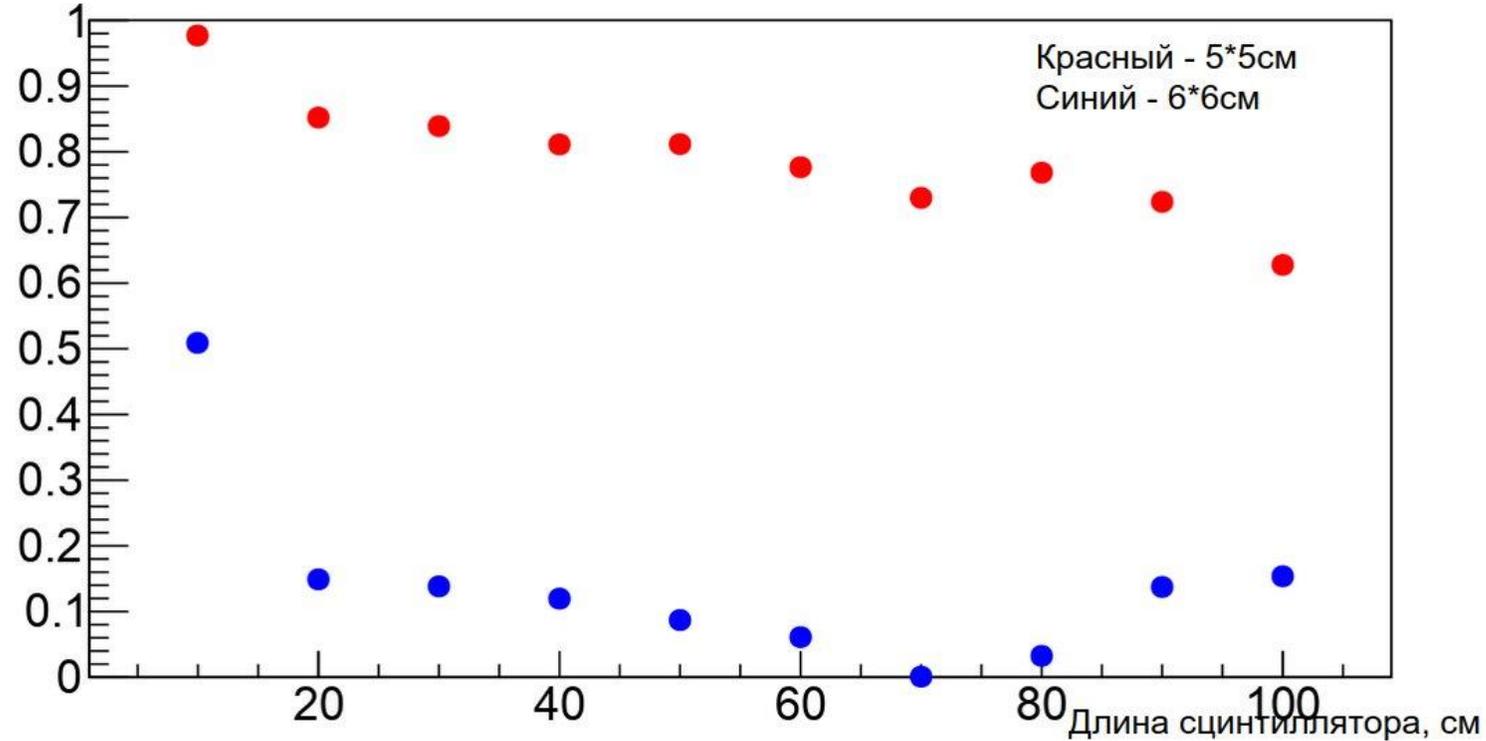


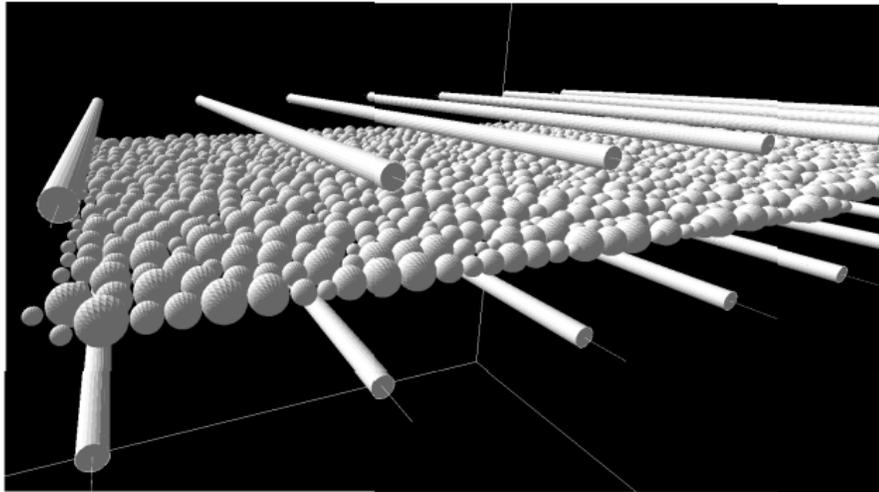
Рис.4. Уровень оптимальности для сечений сцинтиллятора 5\*5, 6\*6см

## Требования:

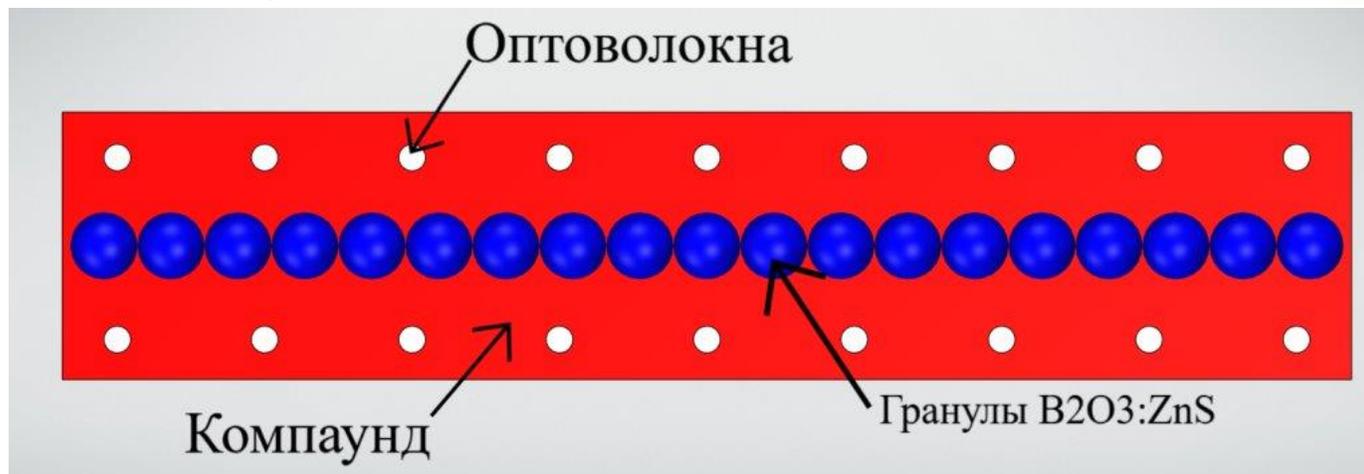
- Максимальное светособирание ( $\eta_{\text{св}}$ );
- Минимальная эффективность захвата нейтронов на водороде ( $\eta_{\text{захв}}$ );
- Максимальная эффективность термализации нейтронов ( $\eta_{\text{терм}}$ ).

$$\text{«Оптимальность»} = \left| 1 - \frac{|\eta_{\text{св}} - \eta_{\text{захв}}|}{\eta_{\text{св}} + \eta_{\text{захв}}} \right| + |1 - \eta_{\text{терм}}|$$

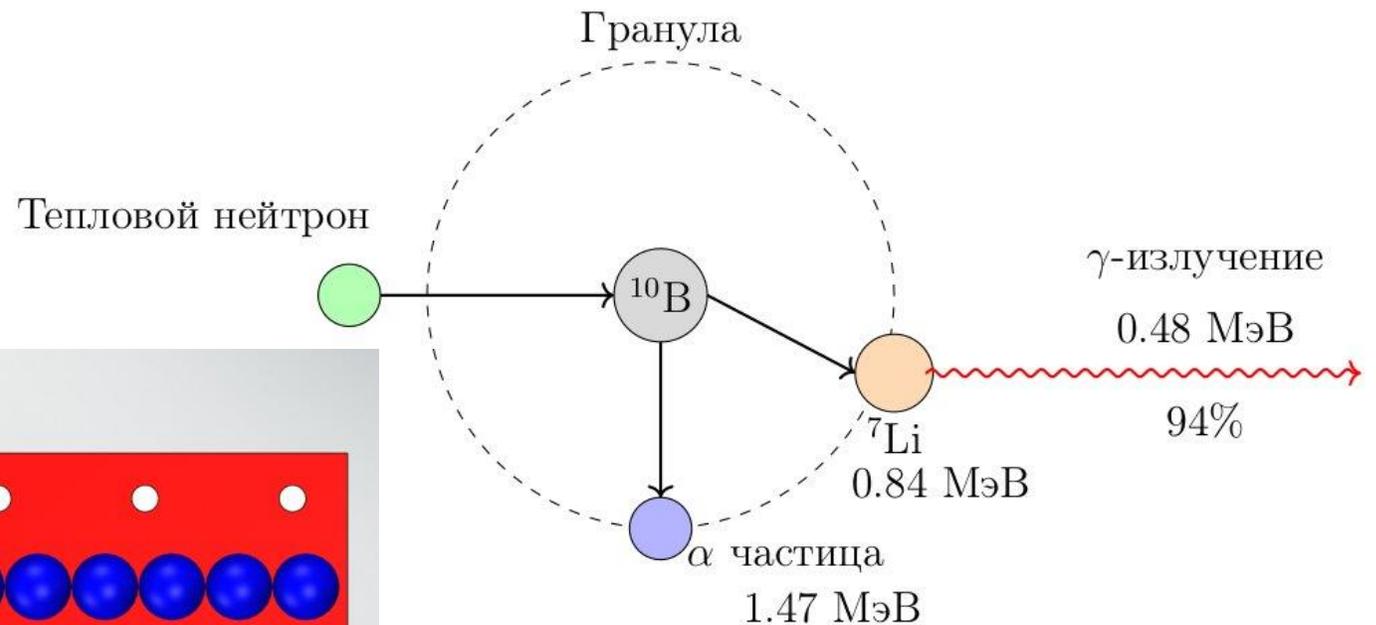
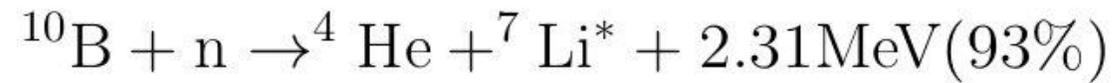
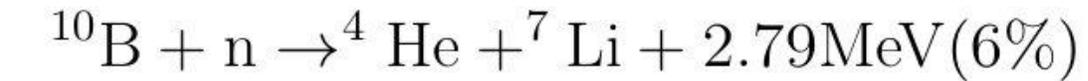
# Схема нейтронного поглотителя на основе $B_2O_3:ZnS(Ag)$



а) Модель установки



б) Схема установки



$$\sigma_{\text{захв}} = 764 \text{ барн(тепл. n)}$$

# Расчет эффективности захвата нейтронов и эффективности регистрации

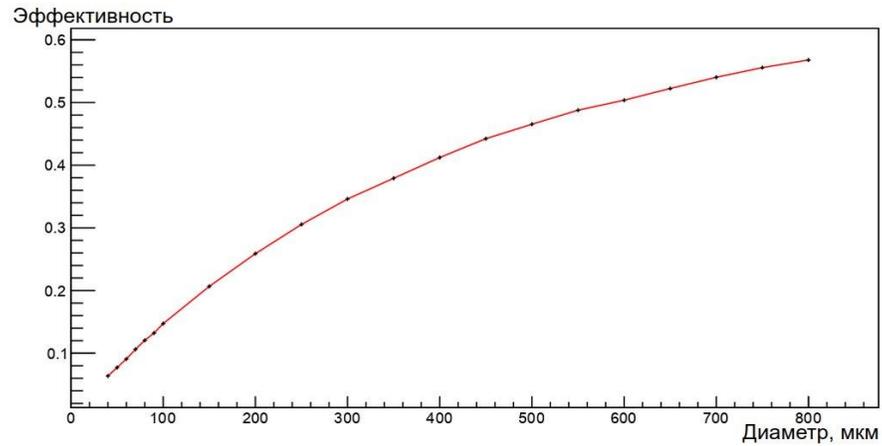


Рис.5. Эффективность захвата нейтронов в поглотителе

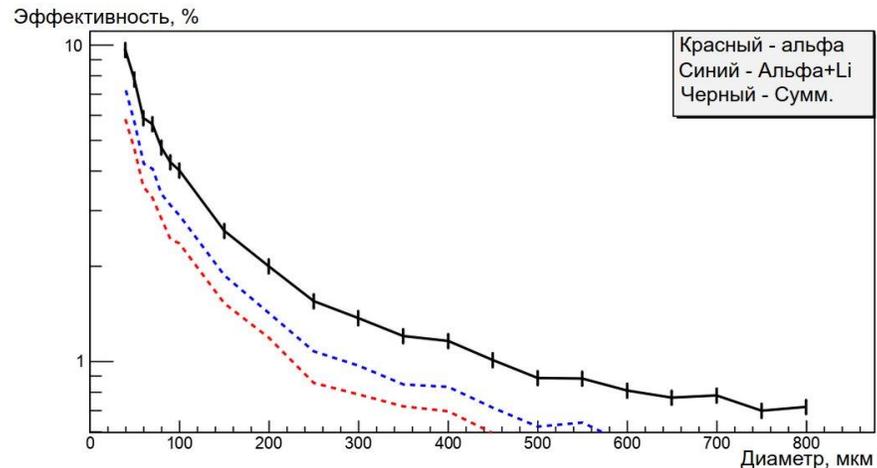


Рис.6. Эффективность вылета частиц из гранулы

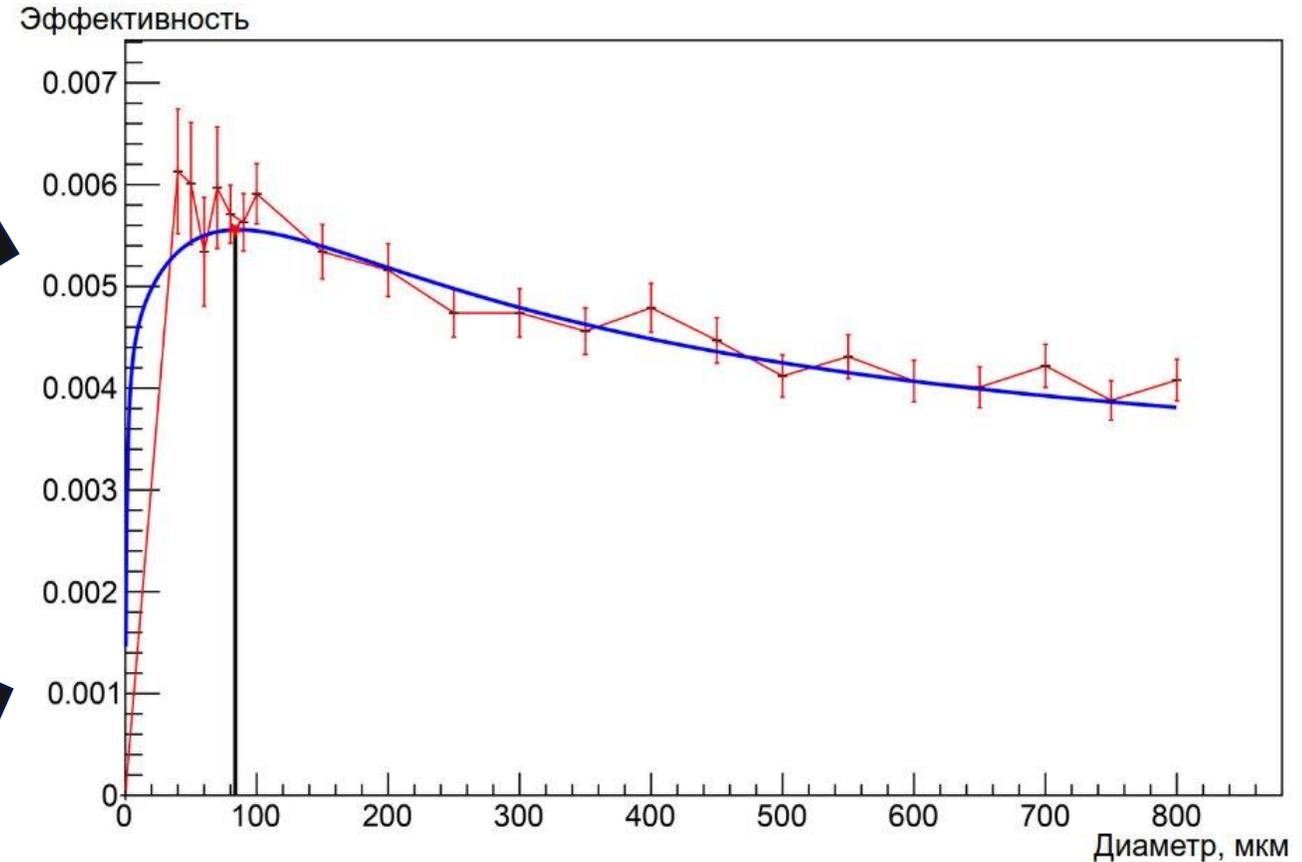
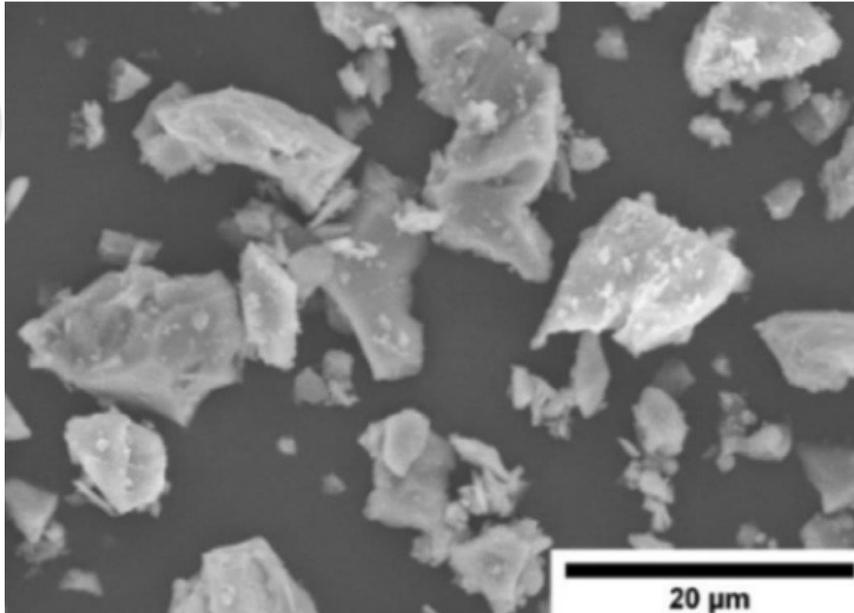


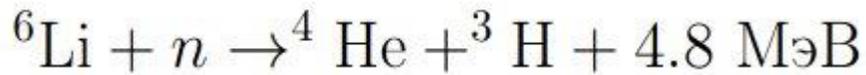
Рис.7. Зависимость эффективности регистрации поглотителя от диаметра гранулы

**Получен оптимальный диаметр  $D=80$  мкм**

# Схема нейтронного поглотителя на основе $\text{Li}_2\text{CaSiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ (LCS)



Представляет собой поликристаллы в связующем звене (эпоксидная смола).



$\sigma_{\text{захв}} = 945$  барн (тепл. n)

## Преимущества:

- Быстрая кинетика высвечивания;
- Практически гарантированное излучение света после захвата нейтрона на  ${}^6\text{Li}$ .

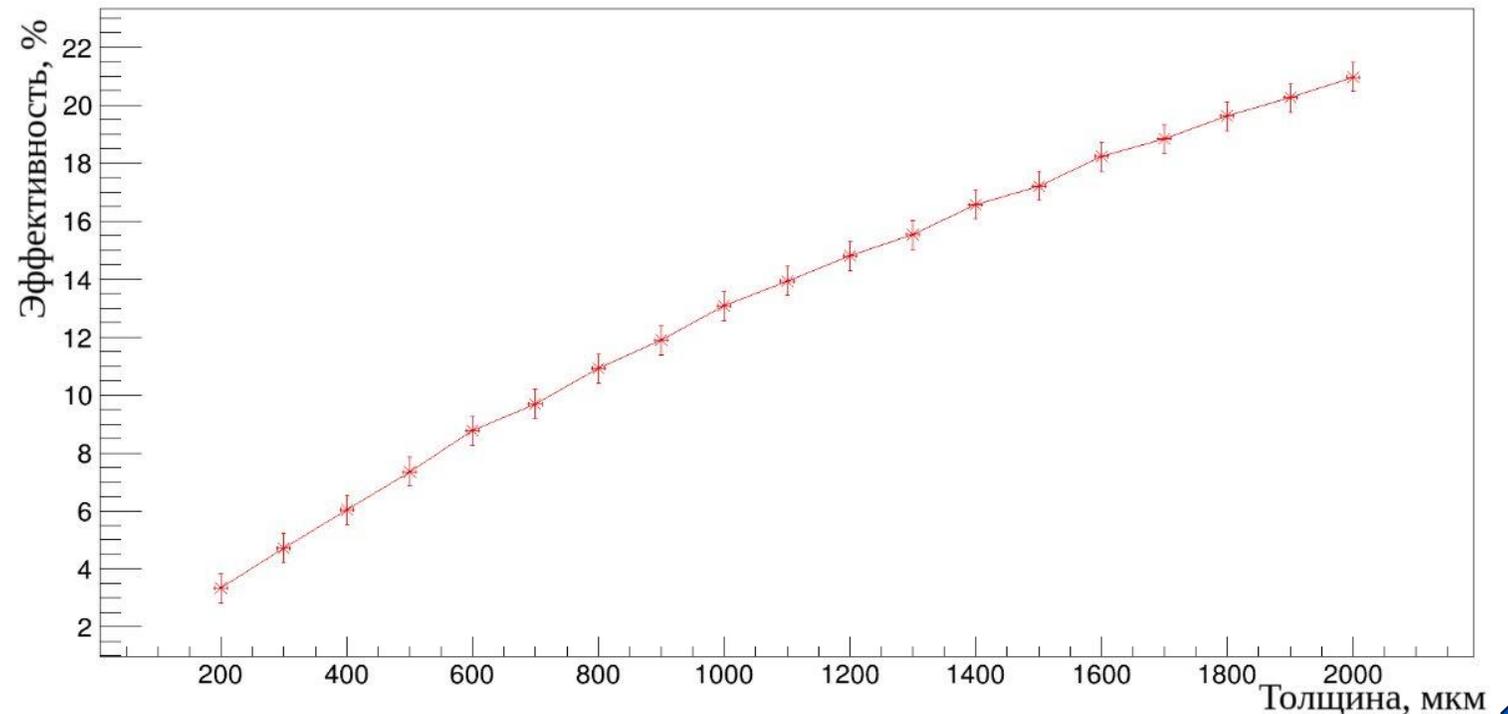
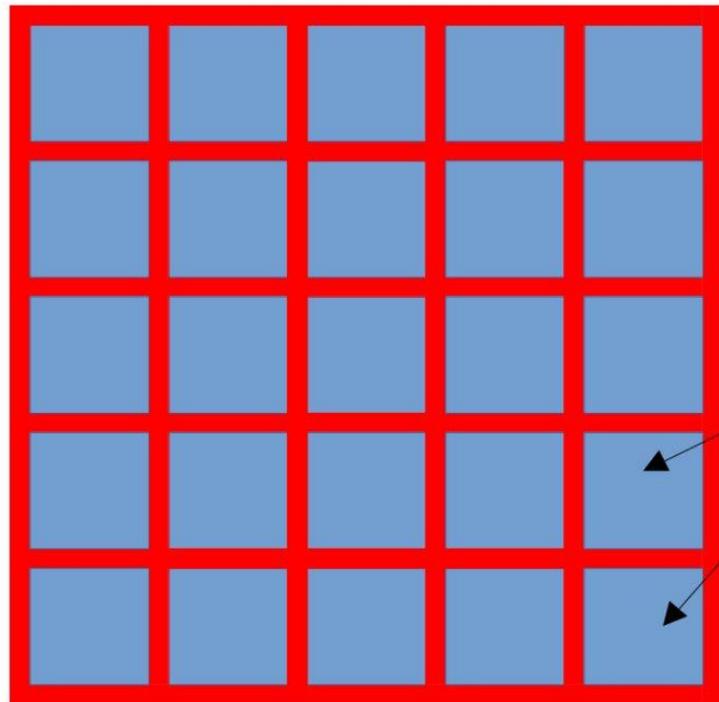


Рис.8. Эффективность захвата нейтронов в поглотителе на основе LCS

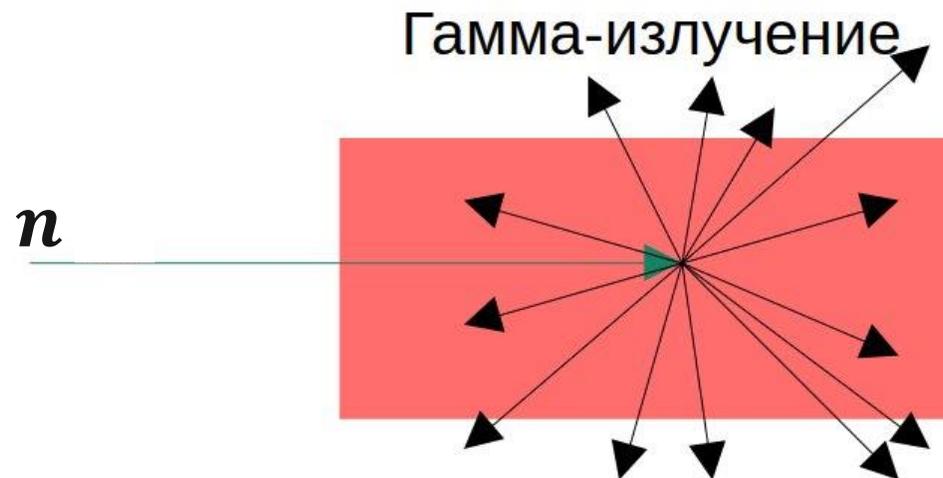
# Схема модуля на основе Cd/Gd поглотителей



1

2

1 – Кадмиевый поглотитель в листах/  
Гадолиниевый поглотитель в виде  
краски;  
2 - Сцинтиллятор.



$$E_{\gamma}(\text{сумм})=9 \text{ МэВ}$$

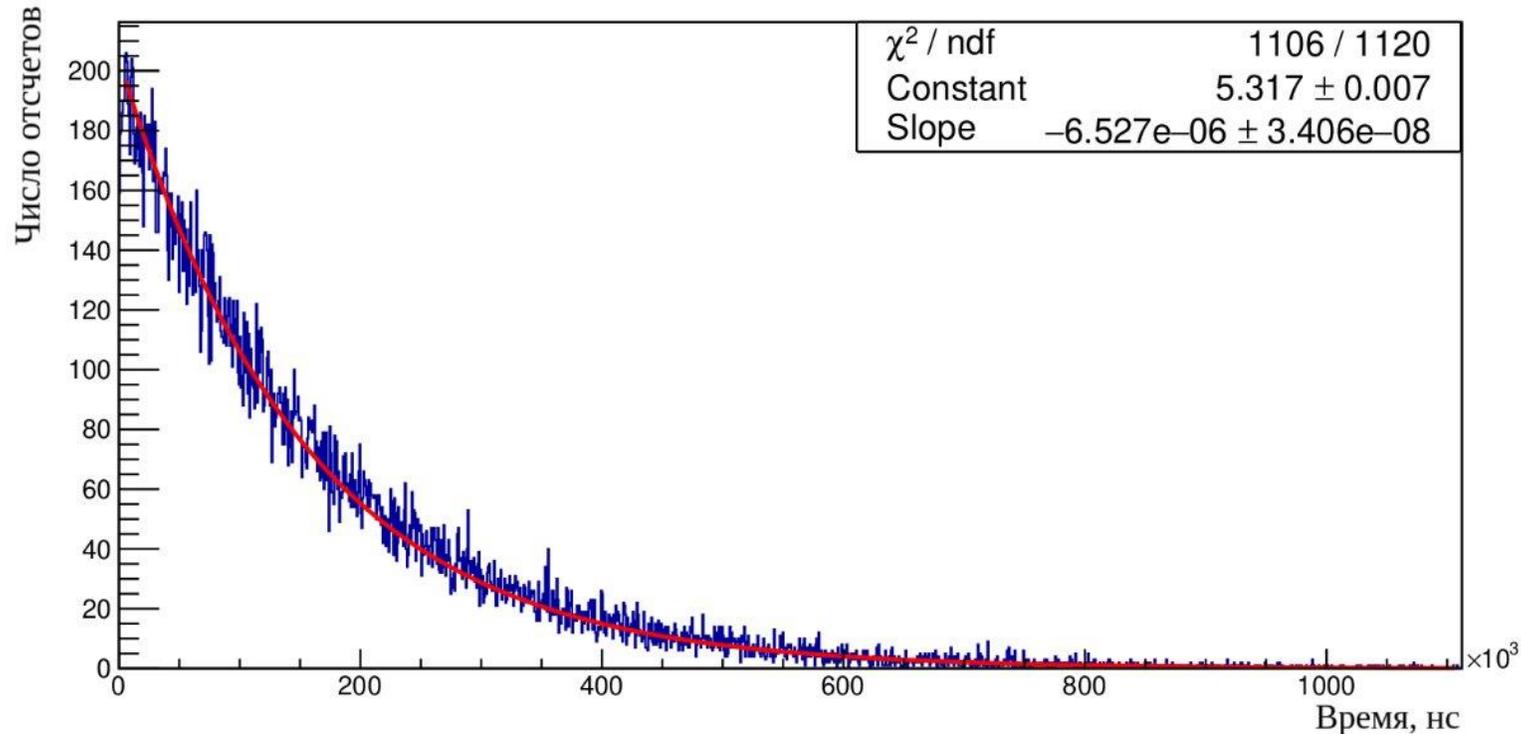
$$\sigma_{\text{захв}}=3800 \text{ барн}$$

# Сравнение нейтронных поглотителей по захватам нейтронов

Количество модулей в сборке	Cd, 0,5 мм	Gd, 0,5 мм	LCS, 0,6 мм
1	0,29	0,32	0,13
3x3	0,88	0,88	0,69
5x5	0,91	0,92	0,73
Насыщение	0,92	0,92	0,75

Насыщение – максимальная доля захватываемых поглотителем нейтронов в сборке из нескольких модулей

# Определение времен жизни нейтрона в поглотителях



**Время жизни нейтрона в сборке:**

$$\tau_{Cd} = (28 \pm 2) \text{ мкс}$$

$$\tau_{Gd} = (28 \pm 2) \text{ мкс}$$

$$\tau_{LCS} = (153 \pm 5) \text{ мкс}$$

Рис.9. Распределение по времени жизни нейтрона в поглотителе на основе LCS

## Ширина временного окна:

- 100 мкс для кадмиевого и гадолиниевого поглотителя;
- 500 мкс для поглотителя на основе LCS.

# Заключение

- Проведена калибровка модели, определены длина ослабления и световой выход экспериментальных образцов. Их значения равны соответственно  $\lambda = 300 \pm 10$  см и  $L = 10000$  фотонов/МэВ.
- Проведено исследование для определения оптимальных размеров сцинтиллятора. В результате оптимальные размеры сцинтиллятора равны  $6 \cdot 6 \cdot 70$  см.
- Проведено сравнение нейтронных поглотителей. С точки зрения эффективности захвата нейтронов выгоднее использовать кадмиевые пластины или гадолиниевую краску.
- Были определены времена жизни нейтронов в сборке из 400 модулей для различных нейтронных поглотителей. Значения составляют  $\tau_{Cd} = (28 \pm 2)$  мкс,  $\tau_{Gd} = (28 \pm 2)$  мкс,  $\tau_{LCS} = (153 \pm 5)$  мкс. По временам жизни нейтрона в поглотителях рассчитаны ширины временных окон, которые равны **100 мкс** для кадмиевых и гадолиниевых поглотителей, **500 мкс** для поглотителя с использованием LCS.

# Апробация

- Выступление на XI Всероссийском с международным участием Молодежном научном форуме "**OpenScience 2024**" (с публикацией сборника тезисов от 18.05.2025 г.), 13-15 ноября 2024 года, г. Гатчина;
- Выступление на XVIII Курчатовской междисциплинарной молодежной научной школе (с публикацией сборника аннотаций докладов), 27-30 мая 2025 года, г. Москва.

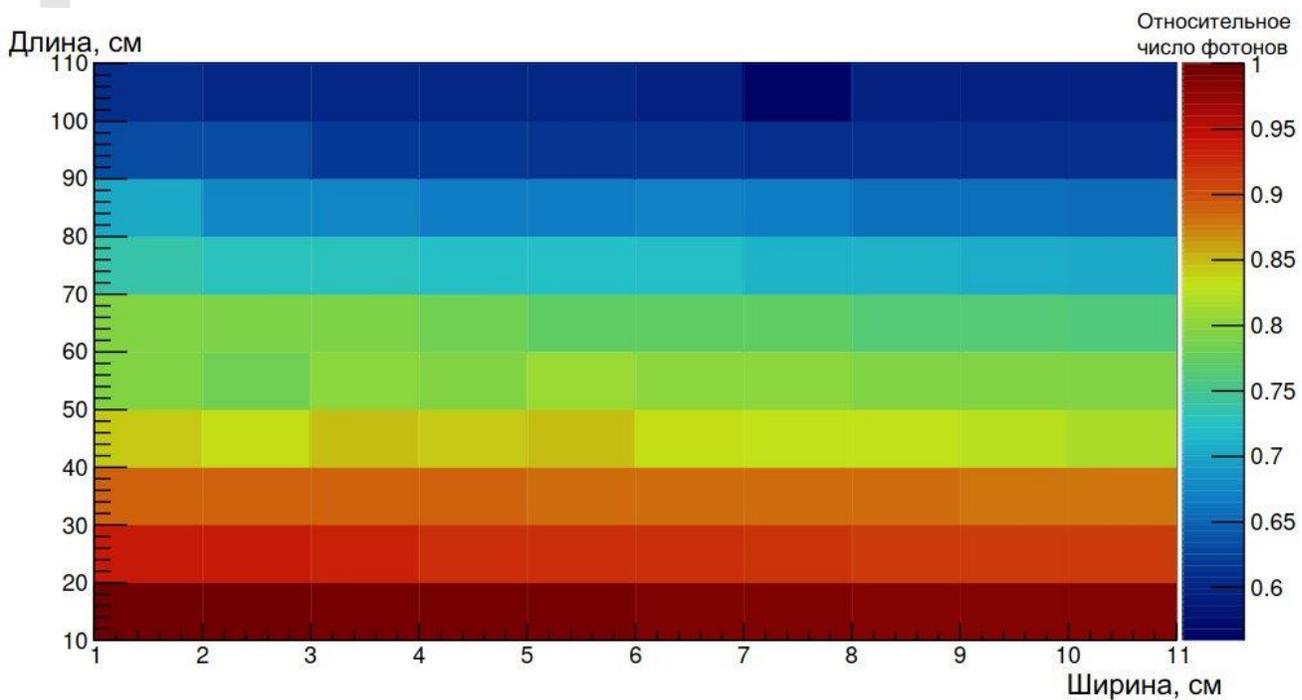


**МИФИ**

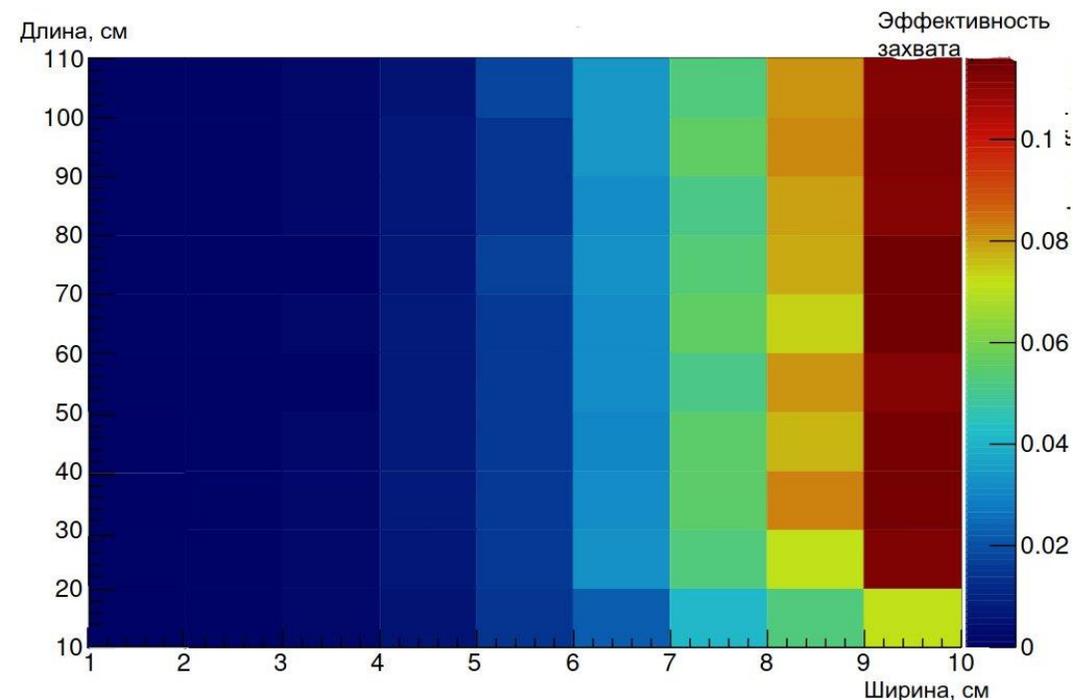
Национальный  
исследовательский  
ядерный университет

**Спасибо за внимание!**

# Доп. слайды

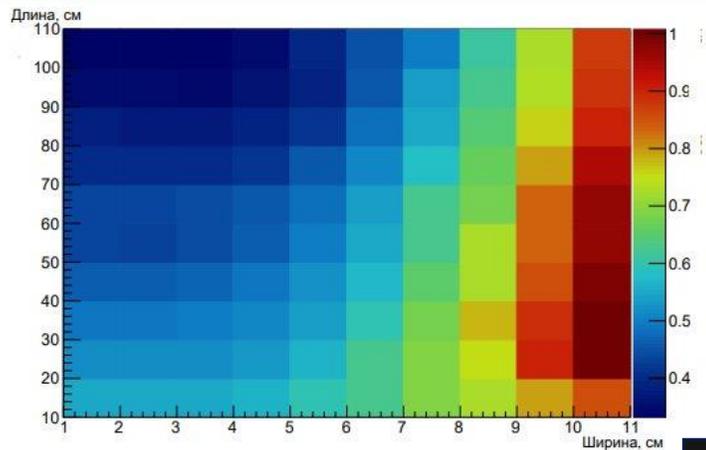


Зависимость светособирания от размеров сцинтиллятора

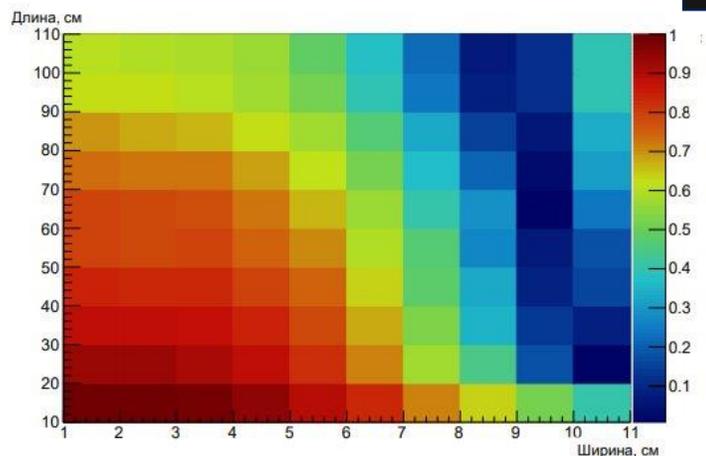


Зависимость эффективности захвата от размеров сцинтиллятора

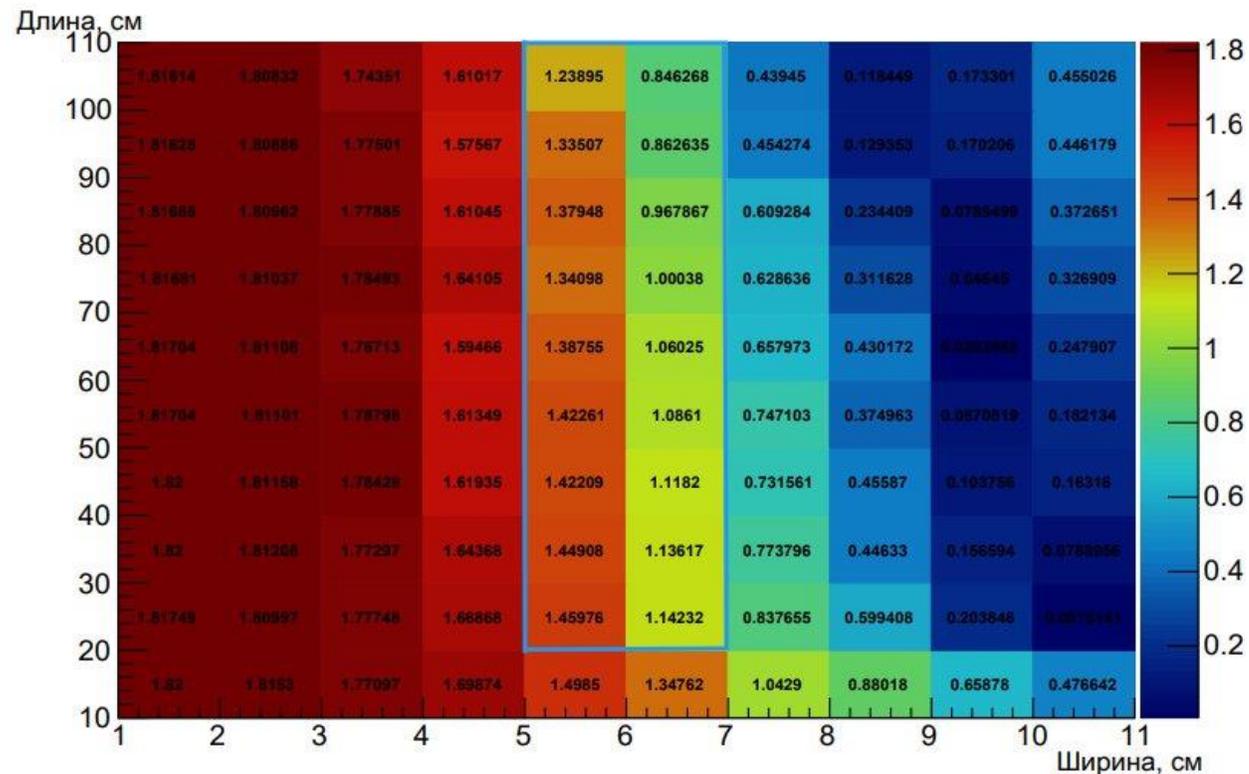
## Оптимизация размеров(2)



а) Сумма

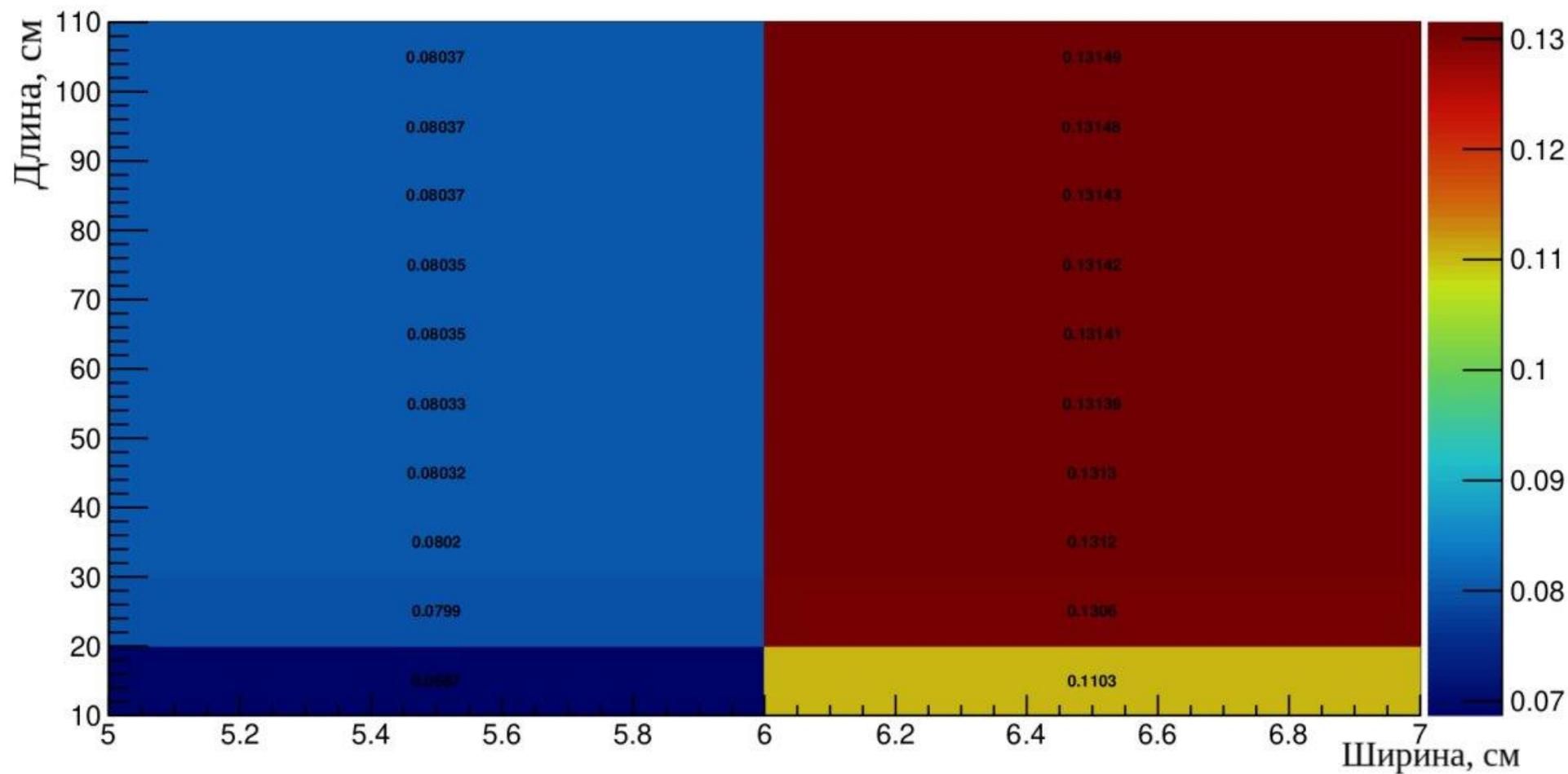


б) Разность



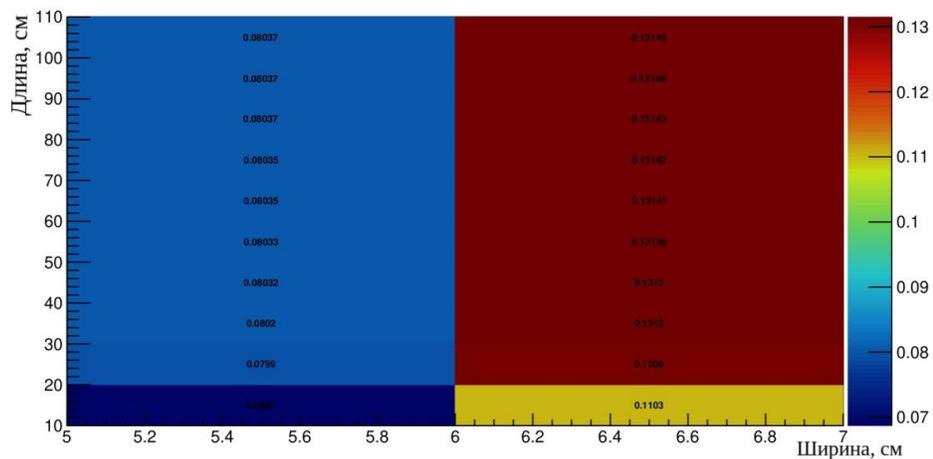
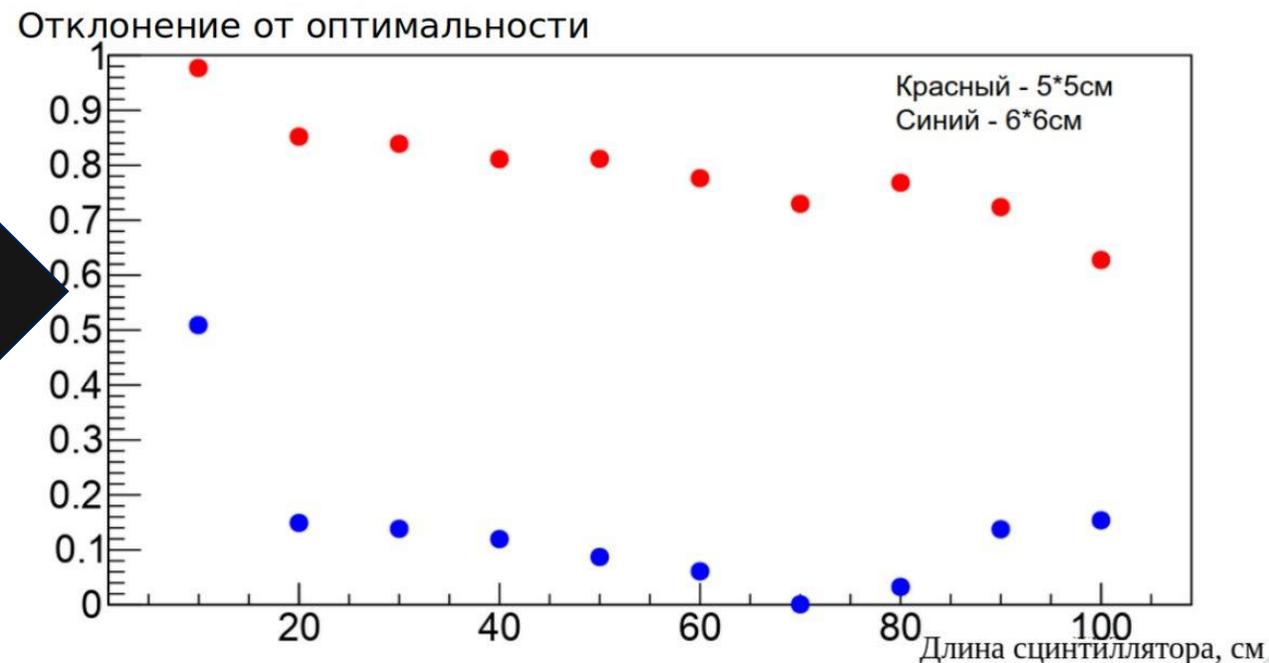
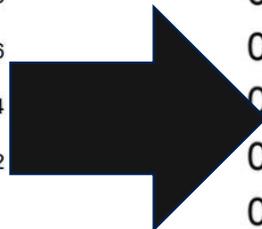
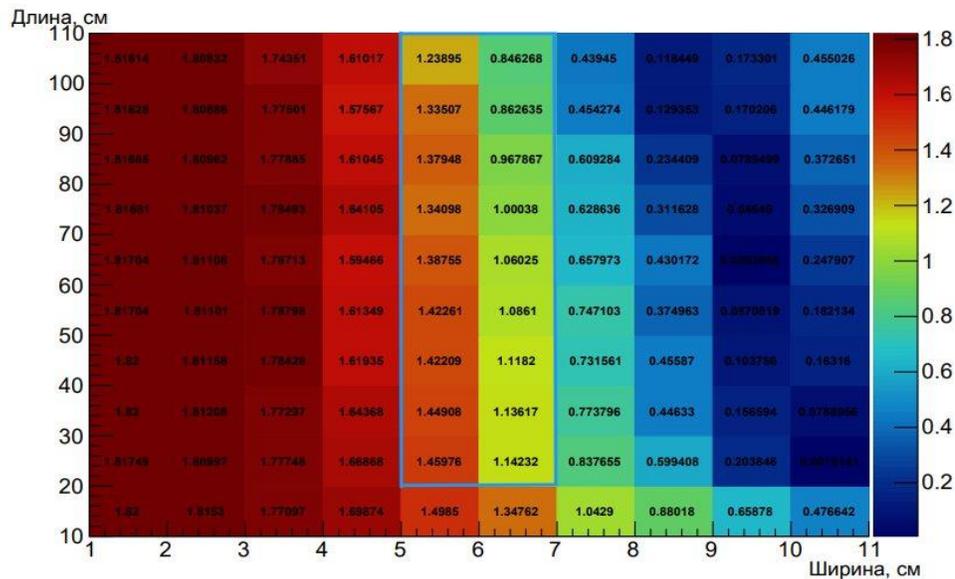
$$\frac{|\eta_{S,l}^{ph} - \eta_{S,l}^n|}{\eta_{S,l}^{ph} + \eta_{S,l}^n} \rightarrow 1$$

## Оптимизация размеров(3)

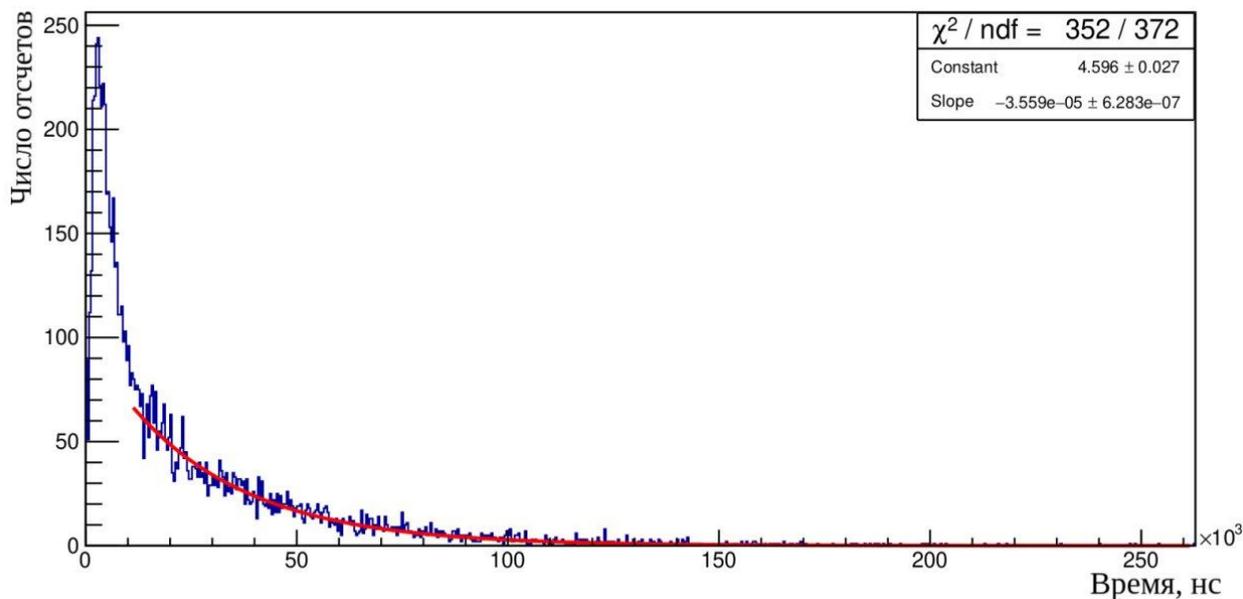


Доля тепловых нейтронов к резонансным

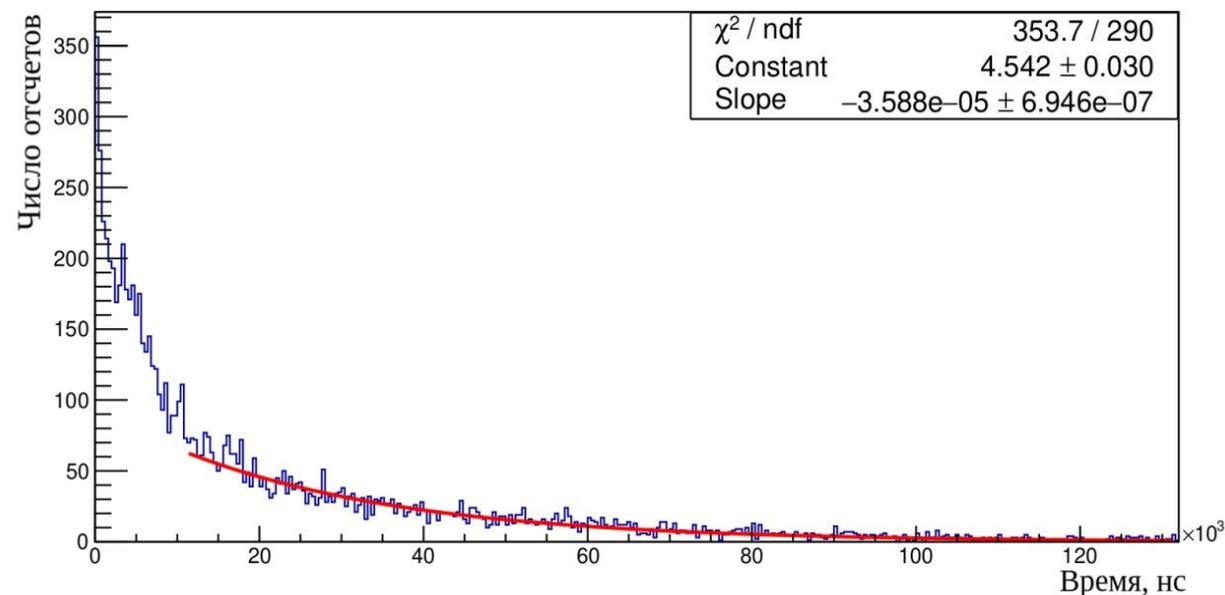
## Оптимизация размеров(4)



## Распределение по времени жизни нейтрона в кадмиевом/гадолиниевом поглотителе

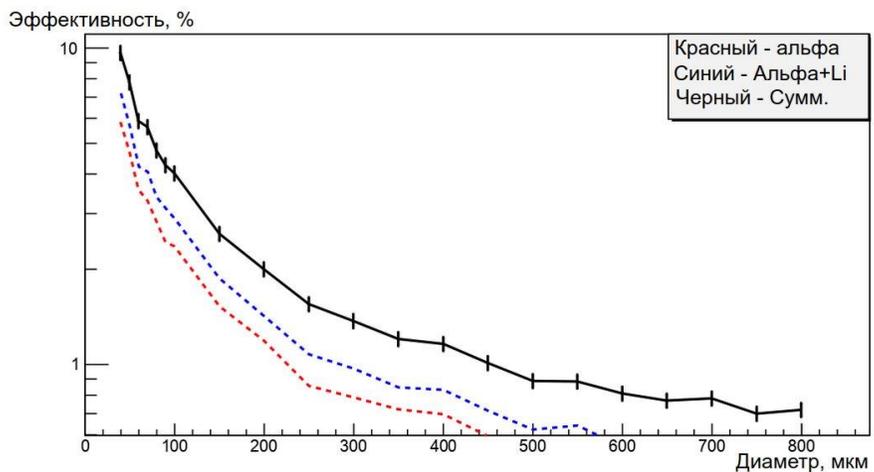
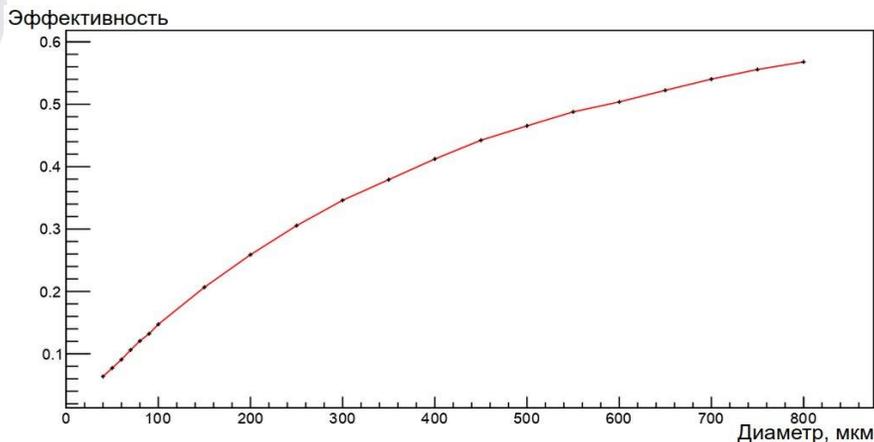


Распределение по времени жизни нейтрона в сборке с кадмиевым поглотителем



Распределение по времени жизни нейтрона в сборке с гадолиниевым поглотителем

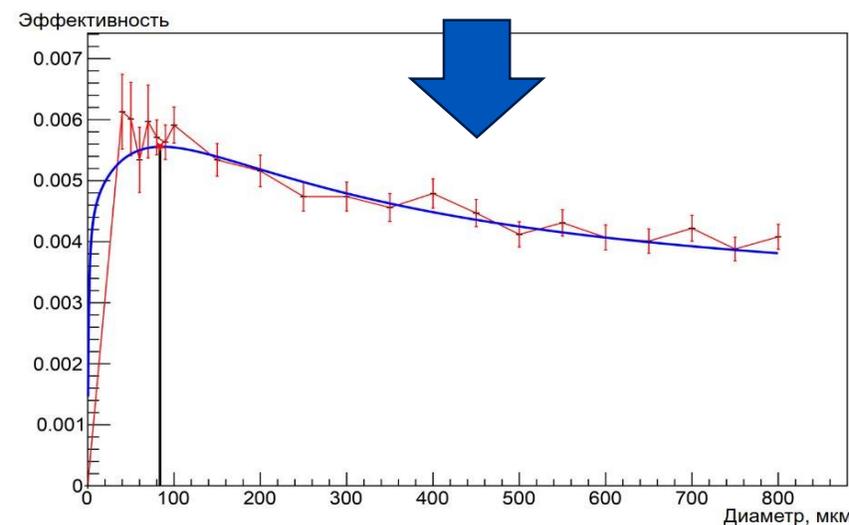
## Расчет для поглотителя на основе $B_2O_3:ZnS(Ag)$



$$f_1 = -a \cdot \log b + a \cdot \log(D^2 + c \cdot D + b)$$

**a=0,129638**  
**b=8702,29**  
**c=81,4245**  
**d=0,00253621**  
**g=4,25434**  
**h=1**  
**k=-1,03746**

$$f = f_1 \cdot f_2$$



$$f_2 = d + g \cdot (D + h)^k$$