



Моделирование детектора реакторных антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора

Студент: Д.С. Прокопов

Научный руководитель: Д.В. Попов

Научный консультант: Д.А. Чмыхало

Москва, 2026

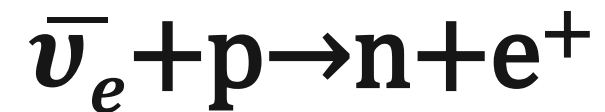


Введение

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.



Реакция обратного бета-распада

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.

Цели и задачи

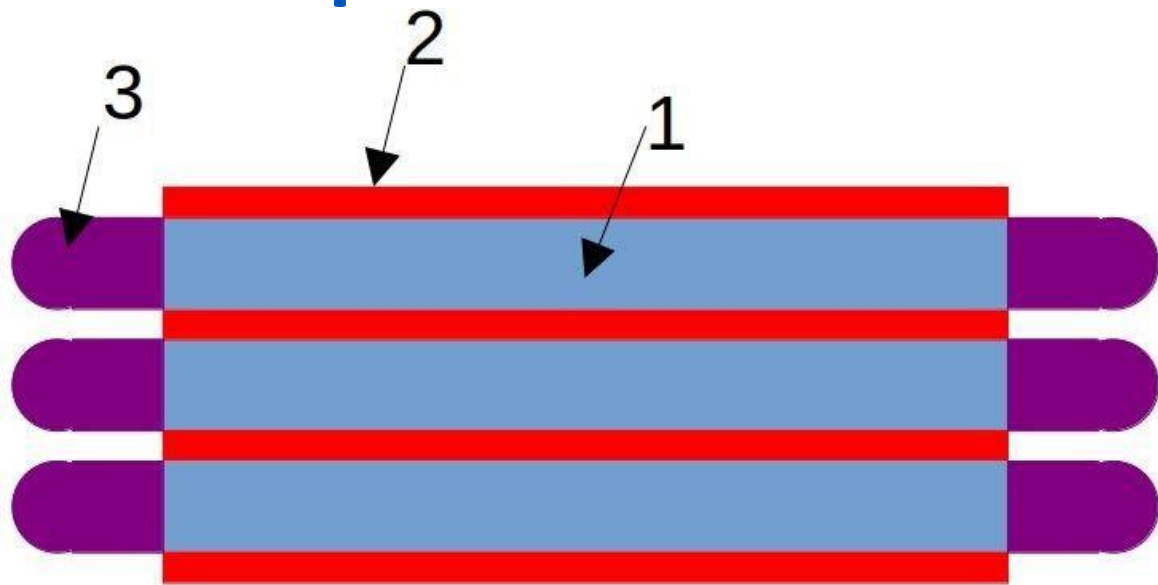
Цель

Моделирование измерительного модуля детектора реакторных антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора.

Задачи:

- 1) Разработка библиотеки, описывающей (n,γ) реакции на изотопах кадмия и гадолиния в GEANT4;
- 2) Определение эффективности регистрации нейтронного сигнала в детекторе реакторных антинейтрино с поглотителем на основе кадмия и гадолиния;
- 3) Определение эффективности регистрации нейтронного сигнала в поглотителе на основе $B_2O_3:ZnS(Ag)$.

Схема сборки детектора реакторных антинейтрино



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

2 – нейтронный поглотитель;

3 – ФЭУ.

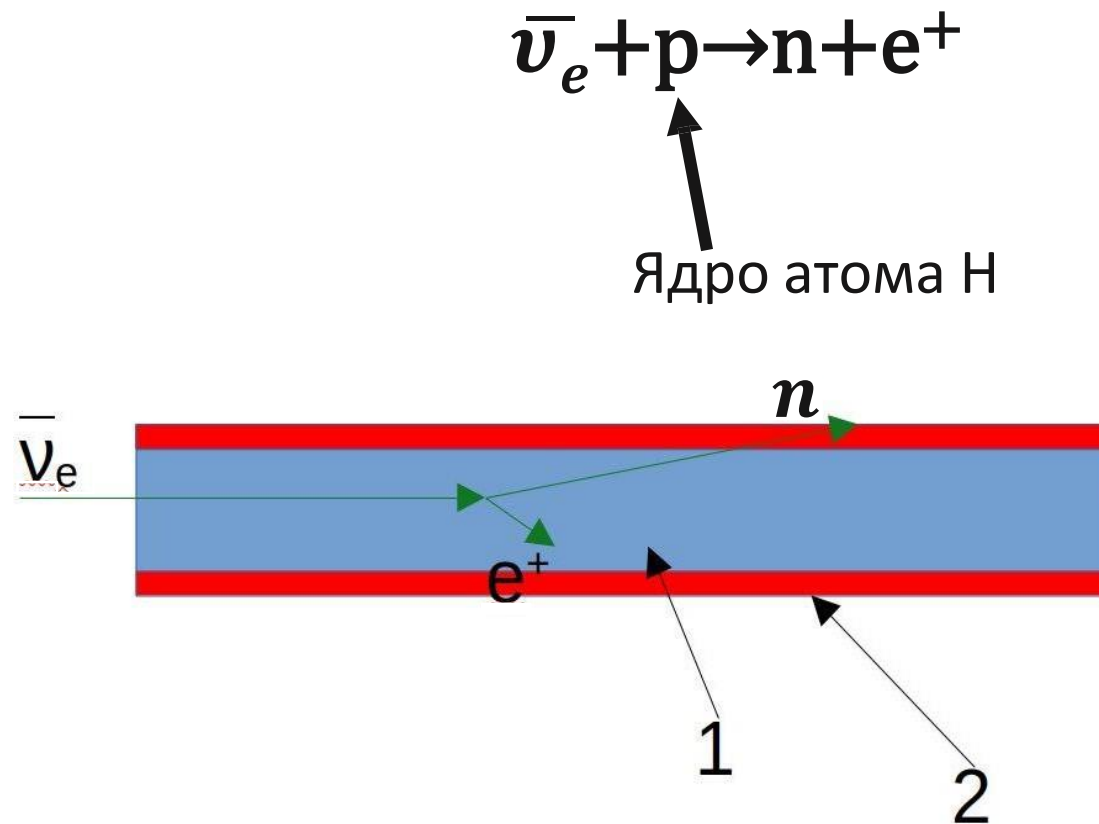
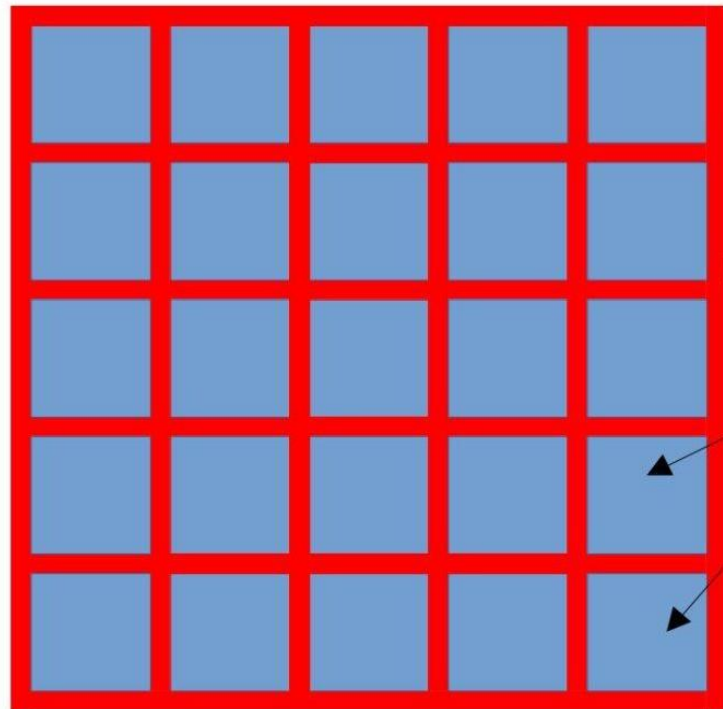


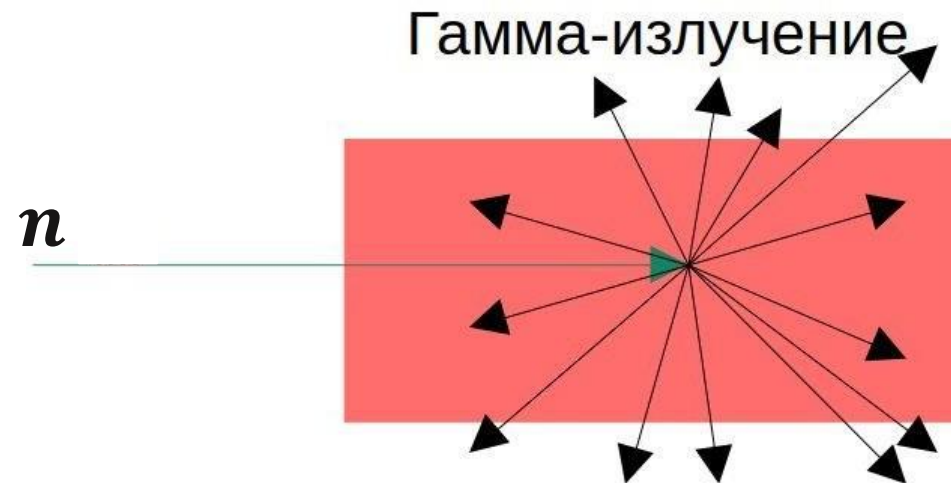
Схема модуля на основе Cd/Gd поглотителей



1

2

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



$$E_{\gamma}(\text{сумм})_{\text{Gd}} \approx 7,94 \text{ МэВ}$$

$$\sigma_{\text{захв. Gd}} = 49000 \text{ барн}$$

$$E_{\gamma}(\text{сумм})_{\text{Cd}} \approx 9,05 \text{ МэВ}$$

$$\sigma_{\text{захв. Cd}} = 3300 \text{ барн}$$

Разработка библиотеки, моделирующей (n, γ) реакции на изотопах Cd, Gd



Формат текстового файла:

N
 $n_1 \quad t_1 \quad E_1 \quad \tau_1 \quad \cos \theta_1 \quad \phi_1 \quad t_2 \quad E_2 \quad \dots$

N – число каскадов;

n_j – число частиц в i -том каскаде;

t_j – тип частицы (гамма-квант, электрон, позитрон);

$E_j, \cos \theta_j, \phi_j$ – энергия и углы вылета частицы относительно направления импульса нейтрона;

τ_j – время между захватом нейтрона и рождением частицы.

Вещество	Атом, на котором произошел захват	Теоретическая вероятность захвата на атоме, %	Вероятность захвата, рассчитанная методом Монте-Карло, %
(CH ₂) _n + +Gd(0.1%)	Gd	27,93	27,8±0,3
(CH ₂) _n + +Gd(0.1%)	H	71,97	71,8±0,2
(CH ₂) _n + +Gd(0.1%)	C	0,1	0,11±0,02
CdPb	Cd	99,99	99,98±0,01
CdPb	Pb	0,01	0,02±0,02
H ₂ O+ +Gd(0,1%)	H	0,45	0,42±0,06
H ₂ O+ +Gd(0.1%)	Gd	99,55	99,57±0,02

Теоретическая вероятность захвата нейтрона на элементе определялась по формуле:

$$P(X) = \frac{\Sigma_a(X)}{\Sigma_a^{tot}},$$

где $\Sigma_a(X) = w_X \cdot \sigma_a(X)$ - макросечение захвата нейтрона на элементе X ,
 w_X - массовая доля элемента в веществе,
 $\sigma_a(X)$ - сечение захвата теплового нейтрона на элементе X ; Σ_a^{tot} - сумма макросечений по всем элементам в веществе.

Таблица 2.1 — Вероятности захвата нейтрона на каждом элементе в различных веществах

Валидация библиотеки, моделирующей (n, γ) реакции на изотопах Cd, Gd

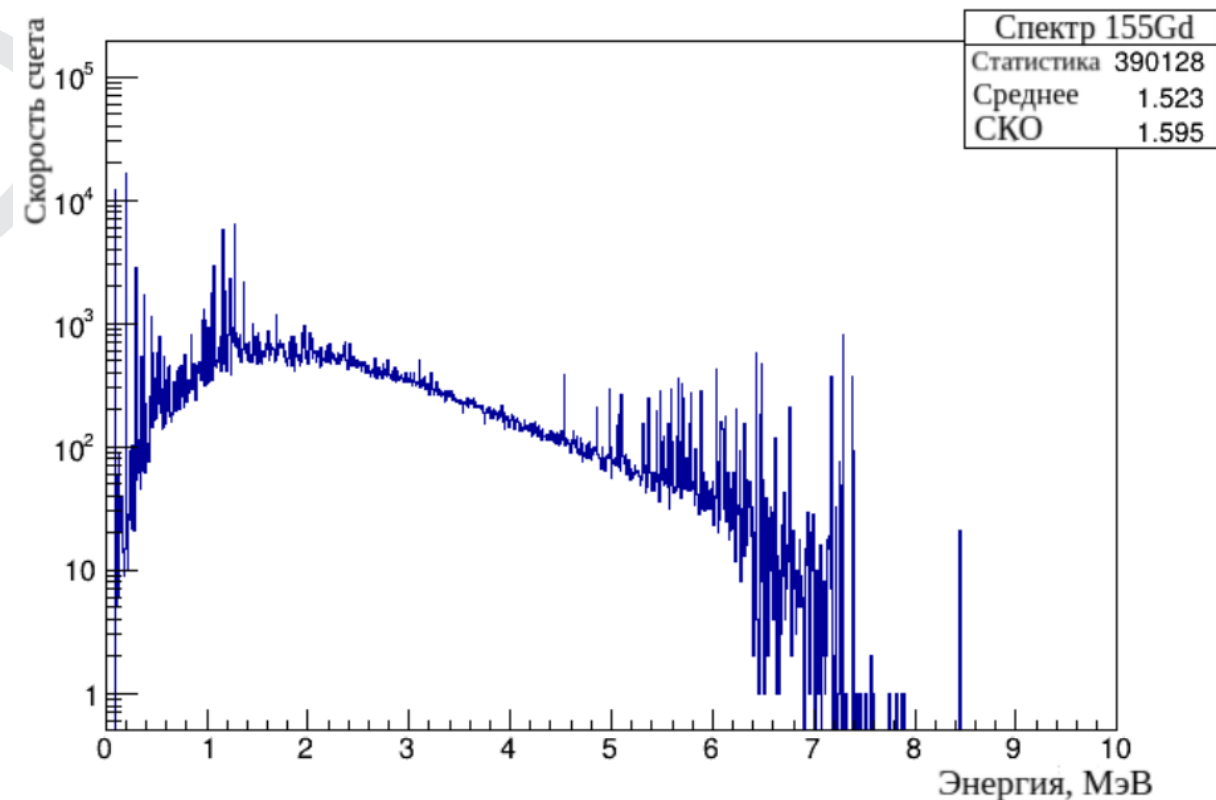


Рис.1. Смоделированный спектр гамма-излучения
(n, γ) реакции на ^{155}Gd .

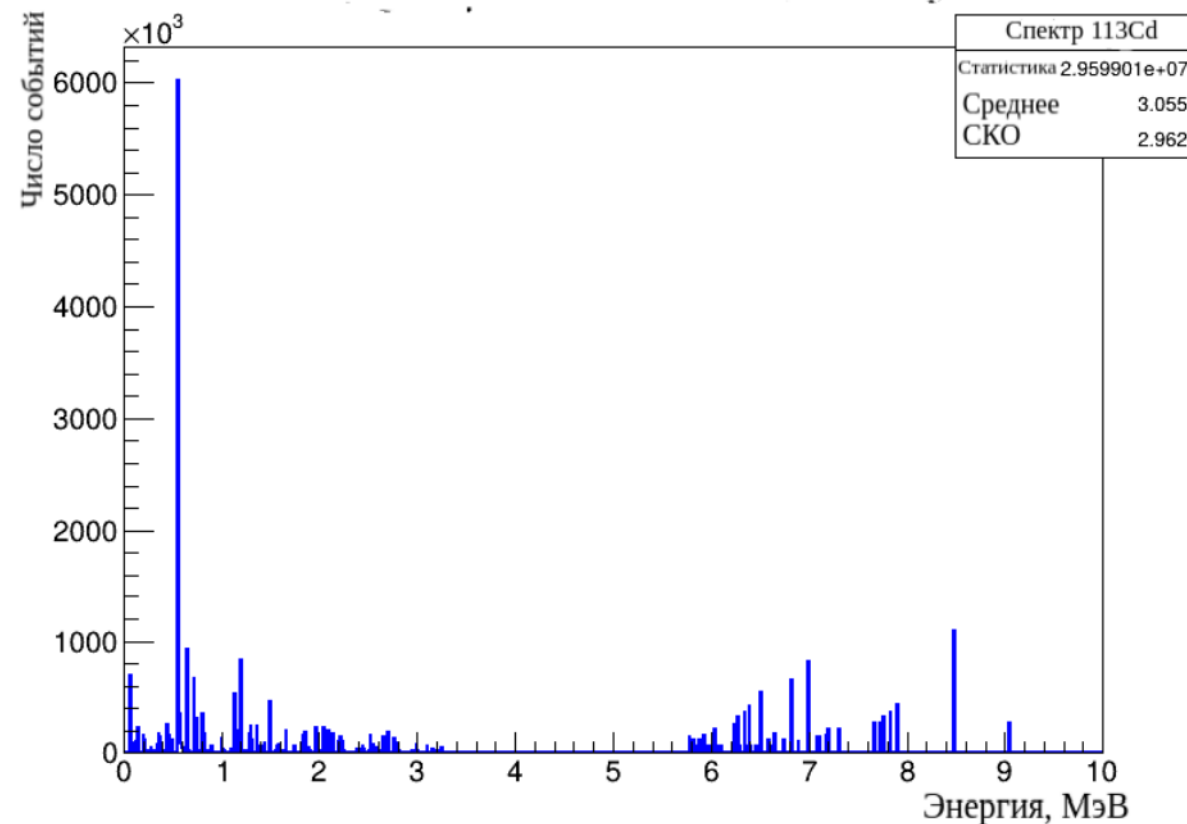
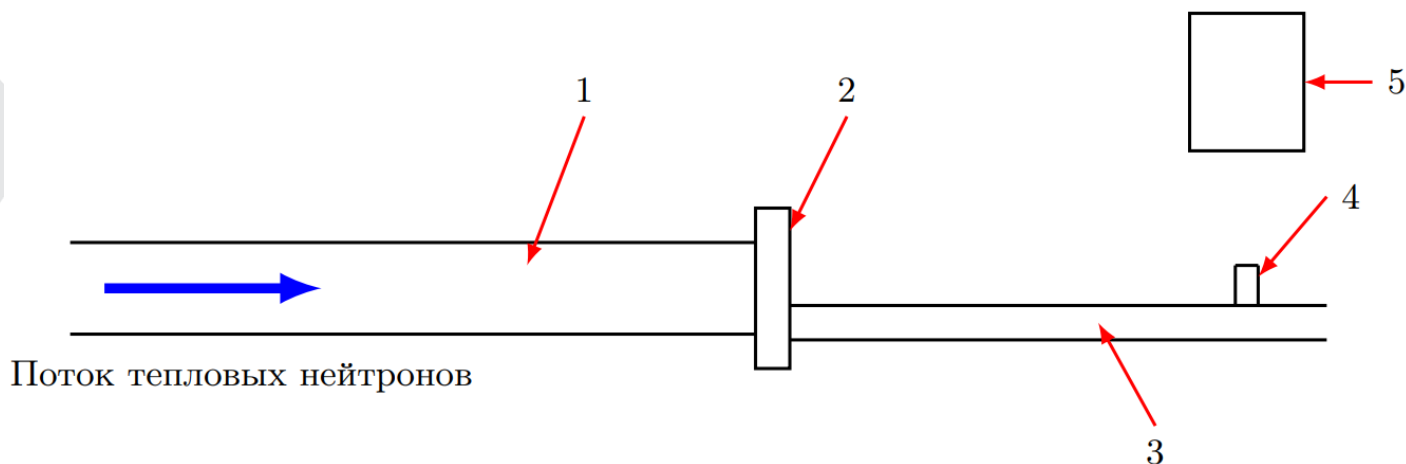


Рис.2. Смоделированный спектр гамма-излучения
(n, γ) реакции на ^{113}Cd .

Валидация библиотеки, моделирующей (n, γ) реакции на изотопах Cd, Gd

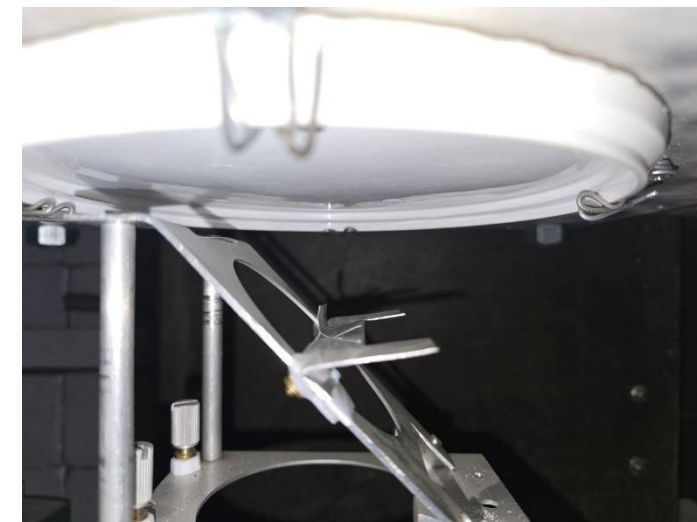


- 1 – ГЭК-7а,
- 2 – Шиббер,
- 3 – Рейка,
- 4 – Мишень:
- 5 – ППД.

- 1) Кадмиевая пластинка 50· 30 · 0,5 мм
- 2) Порошок Gd_2O_3 : шар диаметра 20 мм

Схема экспериментальной установки

Кадмиевая пластинка (4) облучается потоком тепловых нейтронов, излучаемых с ГЭК-7а (1). Спектр излучаемых в результате (n, γ) реакции на исследуемых изотопах продуктов регистрируется с помощью германиевого детектора Canberra GC4018 (5).



Валидация библиотеки, моделирующей (n, γ) реакции на изотопах Cd, Gd

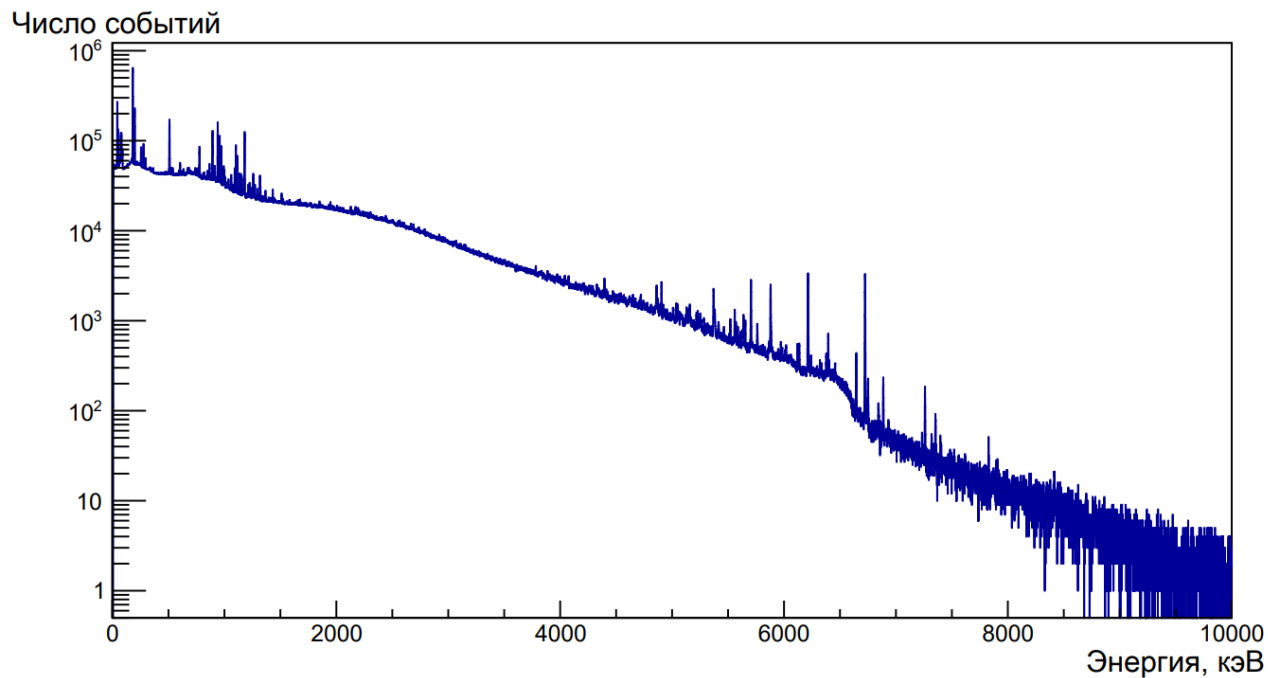


Рис.3. Отклик ППД на гамма-кванты от (n, γ) реакции на ^{155}Gd , ^{157}Gd .

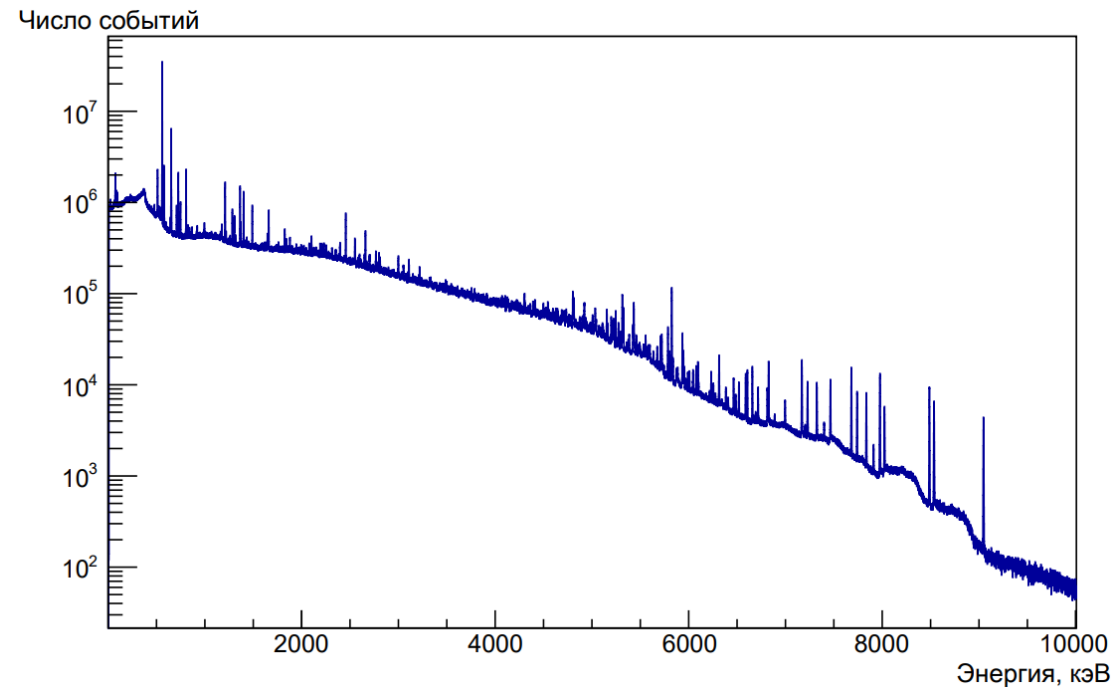


Рис.4. Отклик ППД на гамма-кванты от (n, γ) реакции на ^{113}Cd .

Валидация библиотеки, моделирующей (n, γ) реакции на изотопах Cd, Gd

Изотоп	E_{lib} , кэВ	$I/I_{\text{lib}}^{\text{max}}$, %	E_{exp} , кэВ	$I/I_{\text{exp}}^{\text{max}}$, %
Gd157	80	54	80	47
Gd155	88	18	88	19
Gd157	135	1	135	1
Gd157	181	100	181	100
Gd155	199	23	199	25
Gd157	255	3	255	5
Gd157	277	15	277	16
Gd155	296	5	296	4
Gd157	365	6	365	4
Gd157	780	10	780	8
Gd157	897	23	897	17
Gd157	944	33	944	27
Gd155,157	962	19	962	16
Gd155,157	977	17	977	13
Gd155,157	998	5	998	4
Gd157	1097	5	1097	3
Gd155, 157	1120	19	1120	11
Gd155, 157	1190	8	1190	4
Gd155,157	1277	10	1277	5
Gd155	1970	4	1970	5
Gd155,157	4950	4	4950	3
Gd157	5903	7	5903	4
Gd157	6750	12	6750	7

Изотоп	E_{lib} , кэВ	$I/I_{\text{lib}}^{\text{max}}$, %	E_{exp} , кэВ	$I/I_{\text{exp}}^{\text{max}}$, %
Cd113	558	100	558	100
Cd113	1134	8	1134	6
Cd113	1209	14	1209	12
Cd113	1305	3	1305	2
Cd113	1364	4	1364	4
Cd113	1841	2	1841	2
Cd113	1859	3	1859	2
Cd113	2218	2	2218	2
Cd113	2525	3	2525	3
Cd113	2650	2	2650	2
Cd113	2701	2	2701	1
Cd113	2767	2	2767	1
Cd113	3238	1	3238	1
Cd113	9043	5	9043	4

В качестве опорных пиков были выбраны наиболее интенсивные: 135 кэВ для гадолиния, 558 кэВ для кадмия. Интенсивность остальных пиков рассчитывалась относительно опорных.

Результат: наблюдается согласие между экспериментальными и смоделированными данными, которое подтверждает правильность работы библиотеки.

Таблица 2.2 — Параметры пиков гамма-линий (n, γ) реакций исследуемых изотопов, где E_{lib} , E_{exp} – энергия пика, наблюдаемого в смоделированном и экспериментальном спектре соответственно; $I/I_{\text{lib}}^{\text{max}}$, $I/I_{\text{exp}}^{\text{max}}$ – относительная интенсивность пика в сравнении с калибровочным (135 кэВ для Gd, 558 кэВ для Cd) в смоделированном и экспериментальном спектре.

Определение эффективности регистрации нейтронного сигнала в детекторе с использованием поглотителей на основе Cd и Gd

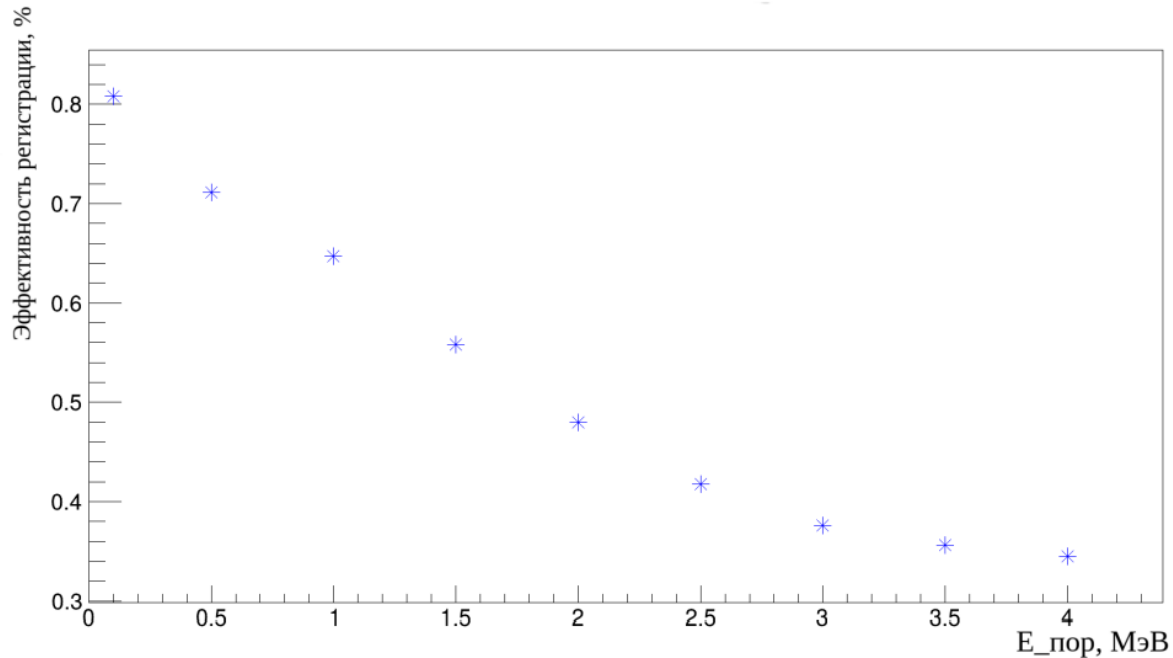


Рис.5. График зависимости эффективности регистрации детектора с кадмиевым поглотителем от пороговой энергии.

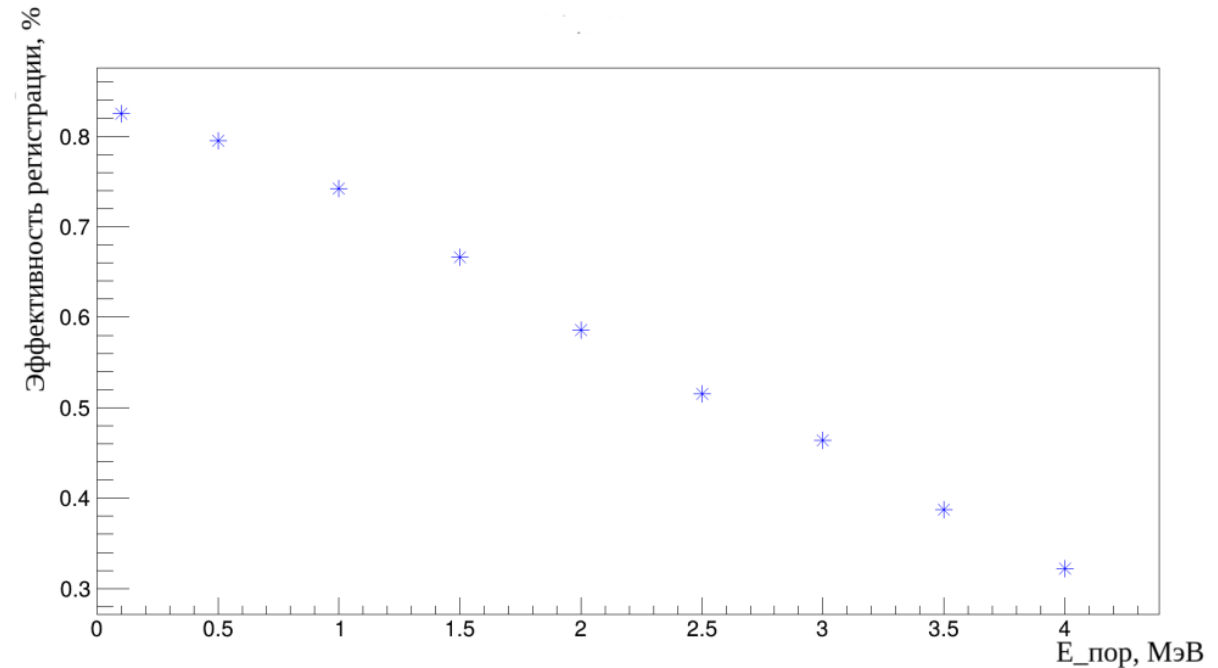
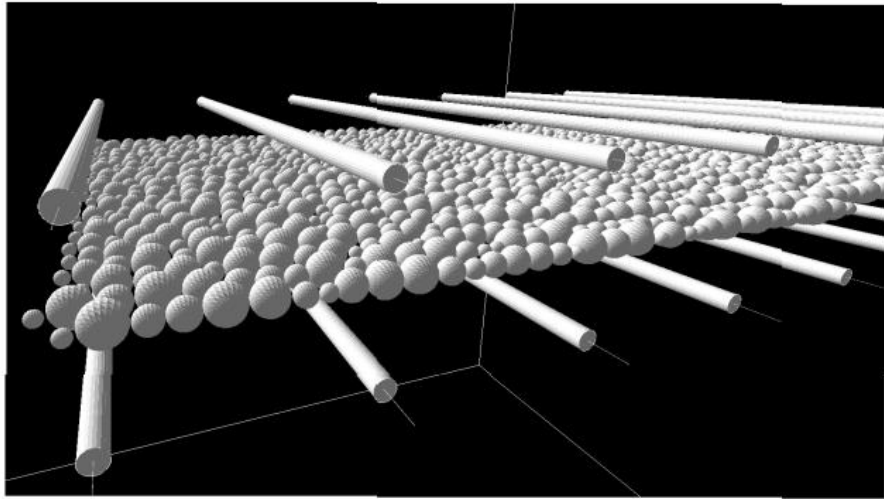
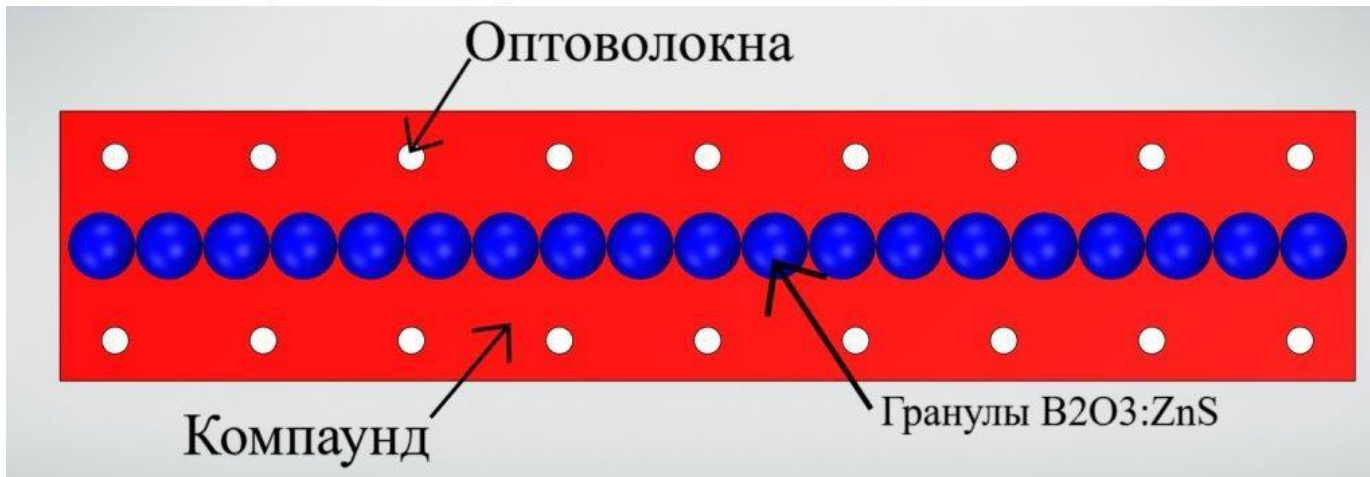


Рис.6. График зависимости эффективности регистрации детектора с гадолиниевым поглотителем от пороговой энергии.

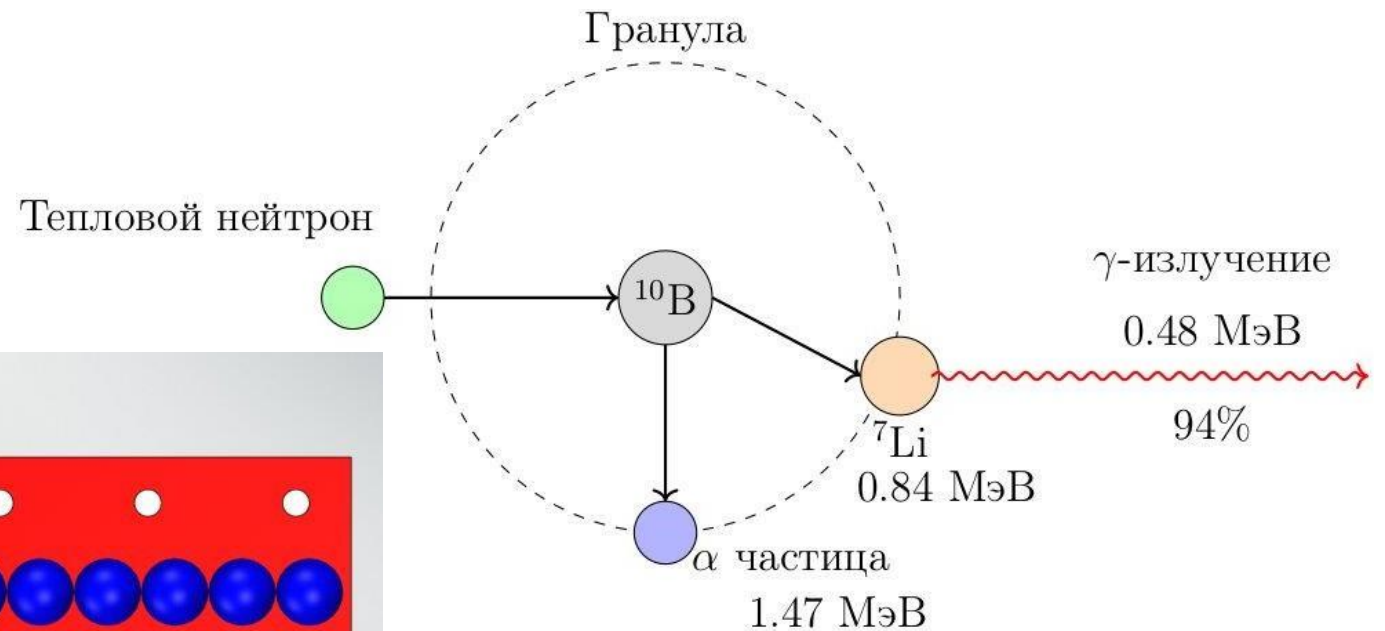
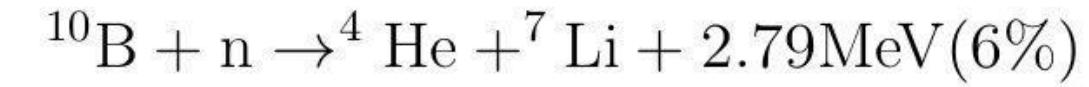
Нейтронный поглотитель на основе $B_2O_3:ZnS(Ag)$



а) Модель установки



б) Схема установки



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

Определение эффективности регистрации нейтронного сигнала в поглотителе на основе $B_2O_3:ZnS(Ag)$

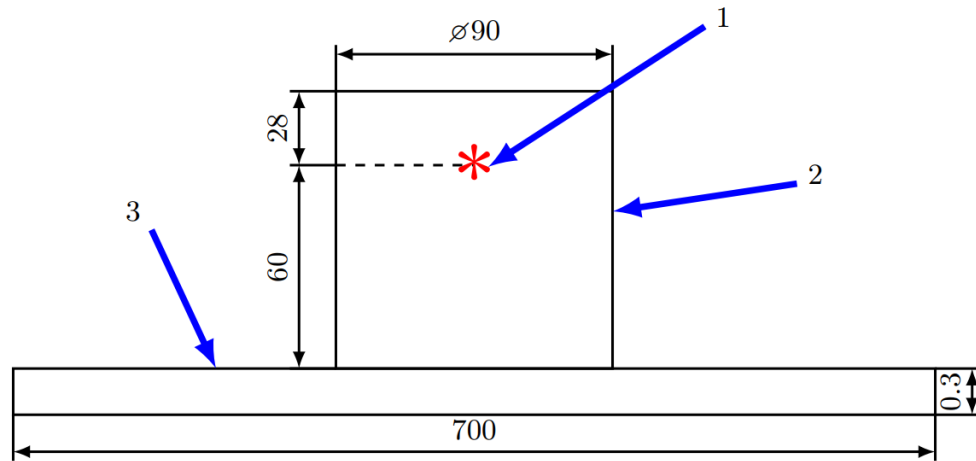


Схема модели для исследования нейтронного поглотителя на основе $B_2O_3:ZnS(Ag)$.

- 1 - Источник ^{252}Cf ,
- 2 - парафин,
- 3 – нейтронный поглотитель.

Эффективность регистрации нейтронов

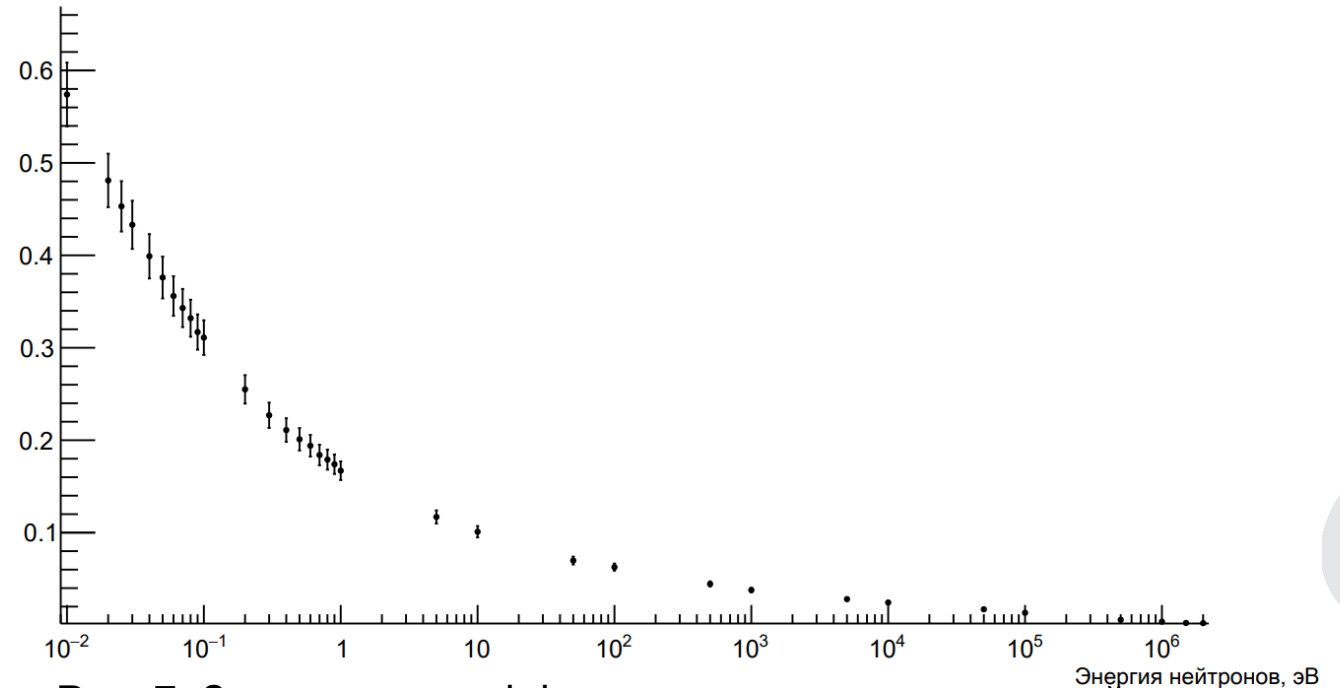


Рис. 7. Зависимость эффективности регистрации нейтрона в поглотителе от энергии.

Для тепловых нейтронов эффективность регистрации составила $(45 \pm 3)\%$.

Заключение

- Была разработана библиотека для моделирования (n, γ) реакций на изотопах кадмия и гадолиния. Правильность работы библиотеки подтверждена на основании сравнения с экспериментальными данными;
- Рассчитаны эффективности регистрации нейтронного сигнала для поглотителей на основе кадмия и гадолиния. Полученные значения составили $\eta_{Cd} = 38\%$ и $\eta_{Gd} = 46\%$ для пороговой энергии регистрации $E_{пор} = 3$ МэВ;
- Определена эффективность регистрации нейтронного поглотителя на основе $B_2O_3:ZnS(Ag)$, получено значение $\eta_B = (45 \pm 3)\%$ для тепловых нейтронов.



МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

Спасибо за внимание!

Аппаратурная кривая отклика германиевого детектора на γ -квант с энергией E_γ

Комптовское плато



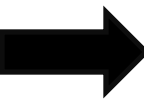
Пик полного поглощения

Если $E_\gamma > 2 \cdot m_e$:

Рождение e^+e^- пары в
поле ядра Ge



Аннигиляция позитрона с
образованием 2 γ -квантов



Один γ -квант не взаимодействует
в чувствительном объеме
детектора



Single escape
Пик $E_\gamma - m_e$

Оба γ -кванта не взаимодействуют
в чувствительном объеме
детектора



Double escape
Пик $E_\gamma - 2 \cdot m_e$

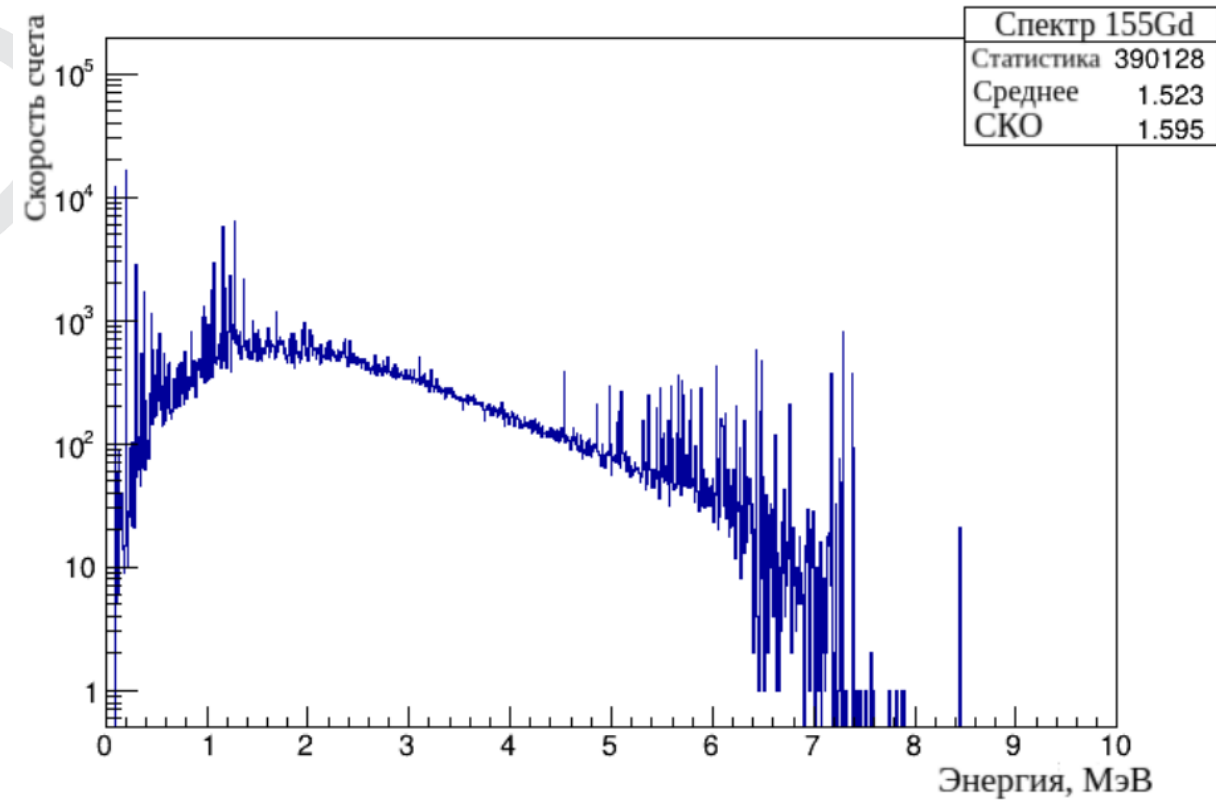


Рис.1. Смоделированный спектр гамма-излучения (n, γ) реакции на ^{155}Gd

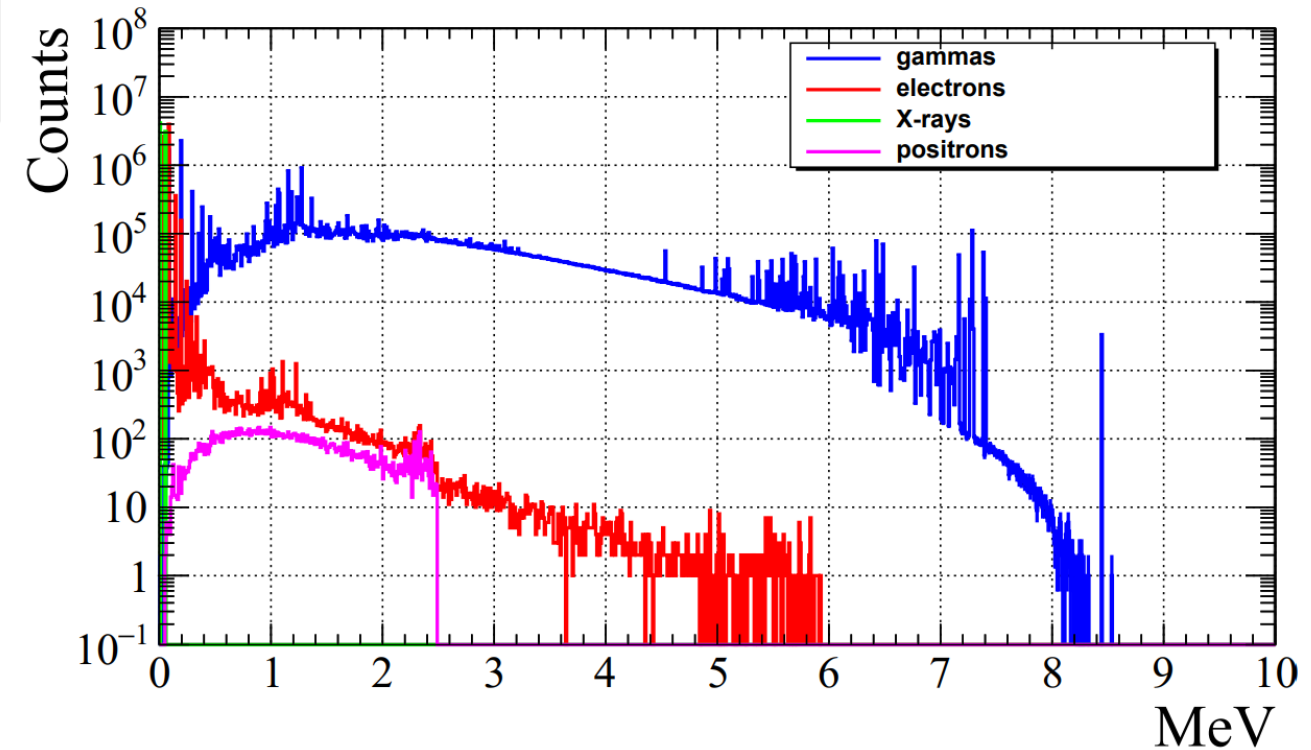


Рис.2. Экспериментальный спектр гамма-излучения (n, γ) реакции на ^{155}Gd (синий)

H. Almazan et al. Improved FIFRELIN de-excitation model for neutrino applications. *Eur. Phys. J. A*, 59(4):75, 2023.

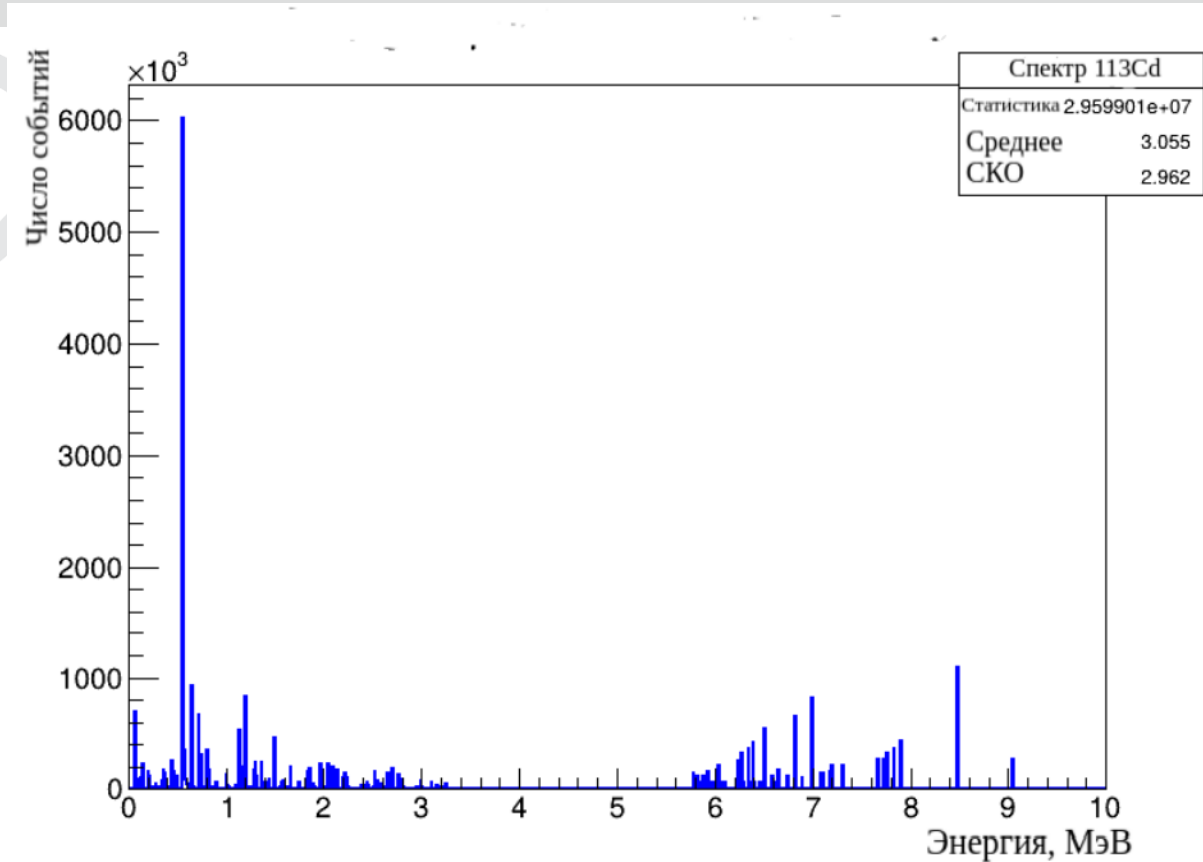


Рис.3. Смоделированный спектр гамма-излучения (n, γ) реакции на ^{113}Cd

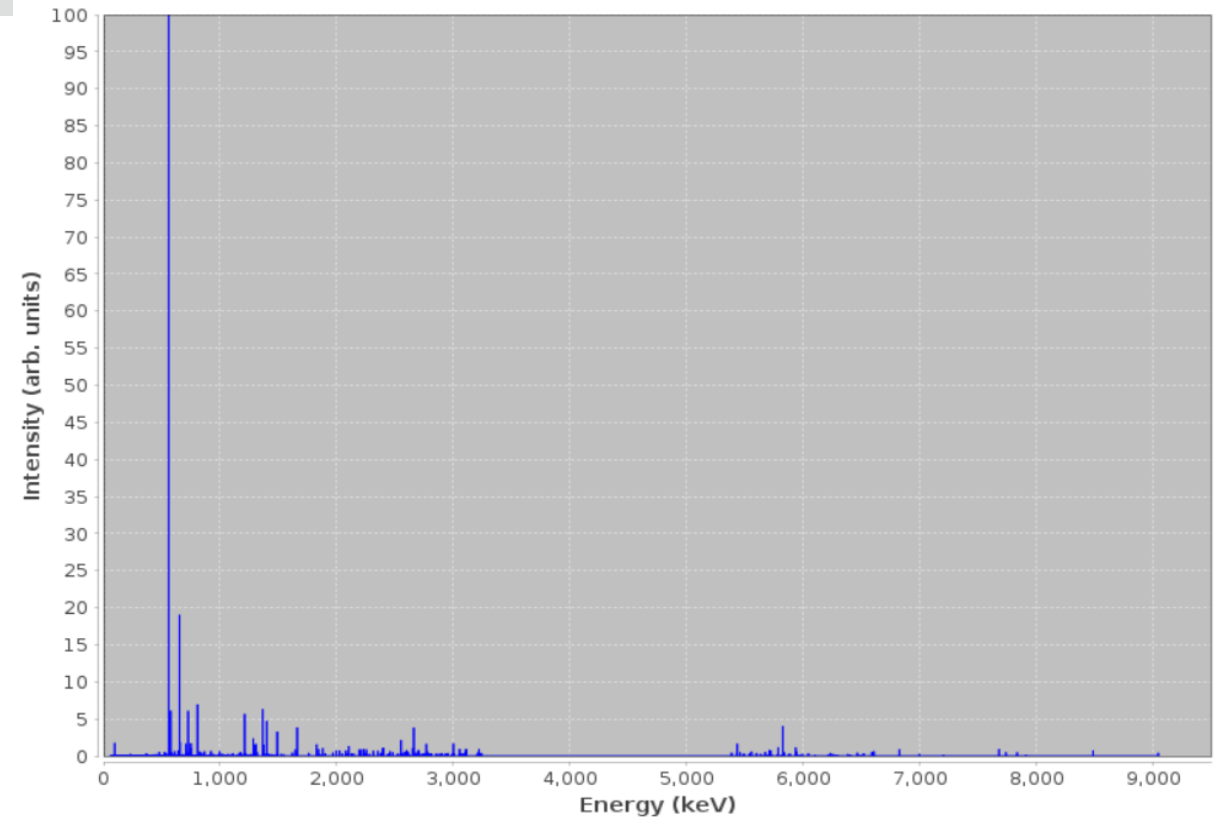


Рис.4. Экспериментальный спектр гамма-излучения (n, γ) реакции на ^{113}Cd

N. Furutachi, F. Minato, and O. Iwamoto. Statistical properties of thermal neutron capture cross sections calculated with randomly generated resonance parameters. *Phys. Rev. C*, 100(1):014610, 2019.

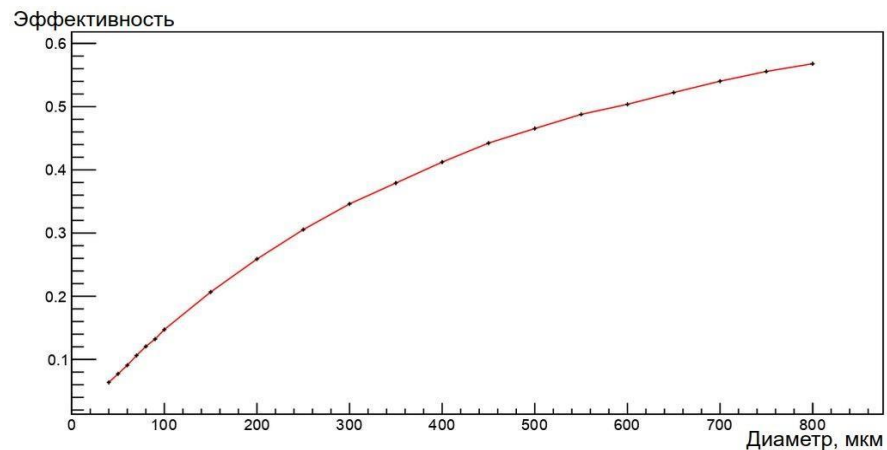


Рис.5. Эффективность захвата нейтронов в поглотителе

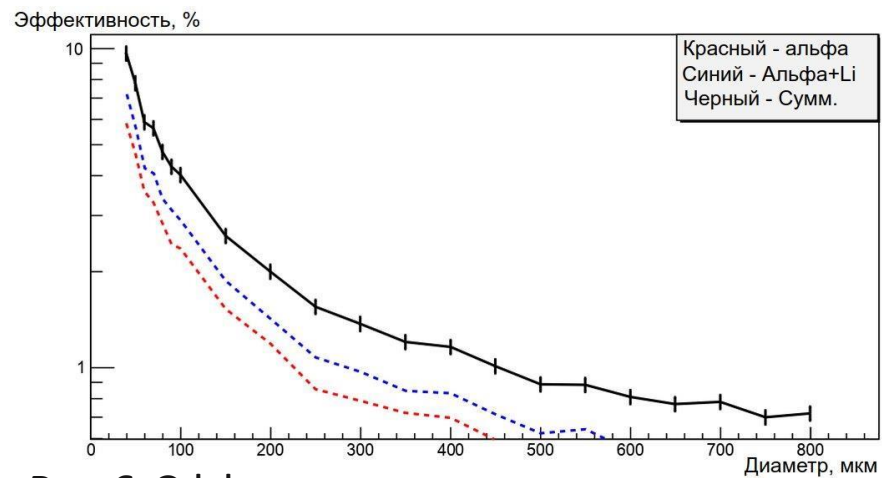


Рис.6. Эффективность вылета частиц из гранулы

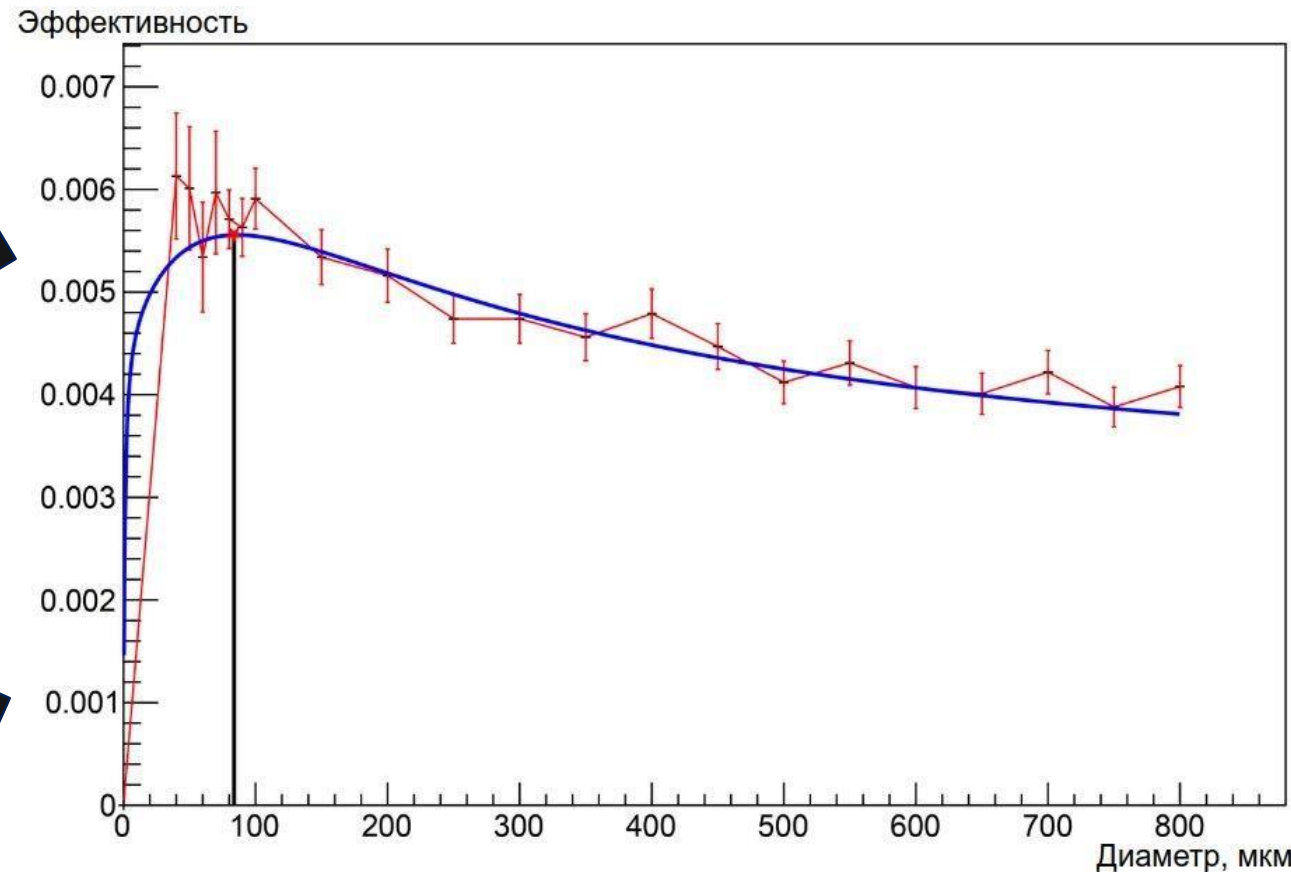
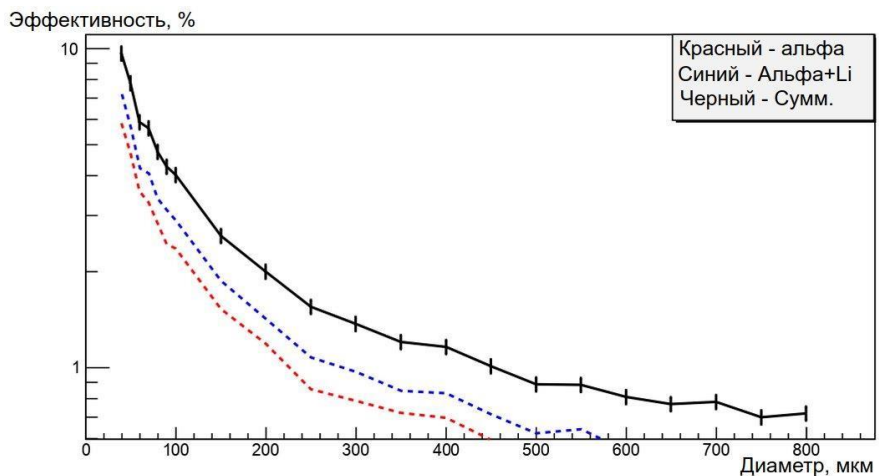
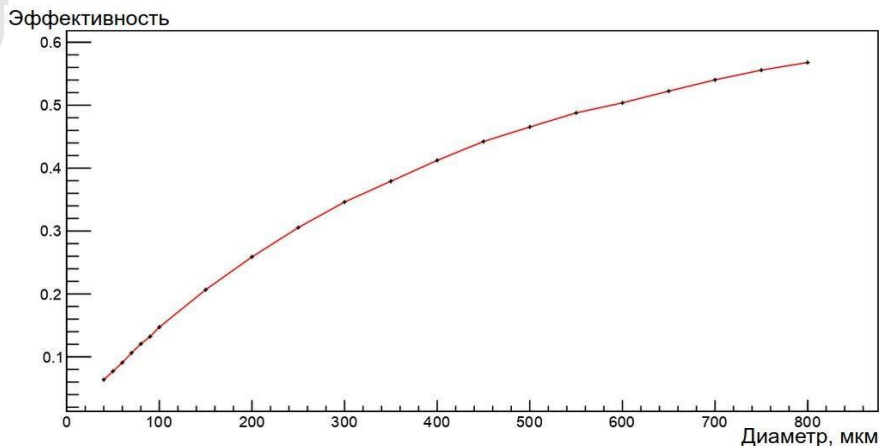


Рис.7. Зависимость эффективности регистрации поглотителя от диаметра гранулы

Получен оптимальный диаметр $D=80$ мкм

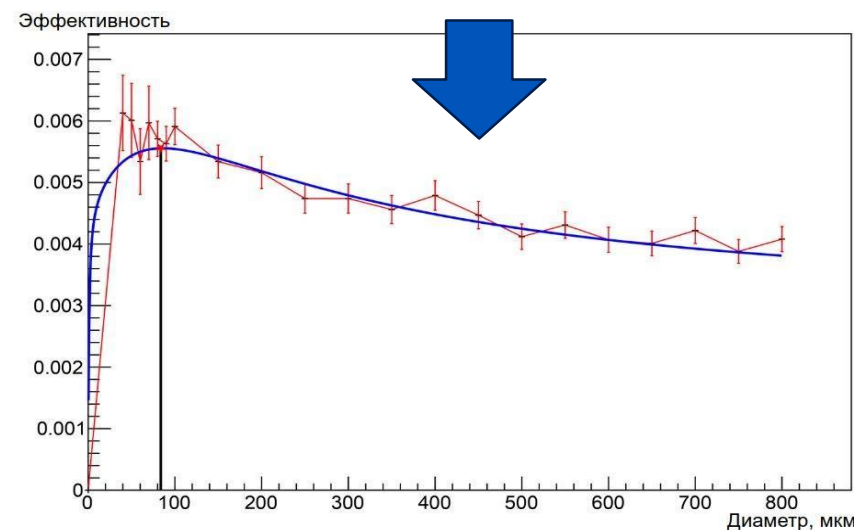
Расчет для поглотителя на основе $B_2O_3:ZnS(Ag)$



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

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

$$f = f_1 \cdot f_2$$



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

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