

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

**ОТЧЕТ  
О НАУЧНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**«МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ  
ДЕТЕКТОРА РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО НА  
ОСНОВЕ ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА»**

Студент \_\_\_\_\_ Д. С. Прокопов

Научный руководитель,  
м.н.с. \_\_\_\_\_ Д. А. Чмыхало

Москва 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>1 Теоретические сведения</b>	<b>4</b>
1.1 Принцип работы детектора реакторных антинейтрино . . . . .	4
1.2 Роль сцинтилляторов в детектировании антинейтрино . . . . .	5
<b>2 Калибровка расчетной модели</b>	<b>6</b>
2.1 Поведение нейтрона в водородосодержащей среде . . . . .	6
2.2 Результаты калибровки модели . . . . .	8
<b>3 Оптимизация конструкции модульного детектора</b>	<b>9</b>
3.1 Расчетная модель сборки . . . . .	9
3.2 Исследование влияния толщины борного поглотителя на эффективность нейтронного захвата . . . . .	10
3.3 Исследование эффективности захвата нейтронов от конструкции сборки . . . . .	12
<b>4 Оптимизация размеров пластикового сцинтиллятора</b>	<b>13</b>
4.1 Расчетная модель . . . . .	13
4.2 Проведение измерений и определение оптимальных размеров пластикового сцинтиллятора . . . . .	14
4.2.1 Снятие зависимости количества регистрируемых фотонов от размеров сцинтиллятора . . . . .	14
4.2.2 Исследование зависимости эффективности захвата нейтронов от размеров сцинтиллятора . . . . .	15
4.2.3 Оптимизация размеров сцинтиллятора . . . . .	16
<b>Заключение</b>	<b>18</b>
<b>Литература</b>	<b>19</b>

# ВВЕДЕНИЕ

На текущий момент в России активно развивается малая атомная энергетика (МАЭ) с целью обеспечения энергоресурсами удалённых районов и производств, в частности перспективным считается производство плавучих атомных энергоблоков (ПАЭБ) [6]. В связи с этим развитие атомной промышленности потребовало введения средств мониторинга количества и качества ядерного материала, находящегося в корпусе реактора, для обеспечения безопасности развития атомной энергетике. Сложность данного вопроса заключается в отсутствии возможности установки независимой аппаратуры, измеряющей выработку энергии на ПАЭБ. Поэтому возможным решением этой проблемы представляется измерение энерговыработки реактора при помощи детектирования реакторных антинейтрино, находящейся вне ПАЭБ.

Использование нейтринного метода контроля ядерных реакторов было предложено и изучено в Курчатовском институте в 1980 – 1990-х гг. [1] [3] Реакторные антинейтрино служат индикаторами протекания цепной реакции деления в активной зоне реактора. Эти антинейтрино могут быть зарегистрированы с помощью реакции обратного бета-распада. В качестве нейтринного детектора можно использовать спектрометр на основе пластикового сцинтиллятора, регистрирующий продукты этой реакции. Важную роль в разработке детектора антинейтрино играет моделирование, поскольку этот способ может быть использован в определении оптимальных характеристик сцинтиллятора.

Целью данной работы является моделирование измерительного модуля детектора реакторных антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- Создание модели и проведение ее калибровки на основе экспериментальных данных;
- Оптимизация размеров пластикового сцинтиллятора;
- Исследование зависимости эффективности захвата нейтронов в бор-

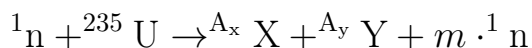
ном поглотителе от его толщины;

- Оптимизация конструкции модульного детектора.

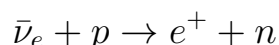
# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

## 1.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО

Ядерные реакторы вырабатывают энергию путем деления изотопов урана и плутония ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) и радиоактивного распада соответствующих фрагментов деления. [4] При бомбардировке ядра нейтроном оно распадается, как правило, на два нейтроноизбыточных изотопа.



Продукты распада  ${}^{A_x}_{Z_x}\text{X}$  и  ${}^{A_y}_{Z_y}\text{Y}$  далее подвергаются каждой серии из нескольких бета-распадов, в результате которых образуется в среднем 6 антинейтрино. Таким образом, ядерный реактор является мощным источником электронных антинейтрино. Регистрация антинейтрино может осуществляться через обратный  $\beta^+$ -распад [2], [5]:



Эту реакцию можно наблюдать в водородосодержащей среде, например, в органических сцинтилляторах. В  $\beta^+$ -распаде значительно большей массой обладает нейтрон, поэтому большую энергию приобретает позитрон. Нейтрон замедляется в водородосодержащей среде и впоследствии захватывается на поглотителе (водород в сцинтилляторе, спец. добавке), излучая гамма-квант, который далее регистрируется.

Время жизни позитрона составляет порядка  $10^{-9}\text{с}$ , за это время позитрон ионизирует среду и аннигилирует с образованием 2 гамма-квантов с энергией 0,511 МэВ.

## 1.2. РОЛЬ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ В ДЕТЕКТИРОВАНИИ АНТИНЕЙТРИНО

Сцинтиллятор — вещество, излучающее свет при прохождении через него ионизирующего излучения. К основным характеристикам сцинтилляторов относятся световой выход, время высвечивания и прозрачность вещества [7]. Чувствительный объём сцинтиллятора представляет собой основное вещество (полиметилметакрилат (РММА), полистирол, поливинилтолуол (PVT)) с люминисцентными добавками (р-терфенил, РОРОР). В результате прохождения реакции обратного  $\beta^+$ -распада в сцинтилляторе её продукты ионизируют вещество, которое излучает световой поток изотропно. Свет в сцинтилляторе распространяется по законам геометрической и волновой оптики и регистрируется фотодетектором. Для улучшения светособирания сцинтиллятор можно ограничить зеркальным или диффузным отражателем, а также подобрать параметры и размеры сцинтиллятора методом Монте-Карло.

В данной работе исследовался пластиковый сцинтиллятор из полистирола. В качестве люминисцентных, спектросмещающих добавок были использованы р-терфенил и РОРОР. Время высвечивания сцинтиллятора равно 2,5 нс, показатель преломления  $n=1,59$ , прозрачность равна 3 м, световой выход требуется измерить в ходе исследований.

## 2. КАЛИБРОВКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

### 2.1. ПОВЕДЕНИЕ НЕЙТРОНА В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ

В связи с отсутствием у нейтронов электрического заряда они проходят в веществе без взаимодействий сравнительно большие расстояния, измеряемые сантиметрами. Эффективные сечения взаимодействия нейтронов с электронами атома малы ( $\sigma \approx 10^{-22} \text{ см}^2$ ) по сравнению с сечением взаимодействия заряженной частицы с атомом ( $\sigma \approx 10^{-16} \text{ см}^2$ ). Нейтроны сталкиваются главным образом с ядрами атомов, входящих в состав вещества. Явления, происходящие при взаимодействии нейтронов с ядрами, зависят от кинетической энергии нейтронов. Поэтому обычно нейтроны делят на отдельные энергетические группы. Границы этих энергетических групп условны. Различают нейтроны ультрахолодные ( $0 - 10^{-7} \text{ эВ}$ ), холодные ( $10^{-7} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$ ), тепловые и надтепловые ( $2,5 \cdot 10^{-2} - 0,5 \text{ эВ}$ ), резонансные ( $0,5 \text{ эВ} - 1(10) \text{ кэВ}$ ), которые имеют много резонансных пиков в зависимости эффективного сечения взаимодействия со средними и тяжелыми ядрами от энергии нейтронов, промежуточные ( $1(10) - 100 \text{ кэВ}$ ), и быстрые ( $>0,1 \text{ МэВ}$ ).

В реакциях деления ядер образуются, как правило, быстрые нейтроны. Они при соударениях с атомными ядрами теряют энергию большими порциями, расходуя её, главным образом, на возбуждение ядер или их расщепление. В результате энергия нейтрона становится меньше минимальной энергии возбуждения ядра (от десятков кэВ до нескольких МэВ в зависимости от свойств ядра). После этого рассеяние нейтрона ядром становится упругим, т.е. нейтрон расходует энергию на сообщение ядру скорости без изменения внутреннего состояния ядра. При одном упругом соударении нейтрон теряет в среднем долю энергии, равную  $2A/(A+1)^2$ , где  $A$  – массовое число ядра-мишени. Эта доля мала для тяжёлых ядер ( $1/100$  для свинца) и велика для лёгких ядер ( $1/7$  для углерода и  $1/2$  для водоро-

да). Поэтому замедление нейтронов на лёгких ядрах происходит гораздо быстрее, чем на тяжёлых.

Замедление нейтронов приводит в конечном счёте к образованию тепловых нейтронов (нейтронов, находящихся в тепловом равновесии со средой, в которой происходит замедление). Средняя энергия теплового нейтрона при комнатной температуре равна 0,025 эВ. В процессе замедления часть нейтронов теряется, поглощаясь при столкновении с ядрами или вылетая из среды наружу. В замедлителях нейтронов – веществах, содержащих лёгкие ядра, слабо захватывающие нейтроны, (при достаточно больших размерах замедлителя) потери малы и большая часть нейтронов, испущенных источником, термализуется. К числу лучших замедлителей относятся вода, тяжёлая вода, бериллий, графит.

Ослабление узкого коллимированного пучка нейтронов тонким слоем вещества происходит по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-N\sigma x} \quad (2.1)$$

где  $I_0$  и  $I(x)$  – значения плотности потока до и после прохождения слоя вещества  $x$ ,  $N$  – число ядер в единице объема вещества,  $\sigma$  – полное сечение взаимодействия нейтронов с веществом. Величина  $\Sigma = N\sigma$  имеет размерность обратной длины ( $\text{см}^{-1}$ ) и называется линейным коэффициентом ослабления потока нейтронов в веществе. Величина  $\lambda = \frac{1}{\Sigma}$  имеет размерность длины и называется длиной свободного пробега нейтрона в веществе. Средняя длина пробега по отношению к поглощению  $\lambda_a$  – это расстояние, при прохождении которого плотность потока нейтронов из-за поглощения уменьшается в  $e$  раз. Плотность потока нейтронов  $j(r)$  на расстоянии  $r$  от точечного источника, испускающего  $j_0$  моноэнергетических нейтронов в единицу времени, определяется соотношением:

$$j(r) = \frac{j_0}{4\pi r^2} \cdot e^{-\frac{r}{\lambda_a}} \quad (2.2)$$



## 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ МОДЕЛИ

В ходе работы разыгрывался прямолинейный поток нейтронов с энергией 1 МэВ в воде. Был снят спектр по длине свободного пробега, представленный на рисунке 2.1.

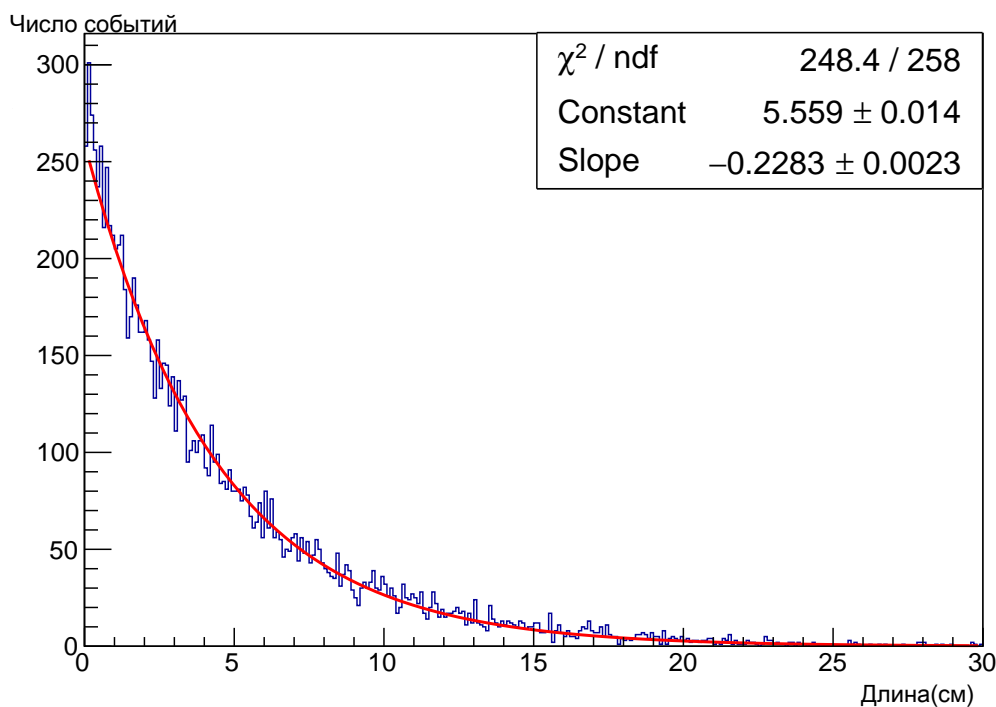


Рисунок 2.1 — Распределение нейтронов по длине свободного пробега

В результате аппроксимации спектра по формуле (2.1) получена длина свободного пробега нейтрона в воде,  $\lambda = (4,38 \pm 0,17)$  см

Также было рассчитано теоретическое значение длины свободного пробега, опираясь на табличные значения сечений захвата нейтрона на кислороде ( $\sigma = 8$  барн) и водороде ( $\sigma = 4$  барн). По формуле

$$\lambda = \frac{1}{n_O \sigma_O + n_H \sigma_H} \quad (2.3)$$

где  $n = N_A \rho / A$  - концентрация,  $\rho$  - плотность вещества,  $A$  - массовое число, получено теоретическое значение, равное  $\lambda = 4,36$  см. Отклонение расчетной и полученной в результате моделирования величины составило 0,5%, что говорит о корректности работы нейтронной физики в модели.

## 3. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МОДУЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА

### 3.1. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ СБОРКИ

Модульный детектор представляет собой сборку из нескольких пластиковых сцинтилляторов, между которыми нанесен тонкий слой поглотителя нейтронов  $B_2O_3:ZnS$  в отношении 13:7. Схема модульного детектора для набора из 9 сцинтилляторов представлена на рисунке 3.1.

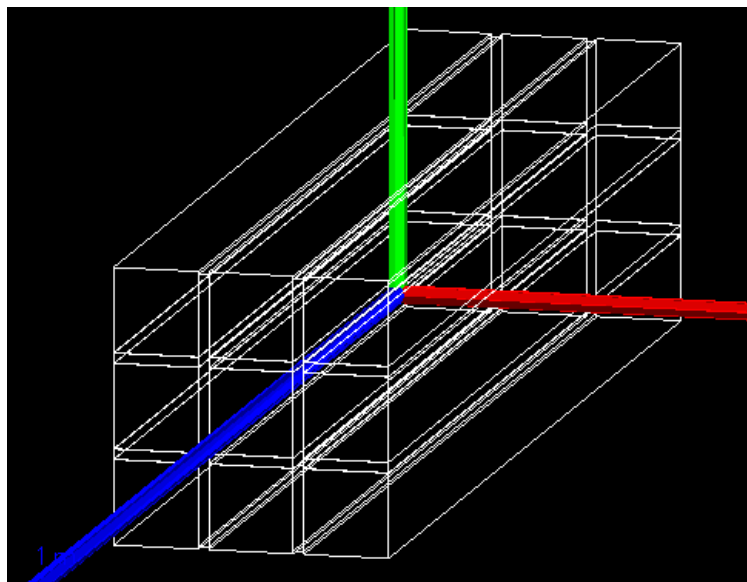


Рисунок 3.1 — Схема экспериментальной установки

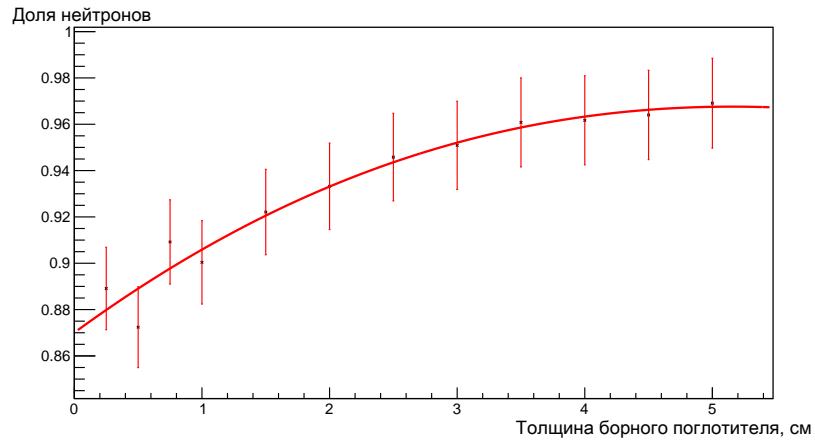
В ходе работы необходимо определить оптимальную толщину и количество сцинтилляторов в конструкции модульного детектора, опираясь на условие, что детектор должен захватывать все нейтроны, влетающие в него.

## 3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ БОРНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕЙТРОННОГО ЗАХВАТА

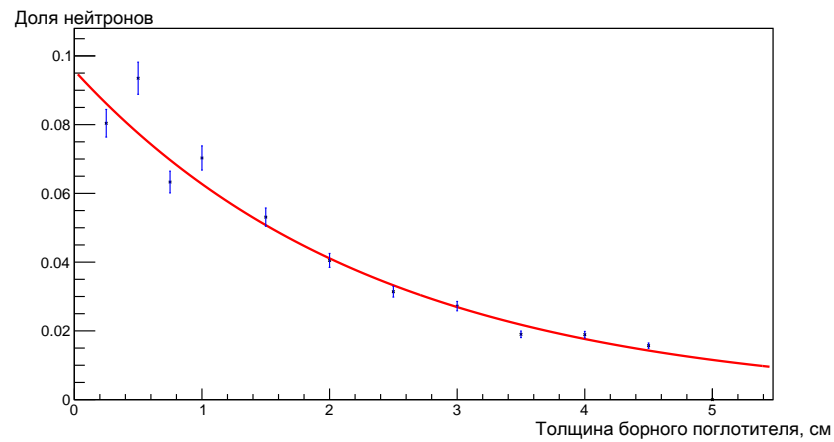
Для определения оптимальной толщины борного поглотителя использовалась сборка из 9 сцинтилляторов размера 5·5·70 см. В центре установки в телесный угол  $4\pi$  разыгрывались 10000 нейтронов энергии 15 кэВ (средняя энергия нейтрона, образованного в результате обратного бета-распада), измерялось количество нейтронов, захваченных сцинтилляторами и борным поглотителем. Полученные результаты представлены в таблице 3.1 и рисунках 3.2 а), б) и в).

Таблица 3.1 — Количество захваченных нейтронов в зависимости от толщины борного поглотителя

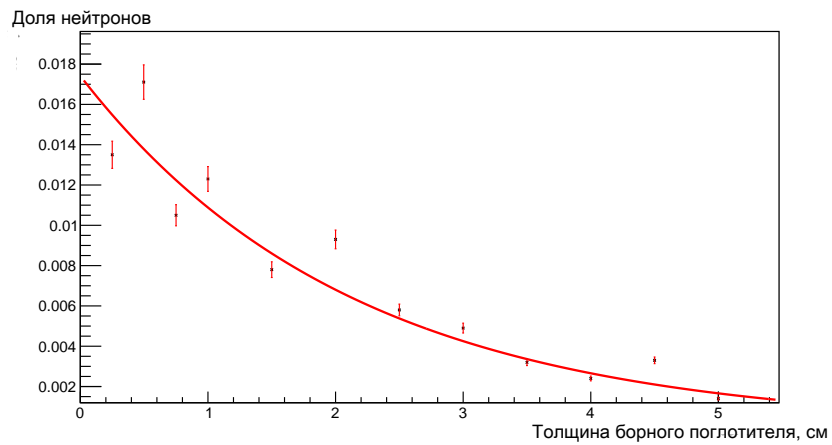
Толщина борного поглотителя, см	Захвачено борным поглотителем	Захвачено сцинтилляторами	Не захвачено	Количество влетевших нейтронов
0,25	8891	305	804	10000
0,5	8724	341	935	10000
0,75	9092	275	633	10000
1	9004	293	703	10000
1.5	9221	248	531	10000
2	9332	263	405	10000
2,5	9458	228	314	10000
3	9509	219	272	10000
3,5	9608	202	190	10000
4	9617	194	189	10000
4,5	9640	203	157	10000
5	9691	184	125	10000



а) Захвачено борным поглотителем



б) Захвачено сцинтилляторами



в) Не захвачено

Рисунок 3.2 — Количество захваченных нейтронов в зависимости от толщины борного поглотителя

### 3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАХВАТА НЕЙТРОНОВ ОТ КОНСТРУКЦИИ СБОРКИ

Поскольку модульный детектор должен захватывать все влетающие в него нейтроны, необходимо определить минимальное количество сцинтилляторов, находящихся в детекторе. Проведенные измерения представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 — Количество захваченных нейтронов в зависимости от количества сцинтилляторов

Количество сцинтилляторов	Толщина борного поглотителя, мм	Захвачено борным поглотителем	Захвачено сцинтилляторами	Не захвачено
3 · 3	2,5	8891	305	804
5 · 5	2,5	9665	310	25
7 · 7	2,5	9678	322	0
	1	9694	306	0

Получено, что при 7 · 7 сцинтилляторах в модульном детекторе захватываются все влетающие нейтроны. Поэтому было проведено дополнительное измерение при толщине борного поглотителя 1 мм, где также были захвачены все нейтроны.

## 4. ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

### 4.1. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Модель установки представлена на рисунке 4.1. Были смоделированы пластиковый сцинтиллятор и фотокатод ФЭУ. Параметры приборов соответствуют параметрам лабораторной установки. Был подобран зазор между фотокатодом и сцинтиллятором, равный 1 мм, для учета неплотного прилегания фотокатода к сцинтиллятору в экспериментальной установке.

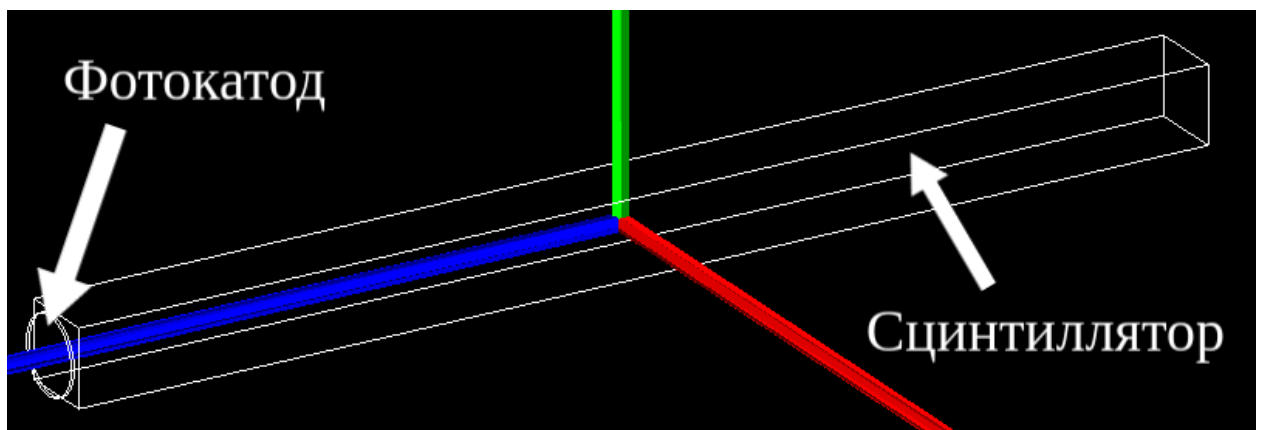


Рисунок 4.1 — Модель сцинтиллятора

## 4.2. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

### 4.2.1. СНЯТИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЛИЧЕСТВА РЕГИСТРИРУЕМЫХ ФОТОНОВ ОТ РАЗМЕРОВ СЦИНТИЛЛЯТОРА

Светособирание зависит от размеров пластикового сцинтиллятора. Следовательно, для увеличения интенсивности регистрируемого потока фотонов разумно подобрать сцинтиллятор, определив его оптимальные габариты.

В этой работе разыгрывались моноэнергетичные электроны энергии 500 кэВ в центре сцинтиллятора в телесный угол  $4\pi$ . Были измерены средние значения положения пика фотонов  $\bar{n}_{ph}$  для различной длины  $l$  и площади поперечного сечения  $S$  пластикового сцинтиллятора. Полученные значения были занесены в 2D-гистограмму, изображенную на рисунке 4.2.

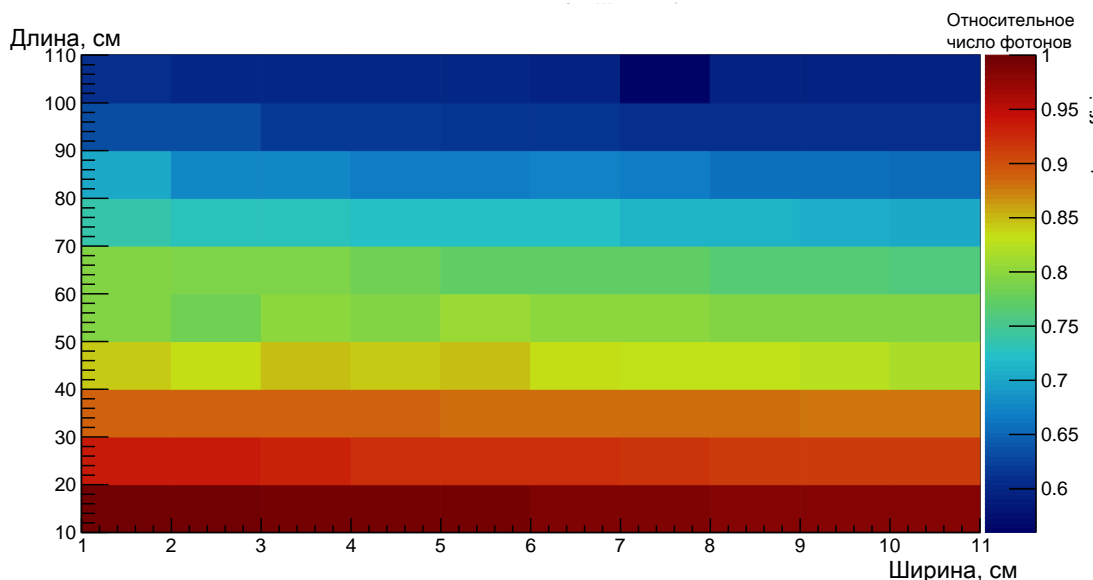


Рисунок 4.2 — Гистограмма зависимости  $\bar{n}_{ph}$  от размеров сцинтиллятора

Таким образом видно, что при уменьшении размеров сцинтиллятора светособирание увеличивается.

#### 4.2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАХВАТА НЕЙТРОНОВ ОТ РАЗМЕРОВ СЦИНТИЛЛЯТОРА

Также в работе проведено исследование зависимости эффективности нейтронного захвата от размеров пластикового сцинтиллятора. Были измерены количество захваченных сцинтиллятором нейтронов энергии 15 кэВ, которые разыгрывались в центре сцинтиллятора в телесный угол  $4\pi$ , для его различных длин и площадей поперечного сечения. Результаты исследования представлены на рисунке 4.3.

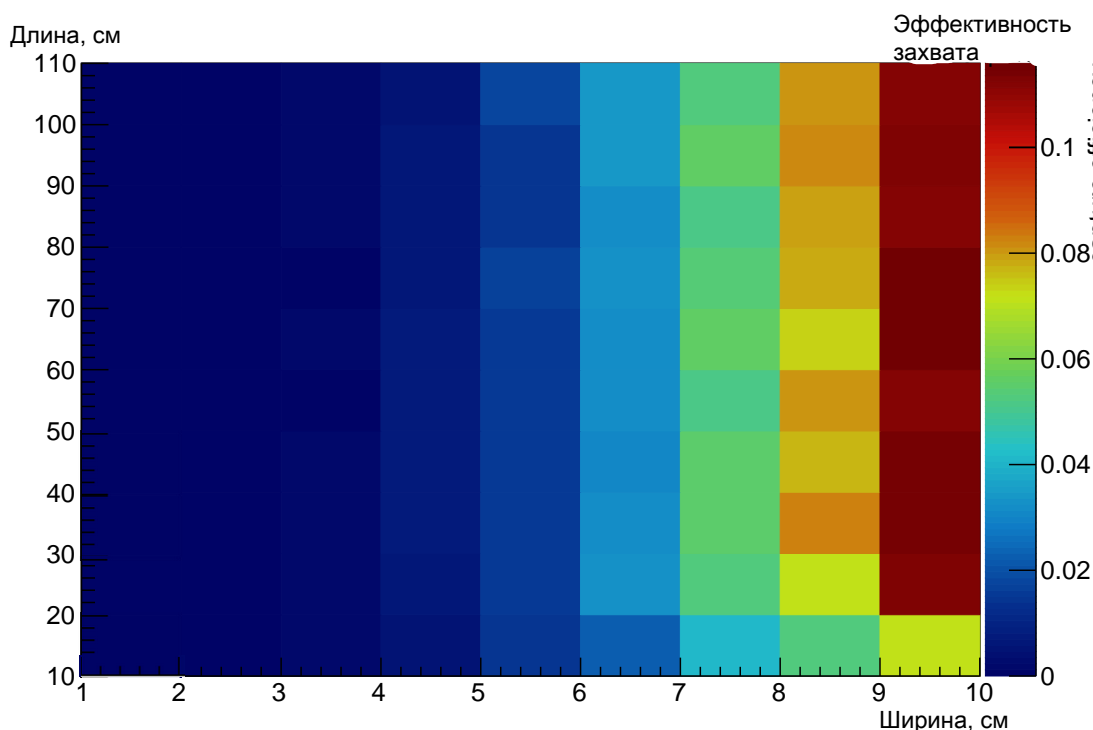


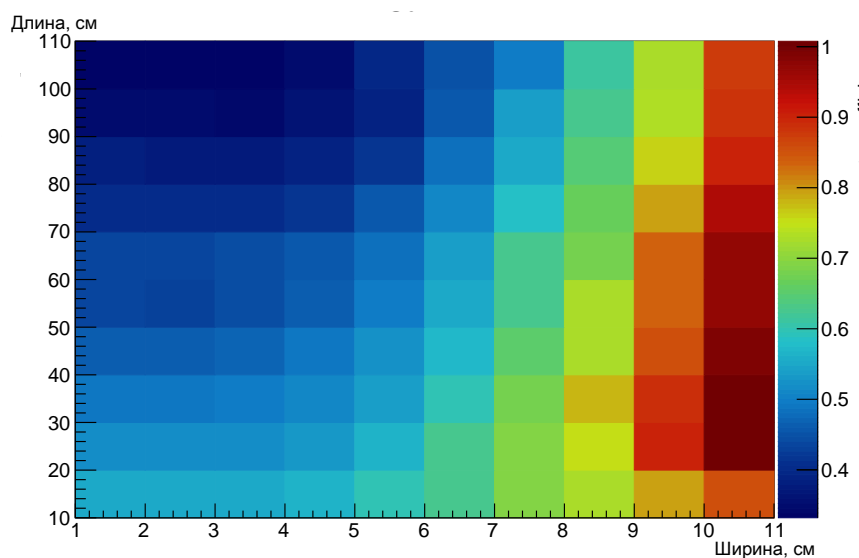
Рисунок 4.3 — Гистограмма зависимости эффективности нейтронного захвата от размеров сцинтиллятора

Таким образом видно, что при увеличении размеров сцинтиллятора эффективность захвата нейтронов увеличивается, поскольку вероятность захвата нейтрона повышается за счет увеличения длины его трека в активной среде.

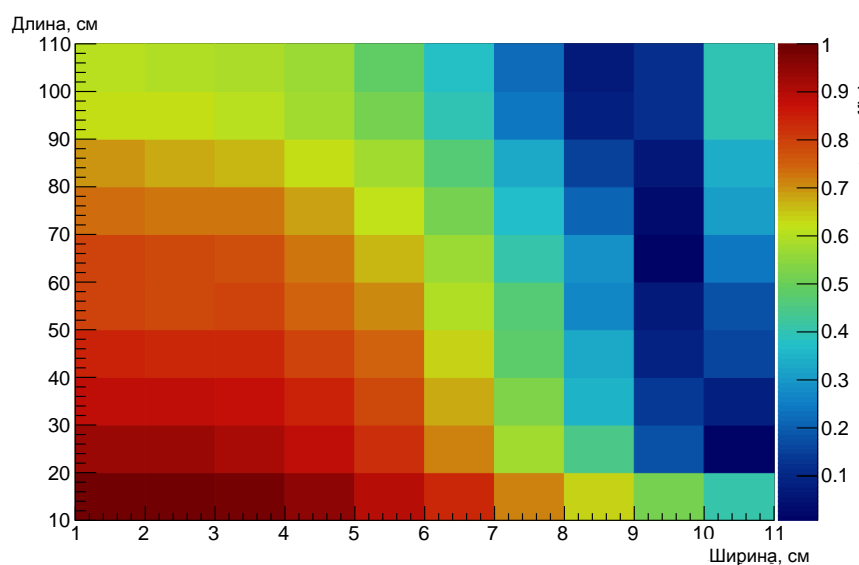


### 4.2.3. ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ СЦИНТИЛЛЯТОРА

Для определения оптимального размера пластикового сцинтиллятора необходимо достигнуть следующего условия: должны достигаться максимально возможные значения эффективности замедления нейтронов, но при этом минимальная эффективность захвата, и количества регистрируемых фотонов в системе. Для достижения этого условия посчитаны сумма и разность относительных значений этих величин.



а) Сумма



б) Разность

Рисунок 4.4 — Сумма и разность гистограмм 3.2 и 3.3

Иначе, условие максимума эффективности замедления, минимума

эффективности захвата и максимума светособирания тождественно условию стремления к единице отношения разности величин к их сумме. На рисунке 4.5 представлена гистограмма, описывающая это отношение.

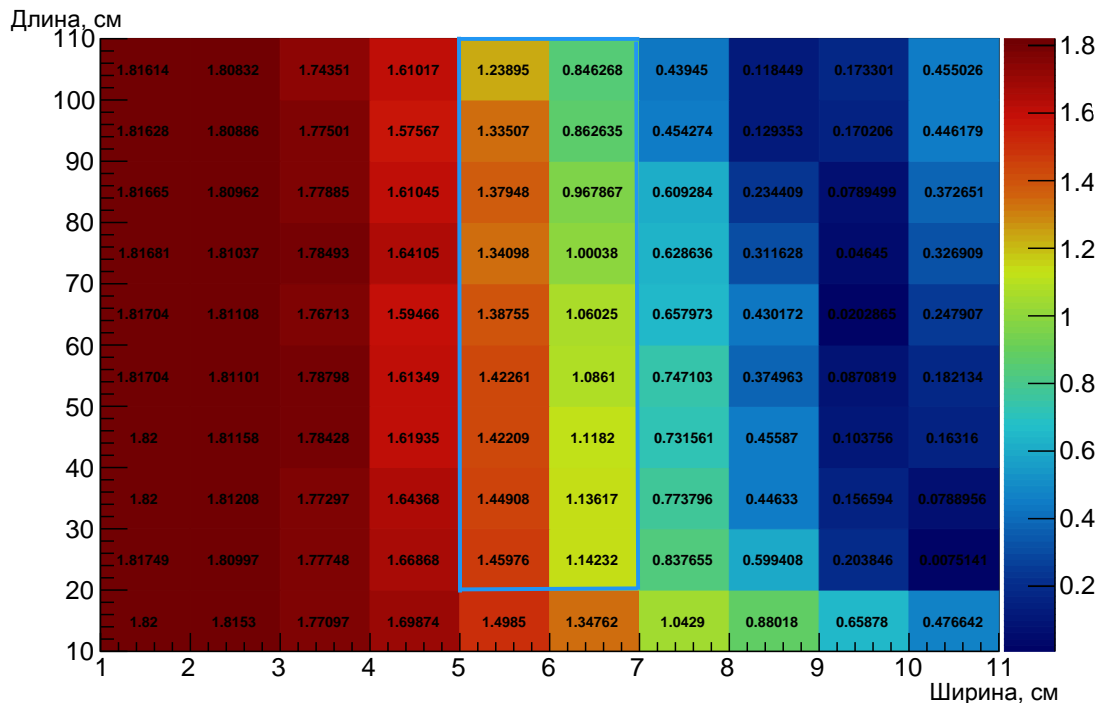


Рисунок 4.5 — Отношение разности величин к их сумме

Таким образом, получено, что максимальные значения количества регистрируемых фотонов и эффективности захвата нейтронов достигаются в области сечений сцинтиллятора  $5 \cdot 5$  -  $6 \cdot 6$  см. При этом при размерах сцинтиллятора  $6 \cdot 6 \cdot 70$  см это отношение максимально близко к единице

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено моделирование измерительного модуля детектора реакторных антинейтронов на основе пластикового сцинтиллятора.

В результате решения поставленных задач была проведена калибровка модели и проведено исследование для определения оптимальных размеров сцинтиллятора. Полученные размеры лежат в области сечений  $5 \cdot 5$  -  $6 \cdot 6$  см. Также проведена оптимизация конструкции модульного детектора, в результате которой определено, что детектор, состоящий из  $7 \cdot 7$  сцинтилляторов с нанесением 1-миллиметрового слоя борного поглотителя поглощает 100% нейтронов, запущенных из центрального сцинтиллятора.

Дальнейшее развитие работы будет включать в себя моделирование нейтронной части с борным поглотителем, а также моделирование сборки.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mikaelian L. A. Neutrino laboratory in the atomic plant. *in Proceedings of the International Conference "Neutrino 77"*, 1978.
- [2] Petr Vogel Anna C.Hayes. Reactor neutrino spectra. *arXiv*, 2016.
- [3] Mikaelyan L. A. Borovoi A. A. Possibilities of the practical use of neutrinos. *Soviet Atomic Energy*, 1978.
- [4] Muriel Fallot Chao Zhang, Xin Qian. Reactor antineutrino flux and anomaly. *HAL Science Ouverte*, 2019.
- [5] M.Fallot Th.A.Mueller, D.Lhuillier. Improved predictions of reactor antineutrino spectra. *arXiv*, 2011.
- [6] В.П. Кучинов М.Д. Скорохватов Е.П. Велихов, В.П. Кузнецов. Нейтринный контроль реакторов для применения гарантий МАГАТЭ к плавучим атомным энергоблокам. *ВАНТ*, 2022.
- [7] Ю.К.Акимов. *Детекторы ядерных излучений на основе пластиковых сцинтилляторов*. Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 1994.