

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 НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ВИТКОВ СПЕКТРОСМЕЩАЮЩЕГО  
ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ  
ПЛАСТИНЕ ДЕТЕКТОРА ВВС ЭКСПЕРИМЕНТА SPD НА  
ОТКЛИК**

Научный руководитель  
доц., к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ П.Е. Тетерин

Консультант  
старший преподаватель

\_\_\_\_\_ Ф.А. Дубинин

Студент

\_\_\_\_\_ Д.Р. Шафикова

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Эксперимент SPD.....	3
1.1    Описание экспериментальной установки SPD.....	3
1.2    Счетчик пучков BBC.....	5
2 Исследование светосбора элемента детектора BBC.....	7
2.1 Экспериментальная установка.....	7
2.2 Измерение отклика при различном числе витков спектросмещающего оптоволокна.....	7
2.3 Измерение отклика при различных длинах спектросмещающего оптоволокна.....	8
2.4 Временное разрешение детектора.....	9
Заключение.....	11
Список литературы.....	12

# ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является исследование влияния числа витков и длины спектросмещающего оптического волокна на светосбор и определение временного разрешения элемента детектора BBC.

## 1 ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

Эксперимент коллаборации SPD (Spin Physics Detector), реализующийся на базе ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ, Дубна), предназначен для исследований спиновой структуры нуклона с использованием поляризованных пучков протонов и дейтронов при энергиях столкновений до 27 ГэВ в системе центра масс, частотой взаимодействий до 4 МГц и максимальной светимостью до  $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

Энергия  $\sqrt{s} = 27 \text{ ГэВ}$  выбрана как оптимальная для реализации основной физической программы SPD. Данная энергия является достаточной для рождения чармониев ( $J/\Psi$ ), процесс образования которых за счет слияния глюонов используется в эксперименте для изучения спин-зависимых глюонных распределений. Также эта энергия покрывает промежуток между низкоэнергетическими экспериментами до 10 ГэВ и высокоэнергетическими экспериментами до 13 ТэВ, что позволяет провести проверку теоретических моделей спиновой структуры нуклона в кинематическом диапазоне, недоступном предыдущим экспериментам.

Помимо измерений спиновых асимметрий в реакциях с участием чармониев к задачам эксперимента относится реконструкция вторичных вершин распадов короткоживущих частиц (например, D-мезонов) с высокой пространственной точностью, проведение измерений с минимальной систематической ошибкой за счет безтриггерной системы, идентификация рожденных в столкновениях частиц и т.д.

### 1.1 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ SPD

Эксперимент SPD представляет собой универсальный 4 $\pi$ -детектор. Вся детекторная система размещена внутри соленоидного магнитного поля и симметрична вокруг оси пучка (Рисунок 1.1).

В центре SPD расположен сверхпроводящий соленоид, создающий однородное магнитное поле до 1 Тл. Вершинный детектор (Vertex detector) расположен вокруг точки взаимодействия и представляет собой кремниевый пиксельный детектор, обладающий высокой радиационной стойкостью. Основной задачей детектора является точное

определение первичной вершины столкновений. Его пространственное разрешение  $<100$  мкм, что достаточно для реконструкции вторичных вершин короткоживущих частиц.

Внутренняя трековая система работает в магнитном поле соленоида и представляет собой straw детектор, окружающий вершинный детектор в несколько цилиндрических слоев.

Разрешение детектора по поперечному импульсу  $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \approx 1\%$  для частиц с импульсом  $p \sim 1$  ГэВ.

Времяпролетная система (Time-of-flight system) располагается за трековой системой. TOF-детектор используется для идентификации заряженных адронов ( $\pi$ , K, p) и измерения скорости частиц по времени пролета. Детектор обладает временным разрешением  $\sim 60$  пс. Вместе с аэрогелевым Черенковским детектором увеличивается диапазон энергий для разделения адронов ( $\pi/K$ ,  $K/p$ ).

Электромагнитный калориметр (Electromagnetic calorimeter, ECal) окружает времяпролетную систему и используется для регистрации электромагнитных ливней. К его задачам относятся измерение энергии фотонов и электронов, а также реконструкция нейтральных мезонов ( $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ). Калориметр обладает энергетическим разрешением  $\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{5\%}{\sqrt{E}}$ .

Мюонная система (Range system) – внешняя система SPD, следующая за калориметром, которая состоит из чередующихся слоев поглотителя (железа) и координатных детекторов. Используется для регистрации распадов  $J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ .

Счетчик пучков (Beam-Beam Counters, BBC) представляет собой сцинтилляционный детектор и отвечает за локальную поляриметрию, измерение числа столкновения, а также мониторинг светимости. Калориметр нулевого угла (Zero Degree Calorimeters, ZDC) используется для регистрации частиц под малым углом.

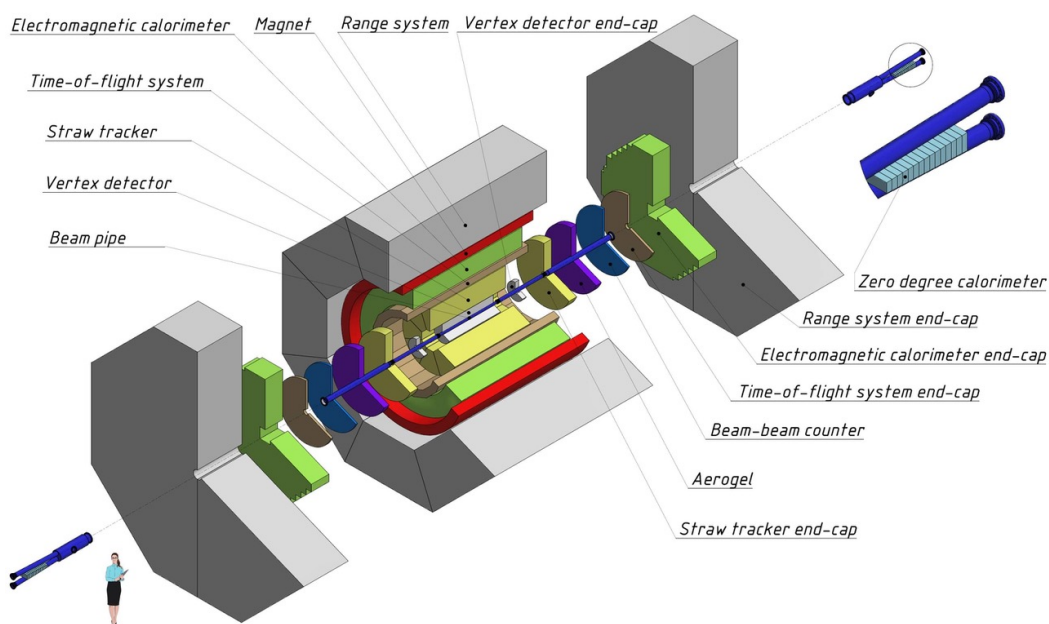


Рисунок 1.1 – Строение детекторной системы SPD

## 1.2 СЧЕТЧИК ПУЧКОВ ВВС

Детектор ВВС состоит из 16 секторов (Рисунок 1.2а), каждый из которых состоит из 26 тайлов (сцинтилляционных пластин). Вместе 16 секторов образуют одно из двух колец (Рисунок 1.2б). Один тайл представляет собой пластиковый сцинтиллятор из полистирола трапецевидной формы, покрытый титановыми белилами для эффективного диффузного отражения. Внутри тайла находится WLS-волокно (спектросмещающее оптическое волокно), скрученное в 3 витка. Спектросмещающее волокно вместе с чистым оптоволоком участвуют в сборе света, который далее регистрируется при помощи SiPM (кремниевых фотоумножителей).

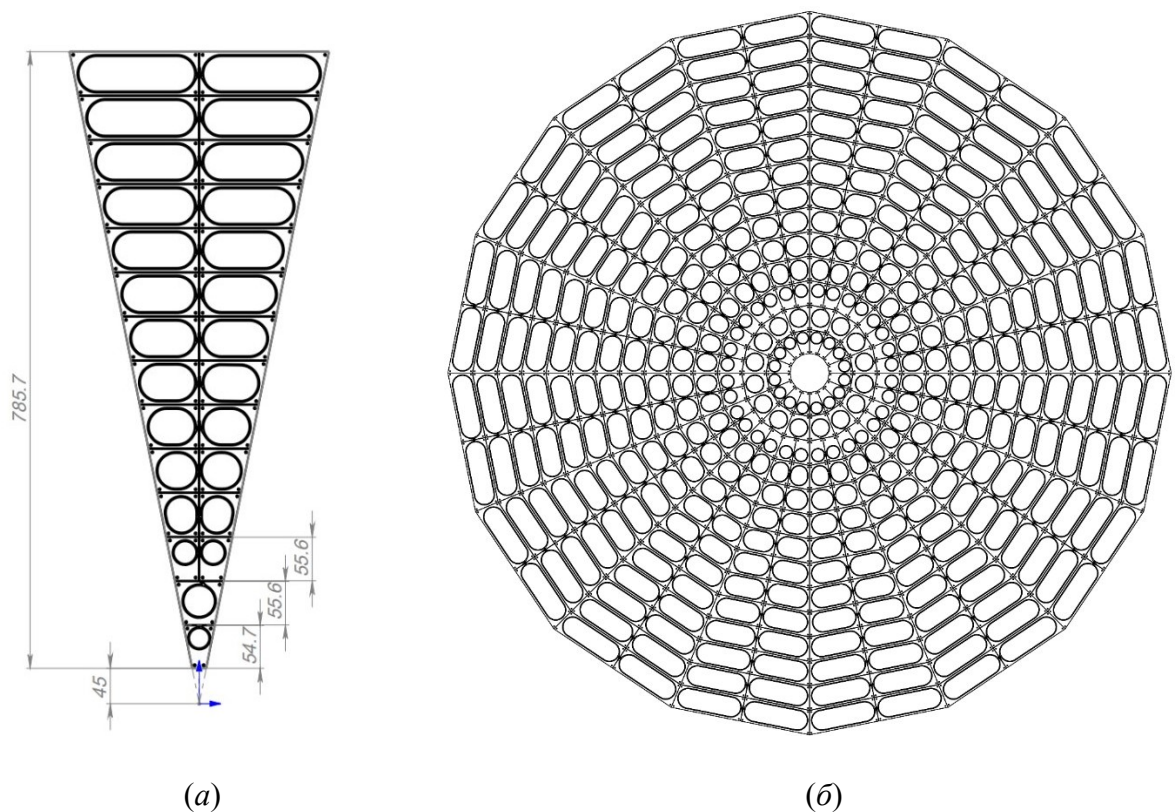


Рисунок 1.2 – Геометрия сектора (а) и колеса (б) ВВС

Система детекторов ВВС располагается симметрично по обе стороны от точки взаимодействия. Такое расположение позволяет регистрировать частицы, вылетающие в противоположных направлениях, и использовать разность времен прихода сигналов для реконструкции координат вершины.

Одной из задач детектора является формирование триггера на основе регистрации сигналов, логики совпадения между левым и правым колесами и пороговой дискриминации по амплитуде. Также, в тяжелоионных столкновениях детектор ВВС используется для оценки центральности и множественности событий, определяемых из геометрии столкновения, измеренного сигнала и числа сработавших сегментов колеса.

ВВС играет важную роль в программе по исследованию спиновой структуры адронов эксперимента SPD. Изучение спин-зависимых эффектов и локальной поляриметрии реализуется за счет измерения азимутальных распределений вылетевших после взаимодействия частиц. Таким образом, ВВС представляет собой счетчик частиц, использующийся для определения неравномерности распределения частиц по углу  $\varphi$ .

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОСБОРА ЭЛЕМЕНТА ДЕТЕКТОРА ВВС

### 2.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка включает в себя генератор импульсов RIGOL DG4102, осциллограф LeCroy WaveRunner 620Zi, источник-измеритель Keithley 2400 SourceMeter, 2 Onsemi 1x1 мм<sup>2</sup> и 3x3 мм<sup>2</sup> SiPM'а, WLS-волокно Saint Gobain, пластиковый сцинтиллятор из полистирола и светодиод. Принципиальная схема представлена на рисунке 2.1.

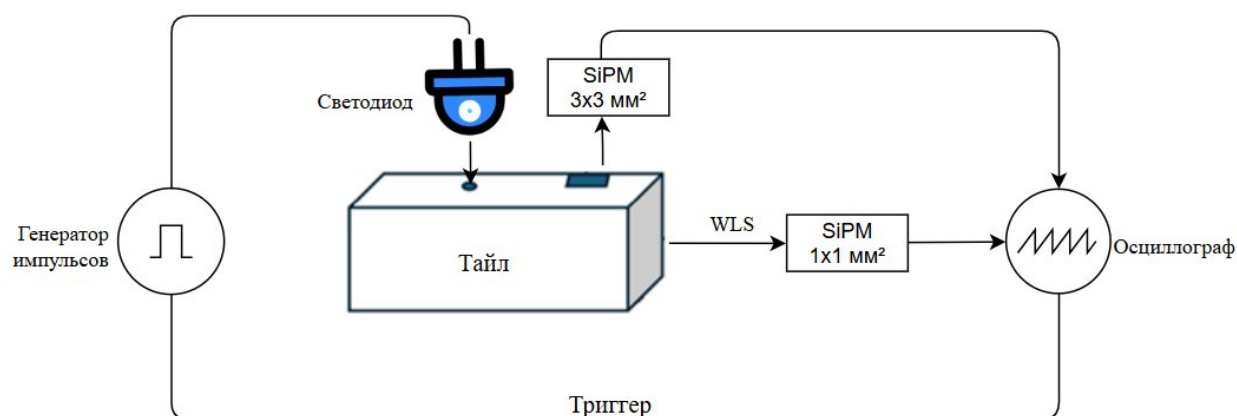


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема экспериментальной установки

Для имитации прохождения частицы в тайле просверлено отверстие, в которое вкладывается оптоволокно. При помощи коннектора к волокну крепится светодиод, на который подаются прямоугольные импульсы. Этот сигнал собирается спектросмещающим оптоволокном и регистрируется SiPM 1x1 мм<sup>2</sup>. В качестве референсного сигнала используется сигнал от SiPM 3x3 мм<sup>2</sup>, который оптически связан с сцинтиллятором. Референсный сигнал необходим для контроля распространения света в тайле, а также позволяет мониторить эффективность поглощения света WLS-волокном.

### 2.2 ИЗМЕРЕНИЕ ОТКЛИКА ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЧИСЛЕ ВИТКОВ СПЕКТРОСМЕЩАЮЩЕГО ОПТОВОЛОКНА

В конструкции экспериментального тайла предусмотрена возможность варьировать число витков WLS-волокна, что позволяет измерить изменение светового отклика, изменяя число оборотов волокна внутри сцинтиллятора от 1 до 6.

На рисунке 2.2а представлена зависимость среднего зарядового спектра основного сигнала от числа витков WLS-волокна. С увеличением числа витков наблюдается рост отклика,

который можно объяснить увеличением эффективности светосбора, возникающим за счет расширения области взаимодействия WLS-волокна с объемом сцинтиллятора.

С увеличением числа витков до 3 – 4 эффективность светосбора увеличивается в 1,2 – 1,9 раз относительно малого числа витков (1 – 2 витка). При дальнейшем увеличении числа витков до 5 – 6 рост сигнала становится менее выраженным (увеличивается в 1,1 – 1,2 раз), что может свидетельствовать о приближении к области насыщения, которая связана с увеличением потерь на изгибах волокна.

На рисунке 2.2б показана зависимость среднего зарядового спектра референсного сигнала от числа витков. Характер зависимости описывается функцией вида:

$$f(x) = Ae^{\frac{-x}{\tau}} + C \quad \#(2.1)$$

Уменьшение отклика, возникающее с увеличением числа витков волокна внутри тайла, показывает эффективность сбора и переноса света спектросмещающим волокном.

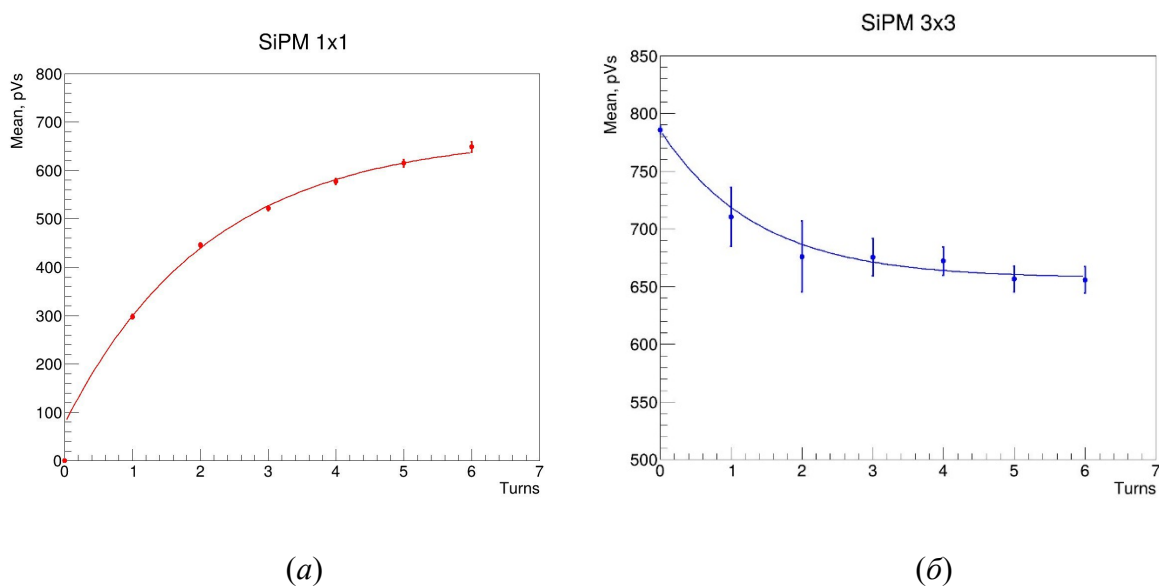


Рисунок 2.2 – Отклик при различном числе витков для основного сигнала (а) и для референсного сигнала (б)

## 2.3 ИЗМЕРЕНИЕ ОТКЛИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИНАХ СПЕКТРОСМЕЩАЮЩЕГО ОПТОВОЛОКНА

Для исследования влияния длины WLS-волокна на отклик детекторного элемента проводилась серия измерений при различном удалении SiPM 1x1 мм<sup>2</sup> от сцинтиллятора. Измерения проводились для трех значений длин: 5 см, 1 м и 6 м.



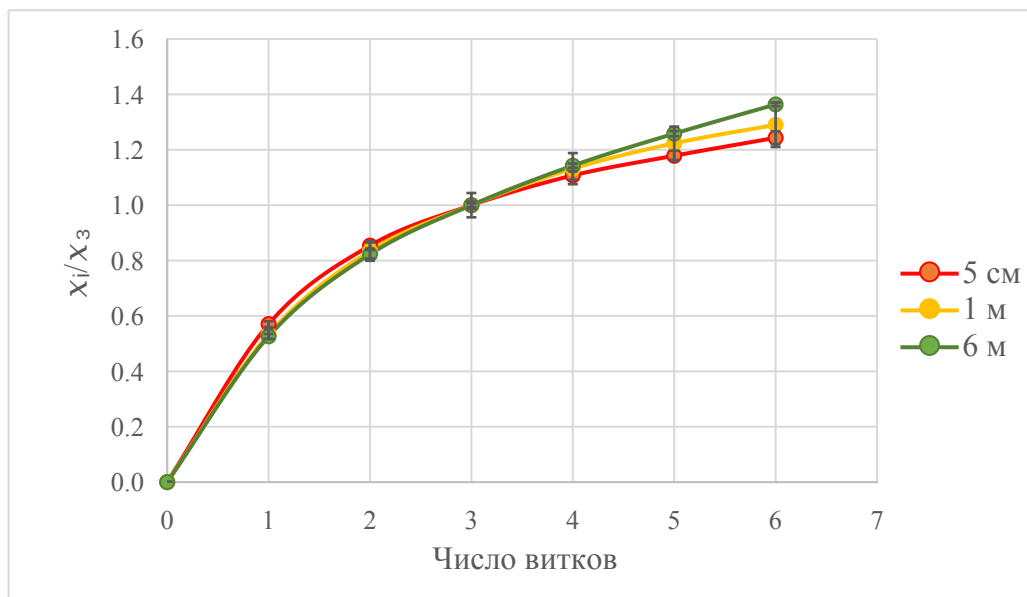


Рисунок 2.3 – Отклик при изменении расстояния между тайлом и SiPM 1x1 мм<sup>2</sup>

На рисунке 2.3 представлены зависимости нормированных значений амплитуды от числа витков WLS-волокна при различном удалении тайла от SiPM. Значения нормировались на амплитуду  $\chi_3$ , соответствующую среднему зарядовому спектру, полученному при трех витках, и использовались для исследования относительной эффективности светосбора при изменении числа витков.

Результаты демонстрируют похожие формы кривых для различных длин. Это означает, что характер зависимости не меняется с изменением длины оптического тракта.

## 2.4 ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ДЕТЕКТОРА

Временное распределение определялось как разность времени между сигналом и внешним триггером. Тогда, стандартное отклонение этого распределения является временным разрешением системы.

На рисунке 2.4 изображена оценка масштаба временного разрешения для различного числа витков. Так как стандартное отклонение вычислялось автоматически по выборке, график представлен без ошибок, в связи с чем оценить характер зависимости нельзя.

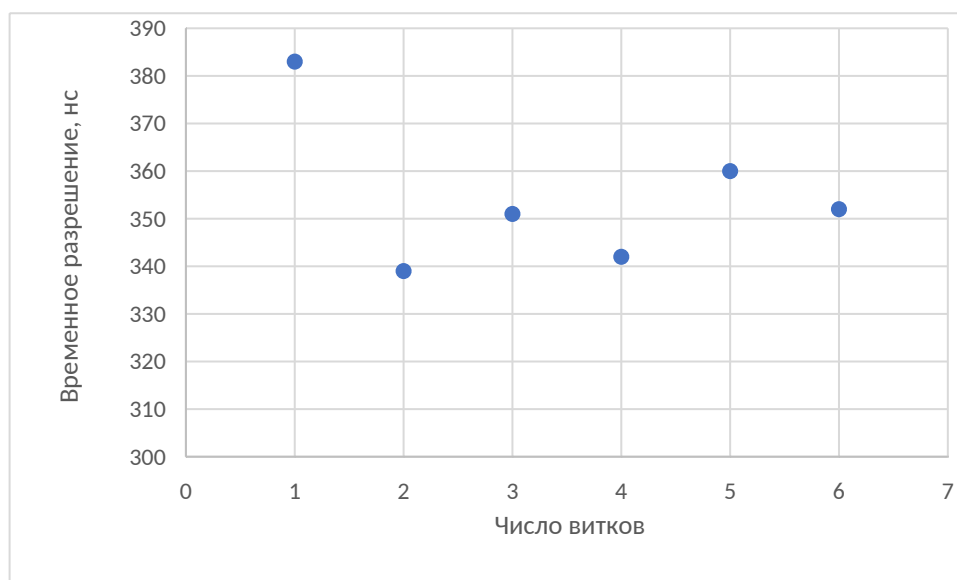


Рисунок 2.4 – Зависимость временного разрешения от длины оптического пути

Оценка среднего временного разрешения:  $(354,5 \pm 2,6)$  пс

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе было проведено исследование влияния числа витков и длины WLS-волокна на световой отклик и временное разрешение элемента детектора BBC.

Показано, что при увеличении числа витков волокна внутри тайла эффективность светосбора повышается. Наиболее существенный рост светового отклика наблюдается при увеличении числа витков до 3 – 4. При дальнейшем добавлении витков этот эффект становится менее выраженным, что можно связать с приближением к области насыщения и возрастанием оптических потерь на длине и изгибах. Сигнал с референсного SiPM 3x3 мм<sup>2</sup> подтвердил эффективность поглощения света внутри тайла WLS-волокном.

Характер зависимости светового отклика от числа витков сохраняется при различных расстояниях между сцинтиллятором и фотоприемником.

Оценка среднего временного разрешения:  $(354,5 \pm 2,6)$  пс.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abazov V. et al. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // Nat ural Science Review. – 2025. – Apr. – Vol. 1, no. 1. – P. 1. – Access mode: <https://nsr.jinr.ru/index.php/nsr/article/view/35>.
2. Abazov V. M. et al. Conceptual design of the Spin Physics Detector. – 2021. – Jan. – 2102.00442.
3. Zakharov A. M. et al. Tile Detector Configurations Testing for the SPD BeamBeam Counter Prototype // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2024. – Vol. 21, no. 4. – P.735–738.
4. Tishevsky A. V., Dubinin F. A. et al. Development of the SPD Beam–Beam Counter Scintillation Detector Prototype with FERS-5200 Front-End Readout System // Phys. Atom. Nucl. – 2024. – Vol. 87, no. 4. – P. 451– 458.