

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»

УДК 531.3, 539.1.05

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Разработка программного обеспечения и оптимизация системы
контроля качества элементов сцинтилляционного детектора
ВВС для эксперимента SPD**

Студент

_____ Е. А. Чекмаев

Научный руководитель,

к.ф.-м.н.,

_____ П. Е. Тетерин

Москва 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1 Эксперимент SPD	4
1.1 Введение и цели эксперимента	4
1.2 Строение детектора SPD	5
1.3 Счётчики встречных пучков (Beam-Beam Counters)	6
1.4 Актуальность разработки стенда для проверки сцинтилляционных детекторов BBC	8
2 Представление результатов	9
Представление результатов	9
2.1 Разработка прошивки контроллера рентгеновского сканера .	9
2.2 Разработка программ приёма-передачи команд на МК и рентгеновскую трубку	12
2.3 Новая каретка для трубки	13
2.4 Пропуск шагов при работе сканера	13
Заключение	17
Список используемых источников	18

ВВЕДЕНИЕ

В рамках эксперимента SPD (Spin Physics Detector) на коллайдере NICA ключевую роль в решении широкого круга физических задач играют детекторы встречных пучков – Beam-Beam Counters (BBC). Эти детекторы, расположенные в прямом и обратном конусах установки на расстоянии приблизительно ± 1.7 м от точки взаимодействия, выполняют несколько критически важных функций. К основным задачам BBC относятся: локальная поляриметрия в столкновениях поперечно-поляризованных протонных пучков на основе измерения азимутальных асимметрий, мониторинг столкновений пучков, точное определение времени события и восстановление плоскости события в исследованиях с ион-ионными столкновениями.

Конструктивно BBC состоит из двух частей: внутренней (покрывающей углы 30–60 мрад) и внешней (60–500 мрад). Внешняя часть, являющаяся предметом настоящей работы, представляет собой высокогранулированный детектор, выполненный из пластиковых сцинтилляционных плиток (тайлов). Каждая из 16 азимутальных секций одного BBC содержит 25 концентрических тайлов, что в сумме для двух детекторов составляет 800 независимых каналов регистрации. Светосбор в каждом канале осуществляется посредством спектросмещающего оптоволокну, соединенного с кремниевым фотоумножителем. Чтение сигналов производится с помощью системы FERS-5200 (CAEN DT5202).

Проведенные моделирования и опытно-конструкторская работа, определили оптимальные материалы для производства детектора: полистироловый сцинтиллятор с матовой поверхностью, оптический клей ОК-72 в соотношении компонентов 76/24. Эффективность и стабильность работы такого сложного детекторного массива напрямую зависят от качества и идентичности отклика каждого из сотен сцинтилляционных каналов.

В связи с этим возникает необходимость в специализированном устройстве

для оперативной и комплексной проверки работоспособности сцинтилляционных детекторов внешней части ВВС до их интеграции в установку и в процессе эксплуатации. Такое устройство должно решать следующие задачи:

- Функциональный тест: Проверка целостности сцинтилляционных плиток, волокон и оптических соединений.
- Контроль качества: Выявление дефектов производства или повреждений, полученных при транспортировке или монтаже.

Целью данной работы является разработка, создание и тестирование автоматизированного стенда для проверки сцинтилляционных детекторов внешней части ВВС, соответствующего перечисленным требованиям и обеспечивающего надежную подготовку детекторной системы к физическому набору данных в эксперименте SPD.

1 ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

1.1 ВВЕДЕНИЕ И ЦЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Коллаборация **Spin Physics Detector (SPD)** предлагает установить универсальный детектор во второй точке взаимодействия коллайдера **NICA** (ОИЯИ, Дубна) для изучения спиновой структуры протона, дейтрона и других явлений, связанных со спином, с помощью поляризованных пучков протонов и дейтронов [1]. Проект реализуется в два этапа.

На **первом этапе (Stage I)** планируется изучение поляризованных явлений при энергиях до $\sqrt{s} = 9.4$ ГэВ для p - p и $\sqrt{s} = 4.5$ ГэВ/нуклон для d - d столкновений со светимостью до 10^{31} см $^{-2}$ с $^{-1}$. Основное внимание будет уделено упругому рассеянию, рождению чармония у порога и другим эксклюзивным процессам.

На **втором этапе (Stage II)**, при достижении проектных энергий (до 27 ГэВ) и светимостей (до 10^{32} см $^{-2}$ с $^{-1}$), фокус сместится на изучение поляризованной глюонной составляющей в реакциях инклюзивного рождения чармониев, открытого чарма и прямых фотонов. Эксперимент SPD заполнит уникальную нишу в кинематическом диапазоне между низкоэнергетическими установками (COSY, SATURNE) и коллайдерами высоких энергий (LHC) (рис. 1.1).

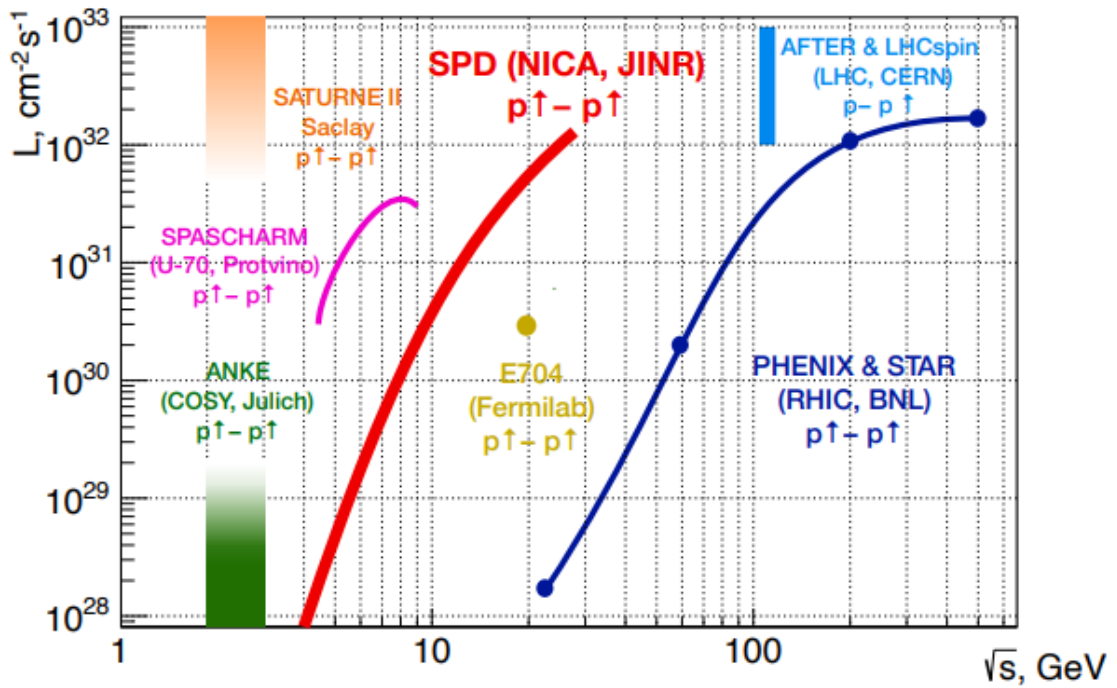


Рисунок 1.1 — SPD NICA и другие прошлые, современные и будущие эксперименты с поляризованными протонами

1.2 СТРОЕНИЕ ДЕТЕКТОРА SPD

SPD проектируется как универсальный 4π -детектор с низкой радиационной длиной, оснащённый триггерной DAQ-системой. Общая структура включает следующие ключевые подсистемы:

- **Магнитная система:** Сверхпроводящий соленоид, создающий поле до 1 Тл для спектрометрии.
- **Трековая система:** На первом этапе – Straw трекер и центральный трекер на базе Micromegas. На втором этапе МСТ заменяется на Кремниевый вершинный детектор для реконструкции вторичных вершин, а ST остаётся для трекинга.
- **Система идентификации частиц:** На первом этапе – измерение dE/dx в ST и мюонная система Range System. На втором этапе добавляются время-пролётная система с разрешением ~ 50 пс и Черенковский детектор на аэрогеле.
- **Калориметрия:** Электромагнитный калориметр (ECal) с разрешением $\sim 5\%/\sqrt{E}$ для регистрации фотонов. На первом этапе может быть установлен его прототип.

- **Поляриметрия и мониторинг:** Два торцевых Beam-Beam Counter'а (BBC) и два калориметра нулевого угла (ZDC).

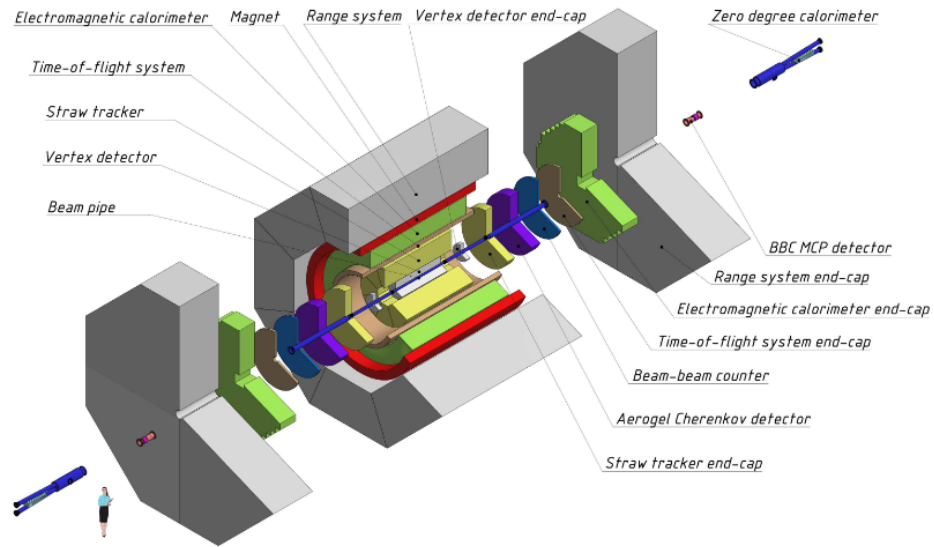


Рисунок 1.2 — Компоновка детектора SPD.

Таблица 1.1 — Основные параметры установки SPD на разных этапах.

Параметр	Stage I	Stage II
Макс. светимость, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	10^{31}	10^{32}
Магнитное поле, Тл	1.0	1.0
Кол-во каналов, тыс.	~ 177	~ 280
Разрешение по импульсу (1 ГэВ/с), %	~ 1.7	~ 1.0
Вес, т	~ 1249	~ 1253

1.3 СЧЁТЧИКИ ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ (BEAM-BEAM COUNTERS)

Два детектора BBC являются критически важной подсистемой SPD, особенно на первом этапе эксперимента. Они будут расположены в прямом и обратном торцах установки на расстоянии приблизительно ± 1.7 м от точки взаимодействия. Основные задачи BBC:

- 1) **Локальная поляриметрия** на основе измерения азимутальных асимметрий в инклюзивном рождении заряженных частиц.
- 2) **Мониторинг** столкновений пучков и светимости.

- 3) **Определение времени события (t_0)**, особенно для упругих событий, где другие детекторы неэффективны.
- 4) **Предварительный отбор (пре-триггер)** событий для мониторинга жёстких процессов.

Конструктивно каждый ВВС состоит из двух частей (рис. 1.3):

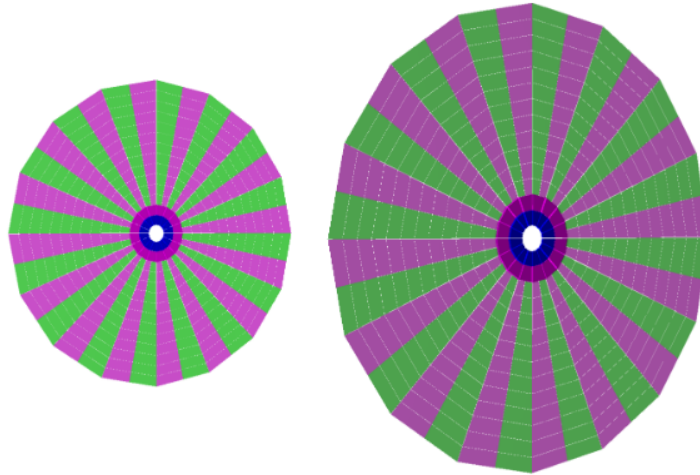


Рисунок 1.3 — Конструкция счетчика пучков (ВВС).

- **Внутренняя часть:** основана на быстрых микроканальных пластинах (Microchannel Plate, MCP), размещаемых внутри вакуумной трубы. Высокое временное разрешение (~ 50 пс) необходимо для точного определения t_0 .
- **Внешняя часть:** является предметом настоящей работы. Она представляет собой сцинтилляционный детектор, выполненный в виде массива пластиковых тайлов. Согласно последнему дизайну, внешняя часть будет разделена на **5–6 концентрических слоёв** по радиусу, каждый из которых сегментирован на **16 азимутальных секторов**. Таким образом, в каждом ВВС будет от 80 до 96 независимых сцинтилляционных каналов, а для двух детекторов – порядка **800 каналов** в сумме.

Каждый сцинтилляционный тайл будет соединён со смещающим оптоволоком, которое собирает и переносит свет к кремниевому фотоумножителю (SiPM). Считывание сигналов со всех SiPM планируется осуществлять с помощью высокоплотной электронной системы CAEN FERS-5200 (DT5202).

1.4 АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ СТЕНДА ДЛЯ ПРОВЕРКИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ВВС

Высокая гранулярность и большое число каналов внешней части ВВС, а также строгие требования к стабильности и идентичности их отклика для задач поляриметрии, создают необходимость в комплексном контроле качества на всех этапах жизненного цикла детектора: от производства и сборки до ввода в эксплуатацию и текущего обслуживания. Для обеспечения надёжной работы системы ВВС в эксперименте SPD требуется специализированный инструмент, позволяющий проводить оперативную и массовую проверку сцинтилляционных модулей.

Целью данной работы является разработка, создание и испытания ПО прототипа автоматизированного стенда для проверки работоспособности и основных характеристик сцинтилляционных детекторов (тайлов) внешней части ВВС.

Ключевые задачи, решаемые с помощью такого стенда:

- 1) **Функциональный контроль:** проверка целостности сцинтиллятора, качества полировки и покрытия поверхности, надёжности соединения со спектросмещающим волокном.
- 2) **Измерение световыхода:** оценка амплитуды сигнала и её однородности по всей площади тайла для предсказания эффективности детектирования.
- 3) **Контроль качества и идентификации:** документирование характеристик каждого детекторного модуля для создания базы данных и оперативного выявления деградации.

2 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1 РАЗРАБОТКА ПРОШИВКИ КОНТРОЛЛЕРА РЕНТГЕНОВСКОГО СКАНЕРА

Система контроля качества элементов сцинтиляционного детектора состоит из установки рентгеновского сканера, включающего в себя рентгеновскую трубку, систему управления движения трубки с числовым программным управлением, реализованным на базе микроконтроллера ATmega 328-PU, и двух драйверов шаговых двигателей на базе микросхемы A4988, и устройства CAEN DT5202, выполняющего функцию блока питания для SiPM. Проблема работы имеющейся прошивки микроконтроллера заключалась в следующем:

- Отсутствовала универсальная для микроконтроллера ATmega, вследствие чего для каждой траектории необходимо было загружать в МК прошивку с новой схемой движения.
- Отсутствовала обратная связь с управляющим компьютером, синхронизация со считывателем производилась по заранее установленным временным интервалам, что приводило к увеличению времени простоя оборудования и сказывалось на скорости составления тепловых карт.
- Отсутствовала возможность оценить точность составления тепловых карт.

Исходя из данных проблем были сформулированы требования для разработки новой прошивки МК:

- Создание прошивки для МК с поддержкой оптимизированного языка G-code
- Необходимость наличия связи МК -> компьютер и компьютер -> МК

для возможности синхронизации движения и сбора данных в точке.

- Наличие возможности оценить количество пропущенных шагов за движение в промежутке между установками нуля в системе координат станка.//

Разработка прошивки для МК велась в VS Code в расширении Platform IO на языке C++. Первым этапом стал поиск низкоуровневых библиотек для работы с драйвером шагового двигателя A4988. Далее был создан класс для управления движения двух шаговых двигателей и обработки кодов G-code поступающих через порт UART с компьютера. Прошивка поддерживает следующие команды:

- % - старт программы.

Синтаксис: %

Ответ: START

- G00 - быстрое перемещение по координатам.

Синтаксис:

G00 XN YM FK

G00 XN YM

G00 XN FK

G00 YM FK

G00 FK

где

N - количество мм на которое нужно переместиться по оси X

M - количество мм на которое нужно переместиться по оси Y

K - скорость перемещения мм/с

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- G01 - перемещение по координатам с заданным шагом (по умолчанию - 2 мм)

Синтаксис: G01 XN YM FK

G01 XN YM

G01 XN FK

G01 YM FK

G01 FK

где N - количество мм на которое нужно переместиться по оси X M

- количество мм на которое нужно переместиться по оси Y K - ско-

рость перемещения мм/с Ответ:

STEP - сообщение о завершении шага DONE - сообщение о завершение перемещения Ok - готовность принять новую команду

- G10 - переход в новую систему координат с нулём в текущей позиции (сбрасывается после команды M40)

Синтаксис: G10

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- G22 - задание новых лимитов на перемещение (блокирует перемещение свыше указанных значений)

Синтаксис:

G22 XN YM

G22 XN

G22 YM

где

N - количество мм на которое нужно переместиться по оси X

M - количество мм на которое нужно переместиться по оси Y

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- G90 - переход в абсолютную систему координат - новые перемещения будут осуществляться до заданных точек относительно установленной нулевой точки

Синтаксис: G90

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- G91 - переход в относительную систему координат - новые перемещения будут осуществляться до заданных точек относительно установленной текущей точки

Синтаксис: G91

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- M02 - команда завершения программы

Синтаксис: M02

Ответ: END - сигнал о завершении

- M09 - включение/выключение охлаждения

Синтаксис: M09

Ответ:

Cooler on - было осуществлено включение вентилятора Cooler off - бы-

ло осуществлено выключение вентилятора Ok - готовность принять новую команду

- M40 - вернуться к концевым выключателям

Синтаксис: M40

Ответ:

Ok - готовность принять новую команду

Skipping X N - количество пропущенных шагов по оси X

Skipping Y M - количество пропущенных шагов по оси Y

- M42 - установить новый размер шага для команды G01 Синтаксис: M42 S T

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- NEXT - сделать следующий шаг, является ответом на STEP

Синтаксис: NEXT

Ответ:

STEP - сообщение о завершении шага DONE - сообщение о завершении перемещения Ok - готовность принять новую команду

2.2 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ

ПРИЁМА-ПЕРЕДАЧИ КОМАНД НА МК И РЕНТГЕНОВСКУЮ ТРУБКУ

Следующим шагом разработки программного обеспечения стала программа, предназначенная для чтения команд G-code из текстового файла и их передачи через порт UART на МК. Помимо передачи команд на МК, данная программа также записывает количество пропущенных шагов в предназначенный для этого файл и выводит сообщения STEP для синхронизации между остановкой сканера и сбором данных с SiPM. Разработка ПО велась в программном пакете VS Code на языке C++. В качестве ПО для работы с рентгеновской трубкой был использован измененный открытый исходный код, предоставленный производителем.

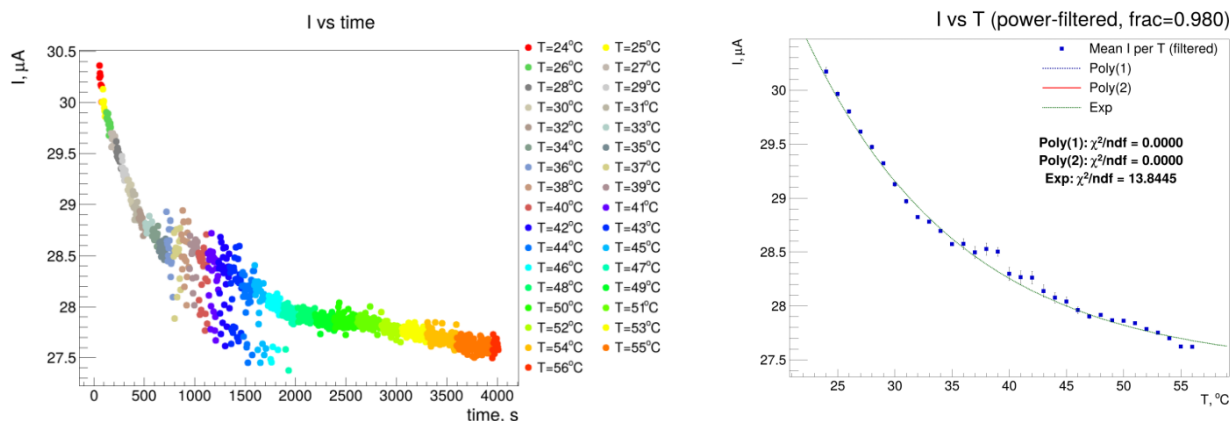


Рисунок 2.1 — Зависимость тока SiPM от времени и температуры рентгеновской трубки

2.3 НОВАЯ КАРЕТКА ДЛЯ ТРУБКИ

При работе с рентгеновской трубкой было замечено, что с течением времени температура трубки значительно возрастает и за час нагревается до предельной температуры эксплуатации 2.1

Была разработана, напечатана и внедрена новая каретка, удерживающая рентгеновскую трубку. Новая конструкция позволила увеличить поверхность охлаждения, поставить воздушное охлаждение на рентгеновскую трубку 2.2.

Эта каретка позволила заметно снизить температуру нагрева рентгеновской трубки, что видно по рисунку 2.3. За время в два раза большее, чем время работы без охлаждения температура трубки не поднялась выше 40°C . Установка одного вентилятора позволила снизить температуру на $\approx 15^{\circ}\text{C}$, и выход на стабильную температуру занял около 40 минут. Вероятно, при установке дополнительного охлаждения, уменьшится время выхода на стабильную температуру и в целом снизится рост зависимости температуры от времени.

2.4 ПРОПУСК ШАГОВ ПРИ РАБОТЕ СКАНЕРА

При тестировании программ работы сканера было выявлено, что на траектории, используемой при сканировании тайлов детектора происходит потеря шагов - появляется несоответствие между координатами, на кото-

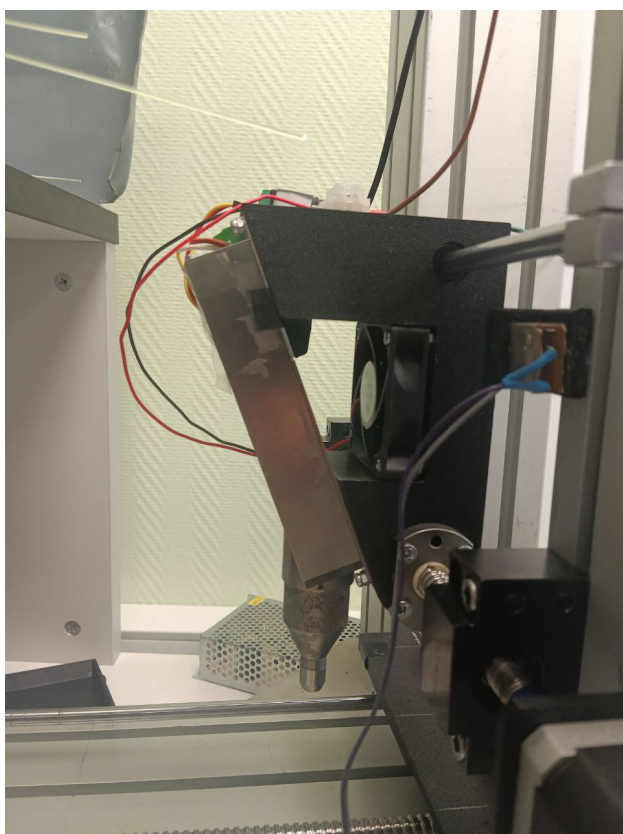


Рисунок 2.2 — Новая каретка с воздушным охлаждением

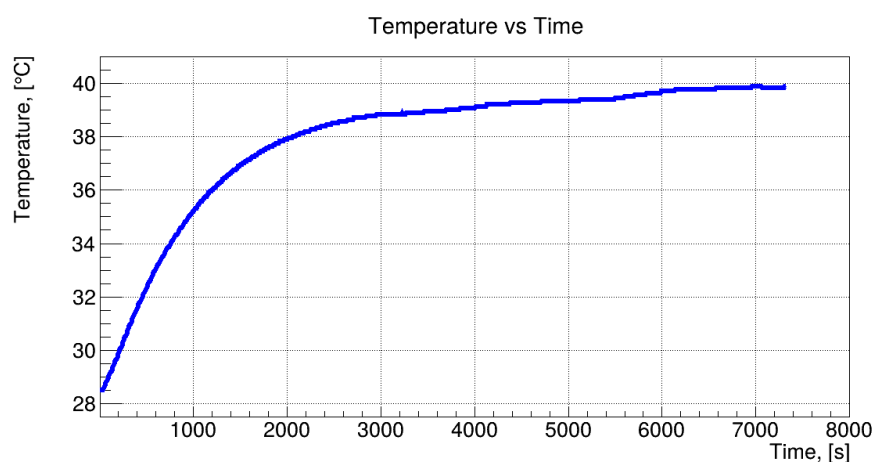


Рисунок 2.3 — Зависимость температуры от времени при наличии охлаждения

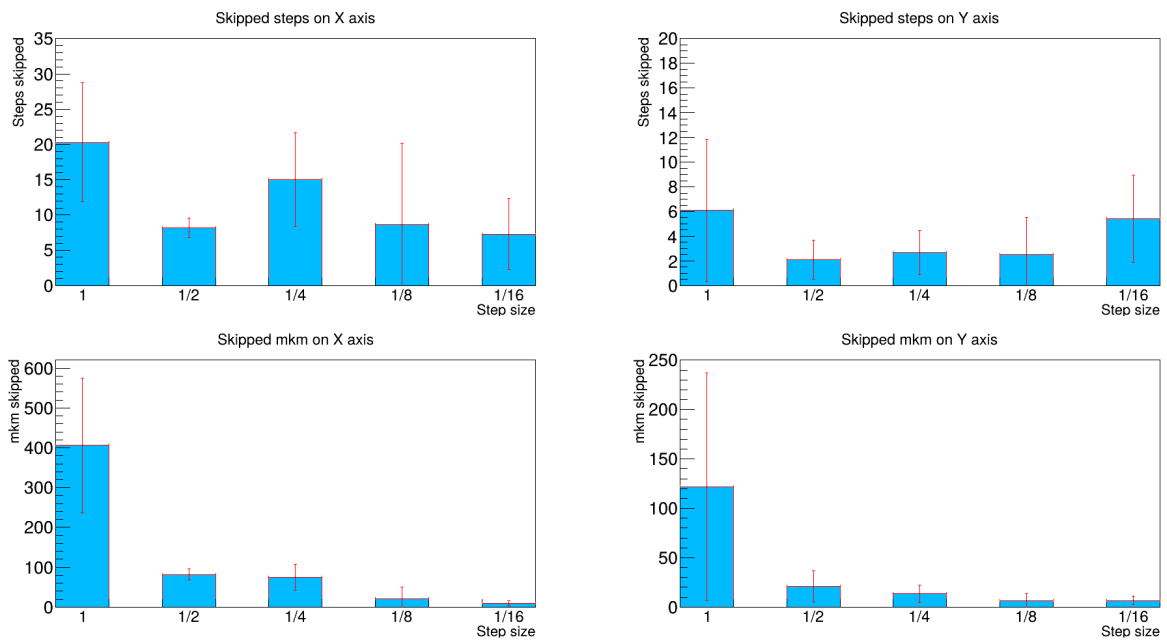


Рисунок 2.4 — Пропуски шагов и соответствующие им смещения в мкм

рых должна находиться рентгеновская трубка её реальным координатам. Это происходит вследствие различных факторов, создающих неравномерное сопротивление перемещению гайки шарико-винтовой передачи по винту. Для решения данной проблемы были произведены измерения зависимости количество пропущенных шагов от режима шага шагового двигателя, задаваемого драйвером A4988. Были взяты режимы, соответствующие целому шагу, половине, четверти, восьмой и шестнадцатой части. //

Как видно на рисунке 2.4, количество пропущенных шагов по оси X, за исключением целого шага, посчитанных при 10 проходах, достаточно равномерны. При этом, количество пропущенных микрометров у 1/16 шага значительно меньше. По оси Y наблюдается следующий тренд - от 1/16 шага до 1/2 шага, количество пропущенных шагов снижается. Это связано с тем, что по техническим причинам была произведена замена смазки на винте передачи и тестирование пропуска шагов производилось последовательно от 1/16 шага до единицы. Данные наблюдения позволяют понять, что при периодическом техническом обслуживании сканера после замены смазки необходимо производить несколько проходов гайки ШВП по винту, чтобы равномерно распределить имеющуюся смазку по винту и удалить лишнюю. Другим выводом, к которому привели данные измерения стало то, что при переходе от тестирования тайла к тестированию сектора количество пропущенных шагов - статистическая ошибка измерений по

координатам начнет накапливаться и для целого шага она может выйти за пределы допустимой погрешности, составляющей половину от диаметра рентгеновской трубки - 2 мм. При этом, при использовании $1/16$ шага данная погрешность будет наименьшей. Кроме того, при использовании $1/16$ шага шум, издаваемый при работа станка, минимален по сравнению с остальными режимами работы, что является неоспоримым преимуществом данного режима работы в контексте того, что сканер находится в лаборатории, где производятся и иные работы, требующие постоянного присутствия человека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе данной научно-исследовательской работы было написано программное обеспечение для числового программного управления рентгеновского сканера с поддержкой синтаксиса G-code, было написано программное обеспечение, необходимое для отправления и принятия кодов G-code и интерпретирования сообщений со сканера, адаптировано программное обеспечение для отправки команд и принятия сообщений с рентгеновской трубки.

Был произведен анализ зависимости числа пропущенных шагов (погрешности измерений по координатам) и выбран режим 1/16 шага как наиболее оптимальный по ряду параметров.

Была смоделирована и установлена новая каретка для рентгеновской трубки, протестирована температурная зависимость при включенном охлаждении.

Направление для дальнейшей работы:

Необходимо написать программное обеспечение для работы с CAEN DT5202, написать графический интерфейс, объединяющий функционал работы со сканером, рентгеновской трубкой и CAEN DT5202. Кроме того, необходимо улучшить охлаждение рентгеновской трубки, и разработать программное обеспечение для устройства полировки спектросмещающего оптического волокна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Collaboration S.* Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // Natural Science Review. — 2025. — Т. 1, № 1. — С. 1. — Corrected: 5 February 2025 (the surname of one of the authors was initially misspelled (M. Bolsunovskya), the correct spelling is M. Bolsunovskaya). 23 April 2025 (the surname of one of the authors was initially misspelled (A. Seleznev), the correct spelling is A. Selezenev).