

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий»
(ФГБУ ГНЦ ИФВЭ)

№ госрегистрации 01201256124.

Инв. № 4/6029

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

д-р физ.-мат. наук, проф.

Н.Е. Тюрин

14 октября 2013 г.



ОТЧЕТ

о научно-исследовательской работе

по теме:

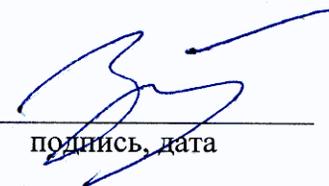
Разработка аппаратуры для исследований фундаментальных взаимодействий при повышенной светимости протон-протонных столкновений в международном проекте АТЛАС.

Заключительный, этап 4.

Разработка технических предложений для первого этапа модернизации установки АТЛАС.

Государственный контракт от 14.03.2012 № 11.519.11.6029.

Руководитель работы,
Зам. директора института,
д-р физ.-мат. наук, профессор

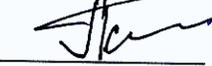
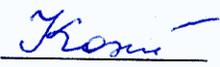
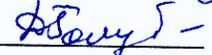


А.М.Зайцев

подпись, дата

Протвино, 2013

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

| | | | |
|--|---|--------------|-----------------|
| Зам. директора института, д-р физ.- мат. наук, профессор Начальник лаборатории, кандидат физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник Начальник сектора, д-р физ.-мат. наук, профессор |  | А.М. Зайцев | (весь отчёт) |
| Ведущий инженер Руководитель группы кандидат физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник Ст. научн. сотрудник, доктор физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник Вед. научн. сотрудник кандидат физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник Гл. научн. сотрудник Доктор физ.-мат наук, профессор Вед. научн. сотрудник доктор физ.-мат. наук, профессор |  | О.Л.Федин | (1÷3, 9.4)) |
| Мл. научн. сотрудник |  | А.П.Чеплаков | (4, 5, 9.3, 13) |
| Техник |  | А.А.Снесарев | (6, 9.2) |
| Мл. научн. сотрудник |  | А.С.Романюк | (7, 11) |
| Мл. научн. сотрудник |  | А.С.Кожин | (8, 11) |
| Мл. научн. сотрудник |  | А.В.Козелов | (9.1) |
| Мл. научн. сотрудник |  | В.А.Рыкалин | (10) |
| Мл. научн. сотрудник |  | Д.Н.Смирнова | (14) |
| Мл. научн. сотрудник |  | Д.В.Голубков | (8) |
| Мл. научн. сотрудник |  | П.С.Мандрик | (8) |

РЕФЕРАТ

Отчет 180 стр., 104 рис., 10 таблиц, 40 источников, 5 приложений.

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, УСТАНОВКА АТЛАС, ЖИДКОАРГОНОВЫЙ КАЛОРИМЕТР, АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР, ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ, ГАЗОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, ПИКсельНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, ДРЕЙФОВЫЕ ТРУБКИ, ТРИГГЕР ВЫСОКОГО УРОВНЯ, СЕТЬ ГРИД

Объектом научно-исследовательской работы являются детекторы установки АТЛАС на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРНе и программное обеспечение для сбора и обработки данных с этой установки.

Цель работы – модернизация детекторов и программного обеспечения установки АТЛАС для обеспечения её эффективной работы в условиях планируемой повышенной светимости протон – протонных столкновений на ускорителе БАК.

Работы выполняются совместно с зарубежными институтами, участниками сотрудничества АТЛАС.

Работы, предусмотренные контрактом, разделены на четыре этапа:

- Анализ требований к системам установки АТЛАС, вызванных повышением светимости БАК (см. отчёт № 1/6029);
- Моделирование и макетирование образцов, разработка технологий (см. отчёт № 2/6029);
- Изготовление и испытание экспериментальных образцов оборудования (см. отчёт № 3/6029);
- Разработка технических предложений для первого этапа модернизации установки АТЛАС (данный, заключительный отчёт №4/6029).

В настоящем отчёте представлено описание стенда для испытаний экспериментальных образцов FAST OR триггера и результаты испытаний этих образцов, представлены результаты испытаний облучательной установки и результаты измерений на эталонных образцах, описан анализ результатов.

Представлены результаты измерения радиационной стойкости материалов для печатных плат.

Приведены результаты тестирования микроканальных детекторов, обоснованы преимущества дрейфовых трубок малого (15 мм) диаметра, описано их производство.

Даны рекомендации по использованию результатов НИР для массового изготовления аппаратуры для исследований при повышенной светимости pp-столкновений на установке АТЛАС.

Описана подготовка материалов, объясняющая мотивацию заявки на изобретение «Разработка сцинтилляционных детекторов с повышенной радиационной стойкостью».

Представлено описание стендов для испытаний детектирующих элементов трековых детекторов, выбранных для комплектации новых «малых колес» мюонного спектрометра АТЛАС.

Даны аннотация и ссылка на технический проект «малых колес» установки АТЛАС, представленный в виде отдельного документа в составе отчётной документации по заключительному этапу контракта.

Описана методика исследования материалов и электроники на облучательной установке и выбор образцов для первых исследований.

Приведены результаты испытаний прототипов триггера высокого уровня.

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|-----|---|----|
| | Определения, обозначения и сокращения | 8 |
| | Введение | 9 |
| | Основная часть | 12 |
| 1 | Разработка экспериментальных образцов основных компонентов FAST OR триггера | 12 |
| 1.1 | Алгоритм поиска треков системы FAST OR триггера | 15 |
| 1.2 | Плата ТВ (Transition Board) | 17 |
| 1.3 | Модуль TF (Track Finder) | 19 |
| 2 | Разработка стенда для испытаний экспериментальных образцов FAST OR триггера | 23 |
| 2.1 | Испытания экспериментальных образцов основных компонентов FAST OR триггера | 25 |
| 3 | Подготовка технической документации для сотрудничества ATLAS..... | 30 |
| 4 | Испытания облучательной установки и эталонных образцов, анализ результатов | 30 |
| 5 | Облучение и измерение параметров тестируемых образцов | 34 |
| 6 | Второй HVтест перспективных материалов | 37 |
| 6.1 | Результаты электропрочностных испытаний | 39 |
| 7 | Тестирование прототипов микроканальных детекторов | 41 |
| 7.1 | Оптимизация параметров и геометрии газо-пиксельных детекторов..... | 41 |
| 7.2 | Разработка алгоритмов триггера первого уровня на основе микроканальных детекторов, оптимизация его эффективности | 49 |
| 7.3 | Алгоритм съема информации с пикселя | 49 |
| 7.4 | Алгоритм передачи данных с пикселей в БНО чипа | 51 |
| 7.5 | Алгоритм обработки информации в БНО | 53 |
| 7.6 | Алгоритм передачи информации в центр формирования триггера первого уровня | 59 |
| 8 | Дрейфовые трубки | 61 |
| 9 | Рекомендации по использованию результатов НИР для массового изготовления аппаратуры для исследований при повышенной светимости pp-столкновений на установке АТЛАС | 68 |
| 9.1 | Торцевые жидкоаргоновые калориметры | 68 |
| 9.2 | Материалы для придетекторной электроники | 70 |
| 9.3 | Применение других материалов и электроники для переднего электромагнитного калориметра | 71 |
| 9.4 | FAST OR триггер | 71 |
| 9.5 | Производство трековых детекторов для NSW | 71 |
| 10 | Подготовка материалов для заявки на патент «Разработка детекторов с повышенной радиационной стойкостью» | 71 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 10.1 | Подготовка прототипов полноразмерных сцинтилляторов для установки АТЛАС | 77 |
| 10.2 | Испытания кремниевых ФЭУ (SiPM) для радиационно-стойких сцинтилляционных детекторов установки АТЛАС | 78 |
| 10.3 | О возможности повышения радиационной стойкости пластмассовых сцинтилляторов при их допировании металлоорганическими соединениями поливалентных металлов | 80 |
| 11 | Разработка стендов испытаний детектирующих элементов трековых детекторов, выбранных для комплектации новых «малых колес» мюонного спектрометра АТЛАС ^{*)} | 81 |
| 11.1 | Рентгеновский сканнер широкого назначения для тестирования камер NSW.. | 81 |
| 11.2 | Предварительные испытания возможностей проверки точностей и позиционирования камер ^{*)} | 83 |
| 11.3 | Процедуры контроля качества производства sTGC и Micromegas для NSW ^{*)} .. | 89 |
| 12 | Разработка технического проекта «малых колес» установки АТЛАС ^{*)} | 91 |
| 13 | Методика исследования материалов и электроники на облучательной установке, выбор образцов для исследования ^{*)} | 93 |
| 14 | Создание алгоритмов триггера для выделения распадов В-мезонов с образованием двух мюонов ^{*)} | 96 |
| 14.1 | Анализ требований к триггеру $B \rightarrow \mu\mu X$ в условиях повышенной светимости. | 96 |
| 14.2 | Разработка алгоритма триггера $B \rightarrow \mu\mu X$ ^{*)} | 98 |
| 14.3 | Создание алгоритма обнаружения моды распада $B_c \rightarrow D_s^* \mu^+ \mu^{-*}$ | 101 |
| 15 | Определение эффективности алгоритмов триггера для выделения распадов В-мезонов с образованием двух мюонов ^{*)} | 103 |
| 15.1 | Определение величины потоков событий по экспериментальным данным ^{*)} ... | 103 |
| 15.2 | Создание наборов моделированных событий для оценки влияния скорости потоков событий и количества первичных взаимодействий при столкновении сгустков протонов и результаты их анализа ^{*)} | 105 |
| 15.3 | Разработка опции триггера для регистрации дважды и трижды тяжелых барионов ^{*)} | 108 |
| 16 | Определение эффективностей и потоков событий триггера распадов В-мезонов в условиях повышенной светимости ^{*)} | 110 |
| 16.1 | Анализ скорости работы алгоритма триггера $B \rightarrow \mu\mu X$ в условиях повышенной светимости с учетом потоков триггера первого уровня ^{*)} | 110 |
| 16.2 | Модификация алгоритма триггера $B \rightarrow \mu\mu X$ для работы в условиях повышенной светимости ^{*)} | 115 |
| 16.2.1 | Новая опция триггера $B \rightarrow \mu\mu X$ для отбора событий с распадами $B_c^+ \rightarrow \mu\mu D_s^{(*)+}$ | 115 |
| 16.2.2 | Анализ распада $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+\pi^-)$ с учётом эффективности триггера ^{*)} | 118 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 16.2.3 | Сравнительный анализ эффективности отбора событий распадов В-мезонов триггерными алгоритмами второго уровня L2_Dimu_L2starB и L2_2mu4T_Vmumu *) | 119 |
| 16.3 | Определение потоков событий и эффективности для триггера дважды и трижды тяжелых барионов путем моделирования *) | 121 |
| 17 | Тестирование алгоритма триггера высокого уровня В→μX для повышенной светимости *) | 123 |
| 17.1 | Оптимизация алгоритма триггера к условиям повышенной светимости *) | 123 |
| 17.2 | Определение потоков событий и эффективностей триггера высокого уровня в условиях повышенной светимости *) | 129 |
| 18 | Работы по жидкоаргоновому калориметру | 134 |
| 18.1 | Установка на канале 23 ускорителя У-70 | 134 |
| 18.2 | Экспериментальные модули | 135 |
| 18.3 | Методика исследования характеристик модулей | 135 |
| 18.3.1 | Средства очистки и измерения чистоты аргона | 135 |
| 18.3.2 | Параметры пучка | 136 |
| 19 | Патентные исследования | 137 |
| | Заключение | 138 |
| | Список использованных источников | 139 |
| | Приложение А. Акт создания стенда для испытаний экспериментальных образцов компонентов FAST OR триггера | 142 |
| | Приложение Б. Технологический регламент «Производство прецизионных дрейфовых трубок малого (15 мм) диаметра» | 143 |
| | Приложение В. Общий вид установки «АТЛАС-КАНАЛ 23», использовавшейся в ИФВЭ для исследования характеристик жидкоаргоновых калориметров, и схема коммуникаций установки | 169 |
| | Приложение Г. Эскизы экспериментальных модулей жидкоаргонового калориметра и использованного окружающего оборудования | 171 |
| | Приложение Д. Инструкция по эксплуатации газовой-криогенной системы установки «КМН (АТЛАС)» | 176 |

*) Работы выполнены иностранным партнёром.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

| | |
|---------------|--|
| БАК (LHC) | Большой адронный коллайдер. Ускоритель встречных пучков протонов Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН). |
| ЦЕРН (CERN) | Европейская организация ядерных исследований в Женеве, Швейцария. |
| Светимость | Параметр ускорителя, характеризующий количество первичных взаимодействий частиц из встречных пучков, в единицу времени. |
| АТЛАС (ATLAS) | Универсальная установка для проведения исследований на БАК. |
| Калориметр | Прибор для измерения энергии частиц. |
| Триггер | Процедура для выделения из потока информации, регистрируемой детекторами, событий с заданными характеристиками для последующей записи и физического анализа. |
| Флюэнс | Полное число нейтронов, прошедших через площадку в 1 см^2 в 1 сек. |
| AGIS | (ATLAS Grid Information System), Информационная система для сетевых вычислений АТЛАС |
| WLS | (Wave Length Shifter) Спектросдвигатель |
| NSW | (New Small Wheels) Новые малые колёса |

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является модернизация детекторов и программного обеспечения установки АТЛАС[1,2] на ускорителе встречных пучков БАК в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве для работы в условиях повышенной до 10^{35} см⁻²с⁻¹ светимости протон - протонных столкновений.

Работы выполняются в сотрудничестве с зарубежными институтами, участвующими в экспериментах на установке АТЛАС.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ участвует в работах по модернизации установки АТЛАС в соответствии со следующими документами:

- Протокол об участии в реализации программы проведения экспериментов на большом адронном коллайдере (БАК) к соглашению 1993 года между Правительством Российской Федерации и Европейской организацией ядерных исследований, подписанный 19 декабря 2003 г.
- Письмо F.Gianotti и M.Nordberg (руководство АТЛАС) С.В.Иванцу (заместителю министра образования и науки РФ) от 26 января 2012 г. о тематике и финансировании совместных работ Российских и зарубежных институтов по модернизации АТЛАС;

Основными задачами контракта являются:

- Создание инновационных технологий для детекторов элементарных частиц. Разрабатываемые детекторы обеспечат прецизионное измерение координат частиц, калориметрию, восстановление вектора движения частицы в реальном времени в условиях высокой светимости и больших потоков данных.
- Проработка способов модернизации существующих детекторов и программного обеспечения установки АТЛАС с целью обеспечения её

эффективной работоспособности в условиях повышенной загрузки частицами.

- Стимулирование развития международных интеграционных процессов в науке и содействие формированию устойчивых кооперационных связей российских и иностранных научно-исследовательских организаций и университетов, направленных на создание технологий, соответствующих мировому уровню, либо превосходящих его.
- Привлечение молодых ученых и специалистов к исследованиям, направленным на проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований и созданию научно-технического задела в кооперации с научно-исследовательскими организациями-участниками проектов ЦЕРН.

Работы, предусмотренные контрактом, разделены на четыре этапа:

- Анализ требований к системам установки АТЛАС, вызванных повышением светимости БАК (см. отчет № 1/6029);
- Моделирование и макетирование образцов, разработка технологий (см. отчет № 2/6029);
- Изготовление и испытание экспериментальных образцов оборудования (см. отчет № 3/6029);
- Разработка технических предложений для первого этапа модернизации установки АТЛАС (данный, заключительный отчет №4/6029).

Основными задачами, выполненными на четвертом этапе, являлись:

- Создание стенда и проведение испытаний экспериментальных образцов FAST OR триггера; испытания экспериментальных образцов основных компонент FAST OR триггера.
- Испытания облучательной установки и эталонных образцов по разработанной программе и методикам исследовательских испытаний, анализ результатов испытаний.
- Облучение и измерение характерных параметров тестируемых образцов.
- Второй HV тест перспективных материалов.
- Тестирование прототипов микроканальных детекторов.

- Разработка рекомендаций по использованию результатов НИР для массового изготовления аппаратуры для исследований при повышенной светимости протон-протонных столкновений на установке АТЛАС.
- Подготовка материалов для заявки на патент «Разработка детекторов с повышенной радиационной стойкостью».

Кроме того, иностранные партнеры выполнили следующие работы:

- Разработка стендов испытаний детектирующих элементов трековых детекторов, выбранных для комплектации новых «малых колес» мюонного спектрометра АТЛАС.
- Разработка технического проекта «малых колес» установки АТЛАС.
- Разработка методик исследования электроники и материалов на облучательной установке, выбор образцов для исследования.
- Испытание прототипа триггера высокого уровня.

Общий план модернизации установки АТЛАС [1] для работы при повышенной светимости и энергии БАК представлен в работах [2-4] и, кратко, во введении к отчету по первому этапу контракта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Разработка экспериментальных образцов основных компонентов FAST OR триггера

Создаваемая система FAST OR триггера на основе детектора переходного излучения TRT (Transition Radiation Tracker) предназначена для регистрации гипотетических сильноионизирующих частиц таких, как магнитный монополь, Q-balls и других.

Детектор переходного излучения TRT состоит из центральной и двух торцевых подсистем, помещённых в магнитное поле 2 Т. Общее число детектирующих элементов (дрейфовых трубок) составляет 298144. Существующая при детекторная электроника, базирующаяся на 16-канальной микросхеме специального назначения (ASIC) DTMROC, позволяет считывать сигналы со всех дрейфовых трубок детектора TRT. Данная микросхема обеспечивает логический выход «FAST OR» от 16 каналов, при этом допускается возможность маскирования входных сигналов выработки логического выхода. Центральная подсистема содержит 52544 дрейфовых трубки. Для сокращения загрузки центральная подсистема разделена на две части. Информация считывается по каждой из частей независимо. Центральная подсистема состоит из трех слоёв модулей. В каждом слое располагается 32 модуля, содержащих дрейфовые трубки длиной 144 см. Анодные проволоки дрейфовых трубок разделены изолятором по середине на две части. Каждый модуль имеет две карты электроники считывания для считывания сигналов с двух сторон дрейфовых трубок. Карта электроники считывания имеет аппаратное управление сигналами «FAST OR» от всех микросхем DTMROC, соединённых с картой: это может быть цифровой сигнал логическое ИЛИ или аналоговый сигнал, пропорциональный числу сработавших straw-каналов. В случае аналогового сигнала используется компаратор, реализованный на соединительной панели с возможностью удалённой установки порога. Общее число микросхем DTMROC, соединённых с одной картой считывания зависит от слоя модуля – для модулей расположенных ближе к пучку карта считывания собирает данные от 16 x 10 каналов (10 микросхем DTMROC), а для модулей расположенных на наибольшем радиусе – от 16 x 27 каналов (27 микросхем DTMROC). Таким образом, каждый из 32 азимутальных φ – секторов описывается восемью логическими сигналами.

Каждая торцевая подсистема детектора TRT считается 122880 каналами электроники и содержит 14 модулей с радиальным расположением дрейфовых трубок – шесть 16-слойных модулей А-типа и восемь 16-слойных модулей В-типа. Каждый модуль содержит 768 дрейфовых трубок в одном слое. Карта электроники считывает информацию от 192 дрейфовых трубок: 8 слоёв с 24 каналами на слой, всего 12 микросхем DTMROC. Логика выработки сигналов «FAST OR» аналогична описанной выше для центральной части детектора TRT. Каждый из 32 азимутальных ϕ - секторов вырабатывает 20 логических сигналов, которые содержат логику множественности.

Таким образом, придетекторная электроника детектора TRT вырабатывает 1664 сигналов «FAST OR» для центральной части детектора и 3840 для каждой из торцевых частей, собираемых в течение одного пересечения пучка (25 нс). Каждый сигнал «FAST OR» управляется программируемой логикой множественности в картах считывания. Эта информация может быть использована для отбора треков в пределах времени задержки на выработку триггера первого уровня L1 детектора ATLAS. Конфигурация FAST OR триггера показана на рисунке 1.

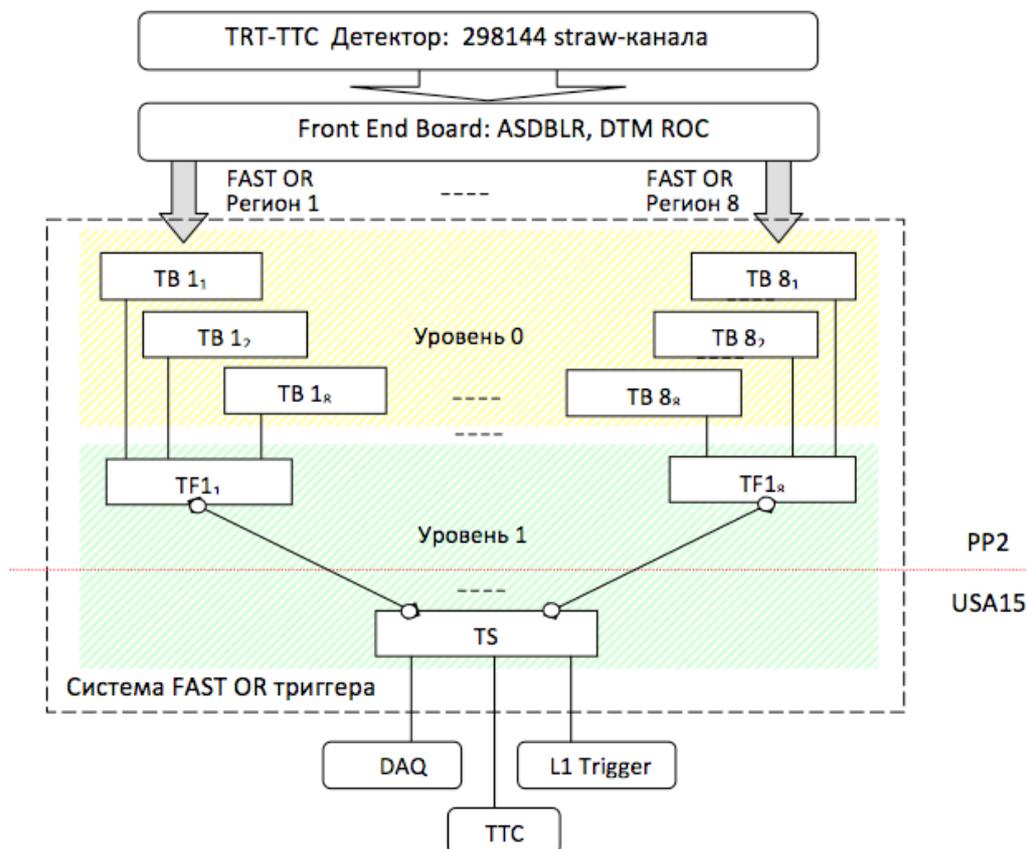


Рисунок 1 - Конфигурация системы FAST OR триггера

FAST OR триггер функционирует, используя двух уровневую обработку данных.

На нулевом уровне FAST OR триггер отбирает сигналы, приходящие с Front End электроники, которые соответствуют прохождению сильноионизирующих частиц. В соответствии с разработанным алгоритмом работы, приняты три основных признака прохождения сильноионизирующих частиц:

- Вид последовательности срабатывания плат при детекторной электронике (Front End Board - FEB). Прохождение сильно ионизирующих частиц приводит к образованию сигналов с дрейфовых трубок, уровень которых превышает высокий порог срабатывания (HT- High Threshold) микросхемы DTMROC. Это приводит к появлению сигналов FAST OR на платах при детекторной электронике FEB (Front End Board), где находятся микросхемы DTMROC с установленным высоким порогом HT. Системой триггера FAST OR рассматриваются только такие последовательности FEB плат, которые совпадают с гипотезой прохождения частицы через детектор.

- Прохождение сильноионизирующей частицы вызывает образование большого количества дельта электронов, что приводит к появлению сигнала не только в каждой пересекаемой частицей дрейфовой трубке, но и во многих соседних. В этом случае, число микросхем DTMROC с активным FAST OR сигналом будет намного больше, чем в случае прохождения обычной частицы.

- Длительность сигнала с дрейфовой трубки в стриммерном режиме, возникающем при прохождении сильноионизирующих частиц, значительно больше длительности сигнала от обычных частиц (электронов, π -мезонов и др.). Анализ длительности сигнала даёт дополнительную возможность для подавления фона.

На нулевом уровне также осуществляется регистрация сигналов FAST OR в совпадении с частотой LHC (40 МГц) и выравнивание задержек сигналов для последующей обработки совокупности зарегистрированных сигналов в соответствии с заложенным алгоритмом. На нулевом уровне используется до 64 переходных плат ТВ (Transition Board), каждая из которых принимает сигналы от локальной области детектора TRT, заданной совокупностью до 40 сигналов FAST OR. Выходы плат ТВ соединены с входами плат логической

обработки информации TF (Track Finder), работающими на первом уровне системы FAST OR триггера.

На первом (региональном) уровне данные берутся от более крупных фрагментов детектора (регионов), объединяющих до восьми его локальных областей. На этом уровне алгоритм обработки данных анализирует сегменты предполагаемых треков, найденные в локальных областях, и определяет (собирает) фрагменты треков для регионов. На первом уровне используется восемь плат обработки данных TF, каждая из которых оперирует с данными до восьми плат ТВ. Сигналы на модули TF поступают по кабелям CAT5 длиной не более 10 м. Для сокращения числа проводников линий связи используется сериализация данных 10:1. Далее производится системный анализ кандидатов в треки со всех регионов, сортировка по критерию качества и выработка решения триггера по некоторому пороговому коэффициенту качества трека. Системные действия производит модуль TS (Track Sorter), оперирующий с данными до восьми плат TF. Модуль TS располагаются в Евро-корзине 6U и связан с платами TF оптическими кабелями. Совокупность плат ТВ, TF располагается в зоне PP2. Модуль TS располагаются в зоне USA15 и может занимать одну станцию евро-корзины 6U. Коммуникации с системой синхронизации TTC и системой L1 Trigger производятся через специальный разъём, стандартный для систем триггера эксперимента ATLAS и установленный в модуле TS. Связь с системой сбора данных DAQ осуществляется через VME-мастер, установленный в евро-корзине.

Экспериментальные образцы основных компонентов FAST OR триггера реализуют функционально законченную часть аппаратуры для работы в реальных условиях с детектором TRT: набор 8 плат ТВ, а также по одному модулю TF и TS для одной из ветвей системы. Это позволяет симулировать и проверять основные элементы алгоритма обработки данных на всех уровнях.

1.1. Алгоритм поиска треков системы FAST OR триггера

Предложенный к реализации алгоритм поиска треков работает в несколько этапов. Координаты треков в центральной части детектора определяются в плоскости R- ϕ , а в торцевой части детектора в плоскости Z- ϕ . На локальном этапе осуществляется определение координат - радиус R и азимутальный угол ϕ для центральной части детектора или координата Z

вдоль пучка и азимутальный угол φ для торцевой части детектора, сработавших локальных географических зон (секторов) детектора. Координаты определяются как средне-взвешенные значения координат всех дрейфовых трубок объединенных по сигналам «FAST OR» в географическую зону детектора. На региональном этапе производится экстраполяция локальных сегментов и сборка региональных кандидатов в треки. На системном этапе производится сортировка региональных кандидатов в полные треки и выработка решения.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 2.

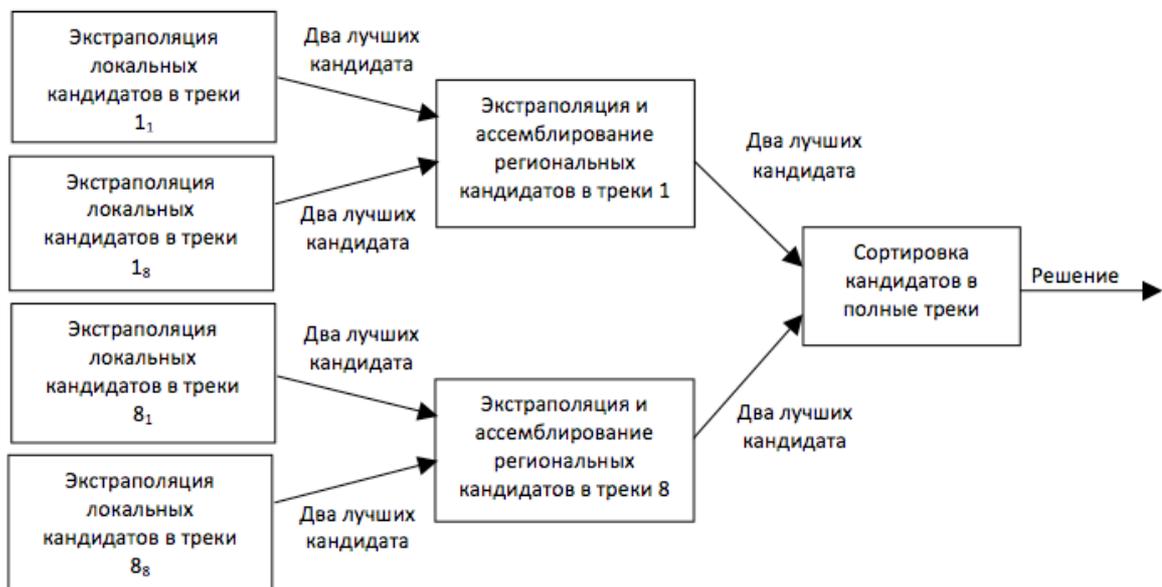


Рисунок 2 - Блок-схема алгоритма поиска треков

Она включает следующие элементы:

- Анализ всех возможных комбинаций (экстраполяция) локальных сегментов, составляющих возможный трек. Экстраполяция осуществляется поиском удовлетворяющих алгоритмической модели совпадений трековых сегментов. Как результат экстраполяции, кандидаты в треки получают коэффициенты качества и для последующих действий выбираются два кандидата, имеющие более высокие коэффициенты качества. Анализ локальных сегментов производится по всем регионам параллельно.
- Анализ всех возможных комбинаций (экстраполяция) сегментов в регионе. Составление сегментов в треки (ассемблирование) на уровне регионов. Осуществляется поиском удовлетворяющих алгоритмической модели кандидатов в треки из других локальных зон региона. Как результат, два лучших по значению коэффициента качества кандидата в треки

поступают на следующий уровень анализа.

- Сортировка кандидатов в полные треки. В анализе участвуют до шестнадцати кандидатов от всех регионов. Производится выбор лучшего трека по коэффициентам качества и результату сравнения с установленным пороговым значением.

1.2. Плата ТВ (Transition Board)

Блок-схема платы ТВ показана на рисунке 3.

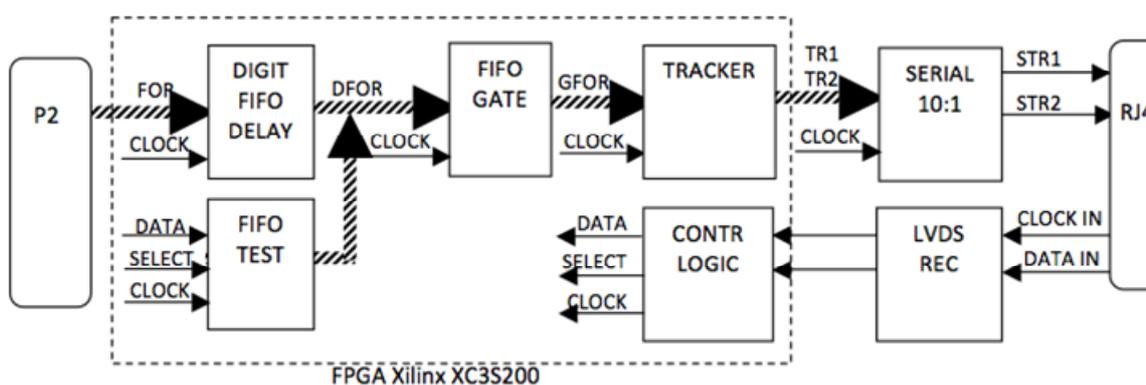


Рисунок 3 - Блок-схема платы ТВ (Transition Board)

Основу реализованного на ней устройства составляют узел программируемой логики FPGA Xilinx XC3S200 и узел сериализации SN65LV1023. Исходные сигналы FAST OR (FOR) через входной разъем P2 поступают на схему оцифровки (DIGIT), управляемую частотой LHC (CLOCK). Схема DIGIT имеет следующими параметрами:

- шаг оцифровки 6,25 нс;
- максимальная длительность оцифрованного импульса составляет 8 периодов частоты LHC.

Оцифрованные сигналы с помощью синхронной памяти FIFO DELAY задерживаются на некоторое запрограммированное время для компенсации разброса задержек сигналов на всех входах системы FAST OR триггера. Шаг регулирования задержки может быть задан в пределах от 1 до 8 шагов оцифровывания, а полный диапазон задержки – до 255 периодов частоты

синхронизации. Задержанные и синхронизированные с частотой CLOCK сигналы (DFOR) поступают на вход синхронной памяти FIFO GATE, где выбирается тот интервал времени, называемый окном регистрации, в котором данное событие, как совокупность сигналов FAST OR, действительно для принятия данного решения триггера. Величина окна регистрации событий программируема в пределах до 8 периодов частоты синхронизации.

Отобранные в окне регистрации сигналы (GFOR) поступают на схему локального трекового анализа (TRACKER). Схема TRACKER производит поиск примитивных кандидатов в треки, используя сигналы GFOR локальной области. Процесс поиска разделён на несколько этапов. Данная точка, описываемая позицией GFOR в пределах локальной зоны, может соответствовать нескольким примитивным трекам (сегментам). Эти примитивные сегменты затем конвертируются в локальные трековые сегменты, которые описываются в геометрических координатах. Возможные комбинации тестируются параллельно и после удаления избыточных по коэффициентам качества выбираются два лучших локальных сегмента возможных треков (TR1, TR2). Далее координатная информация поступает на узел сериализации (SERIAL 10:1). Данный узел в соответствии с несущей частотой CLOCK формирует два координатных последовательных потока данных (STR1, STR2). Координатные потоки через выходной разъем RJ45 транслируются на вход модуля TF, где восстанавливается параллельная форма представления данных и происходит дальнейший трековый анализ. Последовательный поток данных от модуля TF (DATA IN, CLOCK IN) через разъем RJ45 транслируется на схему управляющей логики (CONTR LOGIC).

Схема CONTR LOGIC вырабатывает необходимые сигналы для занесения констант, управляющих режимами работы модуля ТВ: значения задержки и шага её регулирования для схемы DIGIT, значения окна регистрации и шага его регулирования для FIFO GATE, формирует последовательность сигналов занесения тестовых массивов в FIFO TEST, а также - микропрограммной модели в FPGA. Для тестирования модуля, в том числе, проверки работоспособности логики решения системы триггера, предусмотрена тестовая синхронная память (FIFO TEST), куда по последовательному каналу (DATA, CLOCK) через схему CONTR LOGIC заносятся тестовые массивы данных. В тестовом режиме работы платы ТВ сигнал SELECT отключает схему DIGIT и подключает схему FIFO TEST,

откуда выгружаемые тестовые массивы (модели) поступают на последующие схемы системы триггера для проверки их работоспособности и реализации алгоритма поиска треков.

Внешний вид платы ТВ представлен на рисунке 4.

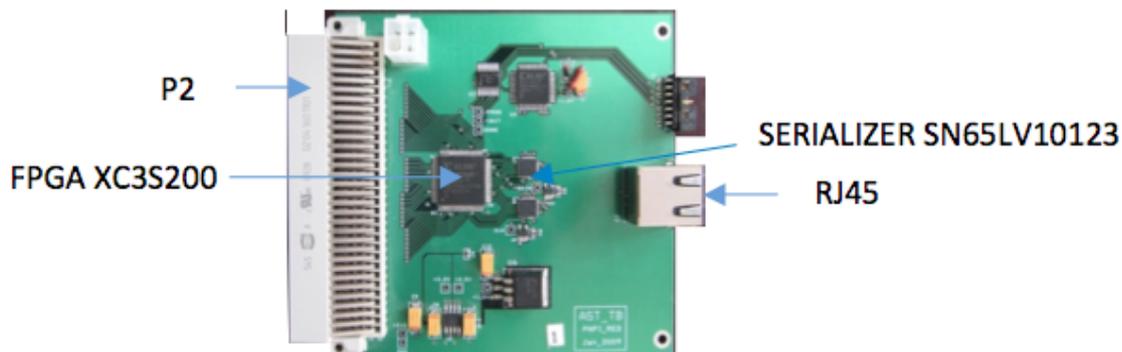


Рисунок 4 - Внешний вид платы ТВ (Transition Board)

Плата имеет размеры 100 x 100 мм. Она не требует дополнительного крепления и может быть установлена на специально сделанной мезонинной переходной плате, имеющей ответную часть разъёма P2 (J2).

1.3. Модуль TF (Track Finder)

Блок-схема модуля TF показана на рисунке 5.

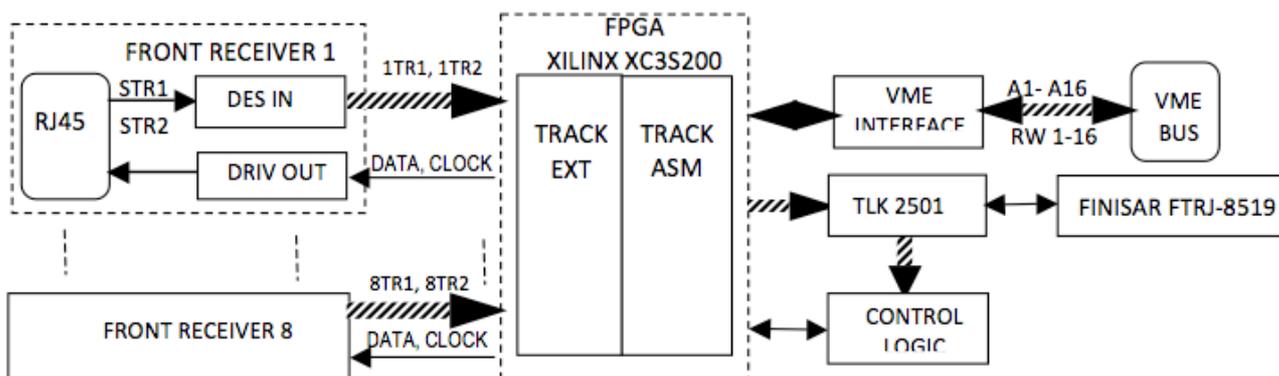


Рисунок 5 - Блок-схема модуля TF (Track Finder)

Модуль состоит из восьми узлов приёма данных FRONT RECEIVER 1-8, узла программируемой логики FPGA Xilinx XC3S200 и узла трансляции дуплексного оптического канала FINISAR FTRJ-8519. Модуль имеет также узел программируемой логики интерфейса VME (VME INTERFACE). Данный узел используется в режиме отладки и может использоваться в том

случае, если в рабочем режиме модуль располагается в евро-корзине 6U. Если модуль располагается в удалённой моде работы, как это показано на рисунке 5, то для коммуникации с последующими схемами системы триггера используется только дуплексный оптический канал.

Узлы FRONT RECEIVER 1-8 осуществляют приём и десериализацию данных, приходящих от плат ТВ. Восстановленные трековые данные (TR1, TR2), от всех узлов приёма данных обрабатываются программируемой логикой FPGA.

Схема логики экстраполяции треков TRACK EXT производит анализ комбинаций первичных сегментов, составляющих возможный трек. Экстраполяция проводится по двум первичным (локальным) трековым сегментам с тестированием их принадлежности предсказанной области в соответствии с трековой моделью. Полученные в результате сегменты поступают на схему ассемблирования (TRACK ASM), где объединяются в региональные трековые сегменты и получают коэффициенты качества. По результатам сравнения коэффициентов качества два лучших региональных кандидата в треки поступают на узел сериализации TLK2501 для передачи на узел передатчика дуплексного оптического канала связи FINISAR FTRJ-8519. Дуплексный оптический канал связи используется для обмена данными с модулем. Через приёмник оптического канала поступает восстанавливаемая рабочая частота ЛНС, константы управления и тестирования.

Внешний вид модуля TF представлен на рисунке 6.

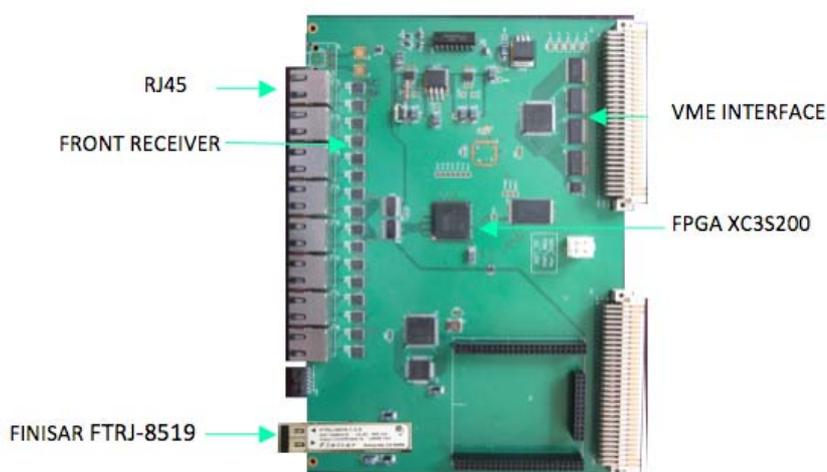


Рисунок 6 - Внешний вид модуля TF (Track Finder)

Плата модуля имеет размеры 233 x 160 мм. Модуль располагается вблизи установленных плат ТВ (не далее 10 м), может быть установлен либо в еврокорзине 6U, либо автономно на некоторой несущей конструкции.

1.4. Модуль TS (Track Sorter)

Блок-схема модуля TS показана на рисунке 7.

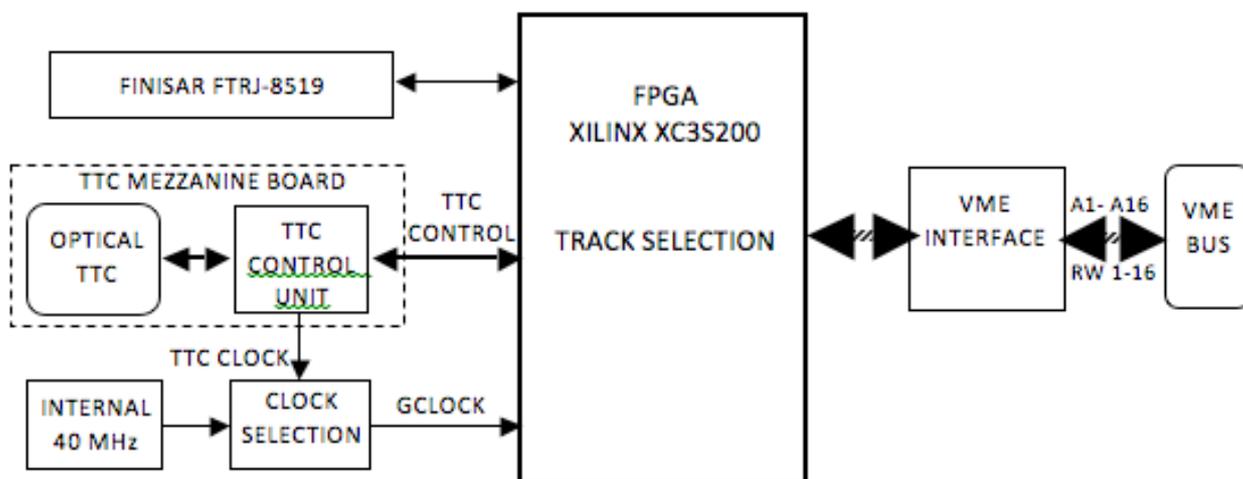


Рисунок 7 - Блок-схема модуля TS (Track Sorter)

Модуль содержит узел программируемой логики FPGA Xilinx XC3S200, узел трансляции дуплексного оптического канала FINISAR FTRJ-8519, узел оптического интерфейса для связи с системой синхронизации и управления ATLAS TRT-TTC, устанавливаемый на переходную плату TTC MEZZANINE BOARD. В модуле может быть также выбрана внутренняя синхронизация от осциллятора 40 МГц. Модуль имеет узел программируемой логики интерфейса VME (VME INTERFACE). Схема логики TRACK SELECTION производит анализ всех региональных кандидатов в треки и в зависимости от коэффициента качества выбирает лучший из них (с точки зрения алгоритмической модели решения триггера).

Связь с системой TTC осуществляется через специальную плату управления (TTC CONTROL UNIT). Получаемые сигналы управления распространяются на модуль TS и транслируются через оптический канал на модуль TF и далее - на платы ТВ. Сигнал решения триггера поступает на плату управления TTC и его признак доступен через магистраль VME.

Разработка выполнена таким образом, что модуль TF и модуль TS взаимозаменяемы; их отличие состоит только в том, что в модуле TF не устанавливается узел синхронизации TTC.

Внешний вид модуля показан на рисунке 8.

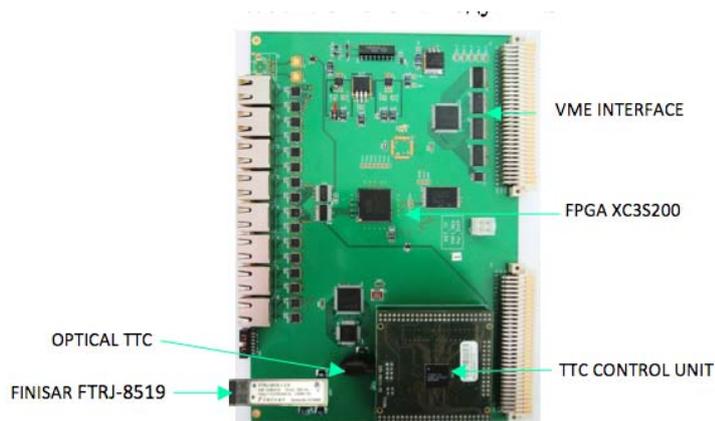


Рисунок 8 - Внешний вид модуля TS (Track Sorter).

Плата модуля имеет размеры 233 x 160 мм. Модуль располагается в евро-корзине 6U.

Для разработки аппаратно-программного обеспечения использовались данные анализа треков с помощью программы TRTViever. Программа анализировала считываемые в эксперименте реальные данные и определяла треки, соответствующие прохождению частиц. По набранной статистике треков определялись ожидаемые совпадения сигналов «FAST OR» и соответствующие наборы сигналов заносились в базу данных аппаратно-программного обеспечения FPGA-микросхем экстраполяции, ассемблирования и сортировки треков. Аппаратно-программное обеспечение оптимизировалось по критериям быстродействия и минимизации логических узлов и связей.

2. Разработка стенда для испытаний экспериментальных образцов FAST OR триггера

Для испытаний экспериментальных образцов основных компонентов системы FAST OR триггера (8 плат ТВ, модуля TF и модуля TS) использовался специальный тестовый стенд. Внешний вид стенда показан на рисунке 9.

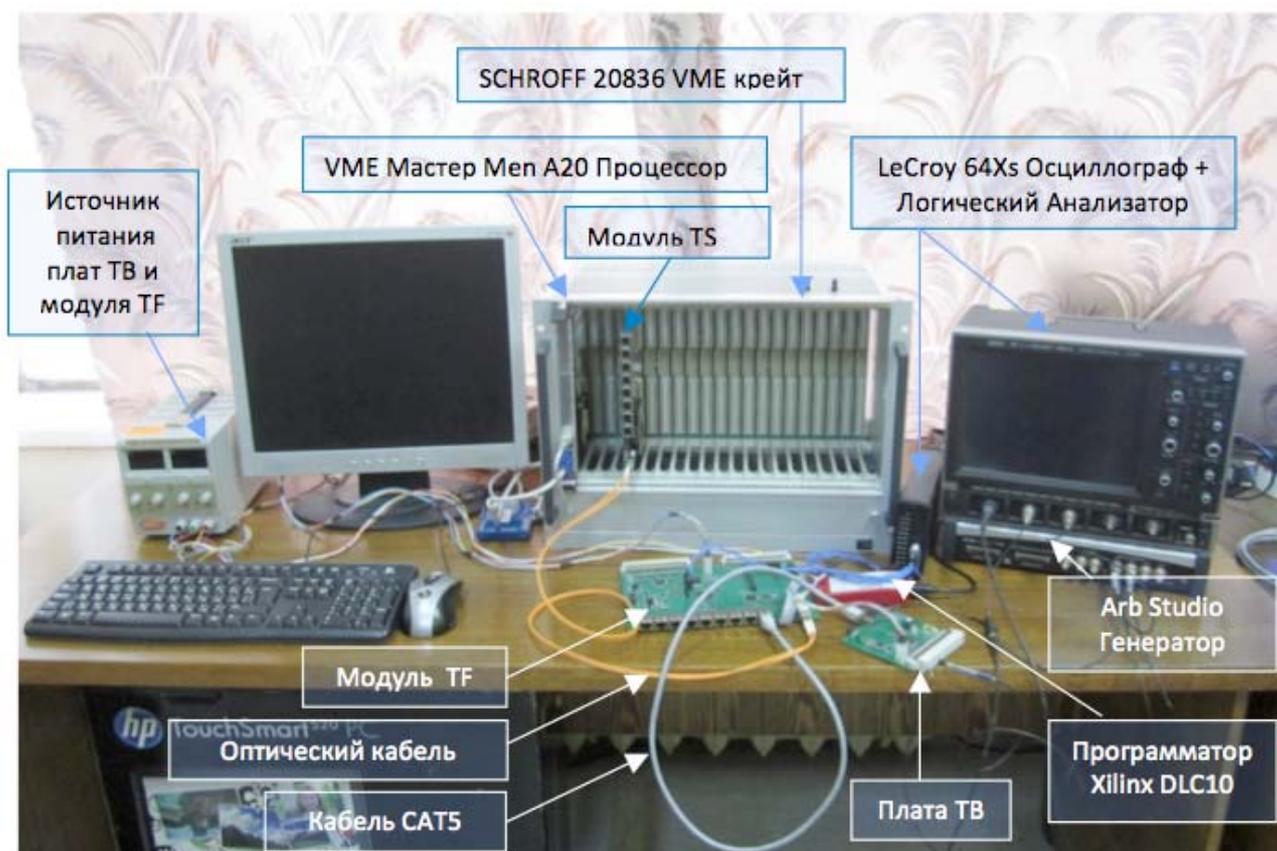


Рисунок 9 - Тестовый стенд для испытаний экспериментальных образцов системы FAST OR триггера

В состав стенда входят:

- кейт SCHROFF 20836 с контроллером VME Master Men20;
- цифровой осциллограф LeCroy 64Xs (частота выборки 2.5 Ms/s) в комплекте с логическим анализатором;
- генератор импульсов произвольной формы Arb Studio (1Gs/s);
- программатор DLC10 Xilinx с кабелем USB;
- источник питания для плат ТВ и модуля TF.

Разработанное программно-аппаратное обеспечение стенда позволяет производить следующие проверочные операции:

- проверку передачи данных по каналам связи экспериментальных образцов системы FAST OR триггера;
- измерение временных характеристик схем оцифровывания входных данных;
- измерение временных характеристик цифровой обработки тестовых массивов;
- загрузки тестовых моделей алгоритма работы системы FAST OR триггера и сравнение с результатами их обработки узлами системы FAST OR триггера;
- оценивать быстродействие основных узлов системы FAST OR триггера.

Акт создания стенда приведен в Приложении А.

2.1. Испытания экспериментальных образцов основных компонентов FAST OR триггера

Экспериментальные образцы основных компонентов системы FAST OR триггера прошли испытания на тестовом стенде и по результатам этих испытаний были зафиксированы их основные технические характеристики. Испытания выполнялись также для проверки алгоритма триггерного отбора, симулирования и оптимизации следующих узлов системы:

- узла оцифровки сигналов на входе модуля ТВ;
- узла сериализации/десериализации для передачи данных на модули TF по кабелям CAT5;
- узла интерфейса LVDS для трансляции данных по кабелям CAT5;
- узла программируемой логики поиска треков;
- узла оптического канала передачи данных на модуль TS.

На рисунке 10 показана симуляция временной диаграммы схемы программируемой задержки FIFO DELAY.

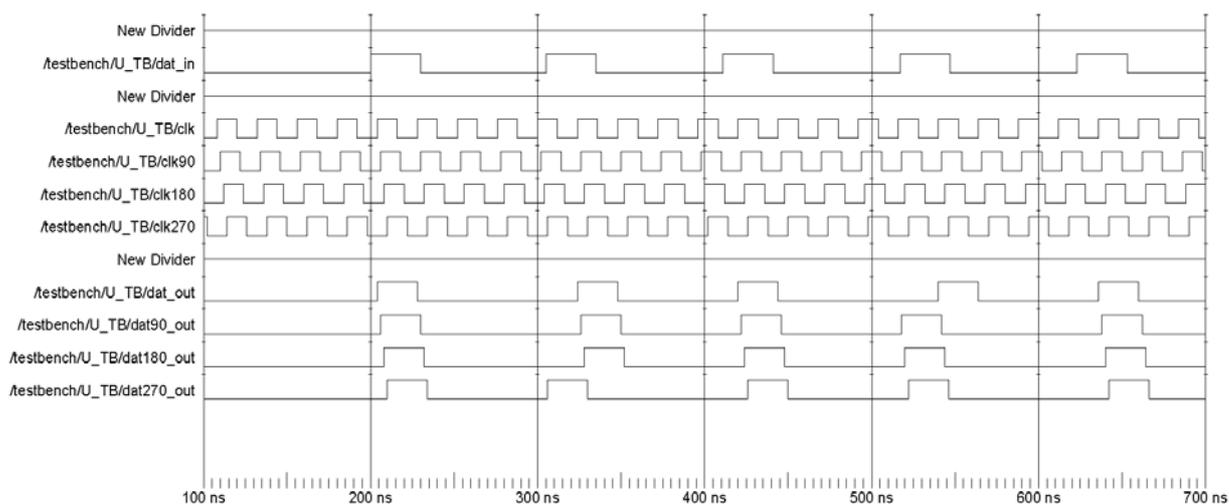


Рисунок 10 - Временная диаграмма схемы программируемой задержки FIFO DELAY

При симуляции для входных данных (dat_in) приняты следующие параметры: частота не более 10 МГц и длительность сигнала 25 нс, поскольку входные данные синхронизируются тактовой частотой 40 МГц (clk). Частота синхронизации сдвигается на линии задержки (DELAY) и подаётся на входы управления синхронной памяти (FIFO DELAY). Вход управления ТВ/clk синхронизирует запись и чтение данных. Частота синхронизации на временной диаграмме симуляции имеет сдвиг 6,25 нс (clk_90, clk_180, clk_270).

Таким образом, реализуется задержка данных с шагом 6,25 нс. Значение сдвига частоты может быть задано и с более высокой точностью (до 2,5 нс). Полный диапазон регулирования задержки внутри FIFO DELAY значителен и может составлять до 255 периодов частоты синхронизации. Временные характеристики последовательного канала передачи данных от плат ТВ на модуль TF показаны на рисунке 11.

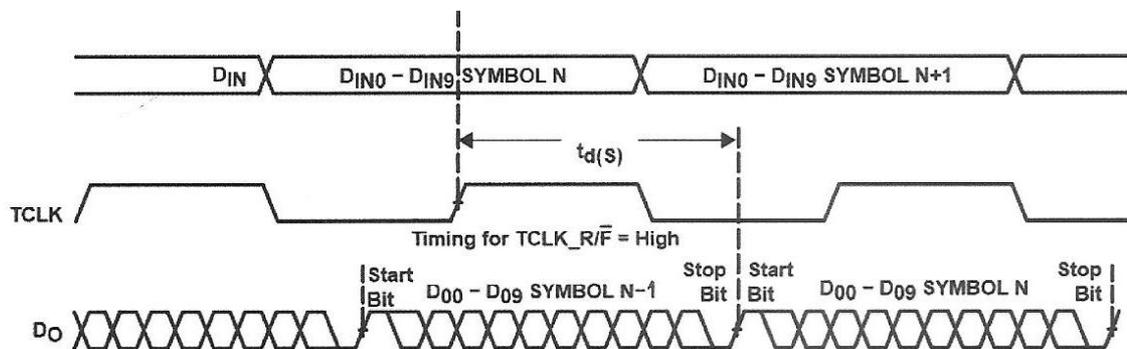


Рисунок 11 - Временная диаграмма работы последовательного канала передачи данных ТВ-TF

При исследовании временных характеристик последовательного канала передачи данных приняты следующие входные параметры: частота посылок данных на вход канала (TCLK) 40 МГц, разрядность слов ($D_{IN0} - D_{IN9}$) равна 10. Из временной диаграммы следует, что задержка выдачи последовательности импульсов (t_d (s)) для рассматриваемого слова N составляет 0.75 периода несущей частоты 40 МГц или 18,75 нс.

Временные характеристики последовательного канала приема данных в модуле TF показаны на рисунке 12.

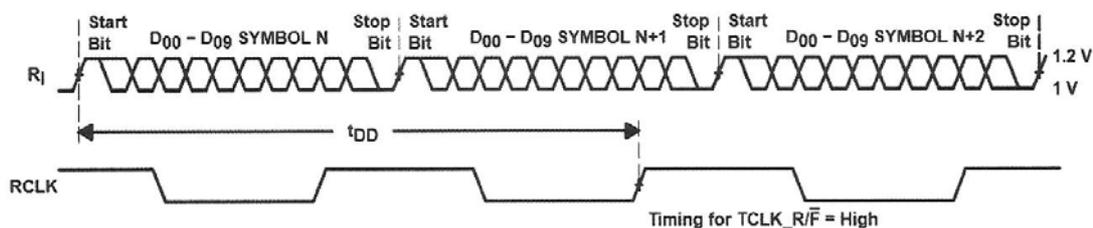


Рисунок 12 – Временная диаграмма работы канала приема данных ТВ-TF

Из временной диаграммы следует, что на приеме последовательно представленного 10 разрядного слова N ($D_{00} - D_{09}$) задержка десериализации составляет 1,75 периода несущей частоты 40 МГц или 43,75 нс.

Проверка последовательного канала передачи данных на больших тестовых массивах (до 10^4 слов в массиве), включая генератор случайных чисел, не выявила ошибок.

Временные характеристики трансмиттера оптического канала передачи данных TF-TS показаны на рисунке 13.

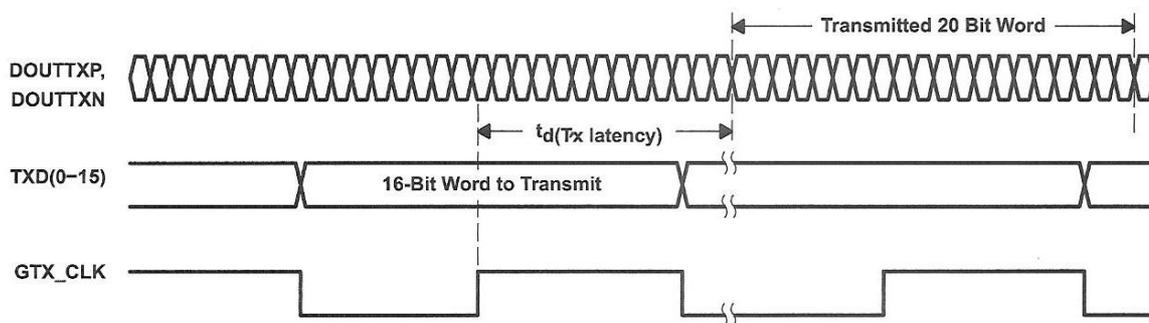


Рисунок 13 - Временная диаграмма работы передатчика оптического канала

При исследовании временных характеристик оптического канала передачи данных приняты следующие входные параметры: частота посылок данных на вход канала (GTX_CLK) 40 МГц, разрядность слов (TXD(0-15)) равна 16. При данных параметрах задержка выдачи двадцатиразрядной последовательности трансмиттера ($t_{D(Px\ latency)}$) составила 42,5 нс.

Временные характеристики ресивера оптического канала передачи данных TF-TS показаны на рисунке 14.

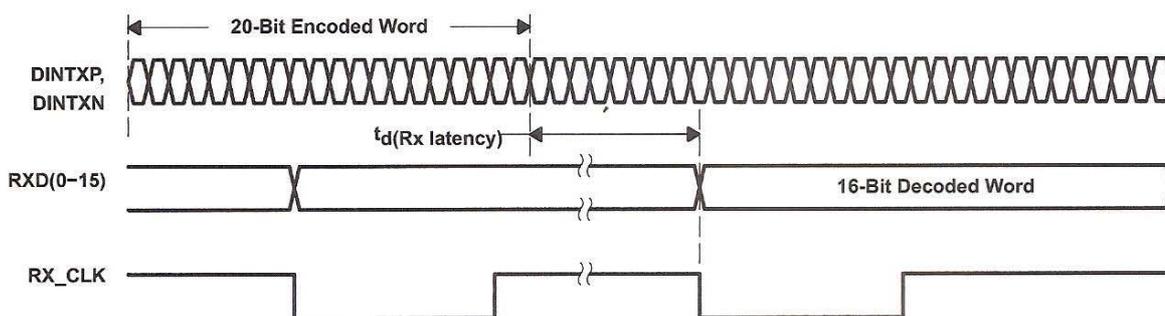


Рисунок 14 - Временная диаграмма работы приемник оптического канала

При указанных параметрах передачи данных (частота 40 МГц, разрядность слова 16), задержка восстановленного слова RXD(0-15) ресивером модуля TS ($t_{D(Rx\ latency)}$) составила 95 нс.

Проверка оптического канала передачи данных на больших тестовых массивах (до 10^4 слов в массиве), включая генератор случайных чисел, не выявила ошибок.

Характеристики экспериментальных образцов основных компонентов системы FAST OR триггера показаны в таблицах 1-3.

Таблица 1. Основные технические характеристики экспериментального образца платы ТВ.

| | Параметр | Значение |
|----|---|--------------------|
| 1 | Частота синхронизации работы устройства, МГц | 40 |
| 2 | Период частоты синхронизации устройства, T_S , нс | 25 |
| 3 | Частота оцифровывания входных импульсов, МГц | 160 |
| 4 | Период частоты оцифровывания T_D , нс | 6,25 |
| 4 | Диапазон регулирования задержки входных импульсов | $T_S \div 255 T_S$ |
| 5 | Шаг регулирования окна совпадений, T_G , нс | 25 |
| 6 | Диапазон регулирования окна совпадений | $T_G \div 8 T_G$ |
| 7 | Задержка реализации алгоритма локальной экстраполяции, T_S | 5 |
| 8 | Скорость передачи данных канала сериализации, Мб/с | 480 |
| 9 | Задержка передатчика последовательного канала для текущего 10-разрядного слова данных, нс | 18,75 |
| 10 | Потребляемая мощность | 1,5 Вт |

Таблица 2. Основные технические характеристики экспериментального образца модуля ТФ.

| | Параметр | Значение |
|---|---|----------|
| 1 | Частота синхронизации работы устройства, МГц | 40 |
| 2 | Период частоты синхронизации устройства, T_s , нс | 25 |
| 3 | Скорость приема данных последовательного канала, Мб/с | 480 |
| 4 | Задержка приема данных последовательного канала, нс | 43,75 нс |
| 5 | Задержка реализации алгоритма региональной экстраполяции и ассемблирования, T_s | 7 |
| 6 | Скорость передачи данных по оптическому каналу, Мб/с | 640 |
| 7 | Задержка трансмиттера оптического канала, нс | 42,5 |
| 8 | Потребляемая мощность | 5,5 Вт |

Таблица 3. Основные технические характеристики экспериментального образца модуля TS.

| | Параметр | Значение |
|---|--|----------|
| 1 | Частота синхронизации работы устройства, МГц | 40 |
| 2 | Период частоты синхронизации устройства, T_s , нс | 25 |
| 3 | Скорость приема данных оптического канала, Мб/с | 640 |
| 4 | Задержка приема данных последовательного канала, нс | 76 |
| 5 | Задержка реализации алгоритма сортировки и принятия решения, T_s | 5 |
| 6 | Потребляемая мощность | 5,5 Вт |

3. Подготовка технической документации для сотрудничества ATLAS

Подготовка технической документации экспериментальных образцов основных компонентов системы FAST OR триггера включает в себя функциональные и принципиальные схемы, микропрограммы и загрузочные файлы аппаратно-программного обеспечения, тексты тестовых программ.

Разработка экспериментальных образцов включает в себя также трассировку плат модулей ТВ, TF, TS, подготовку тестовых и отладочных программ, комплектацию электронных компонентов.

На рисунке 15 показана, в качестве примера, многослойная трассировка платы ТВ и совмещённой платы для модулей TF и TS.

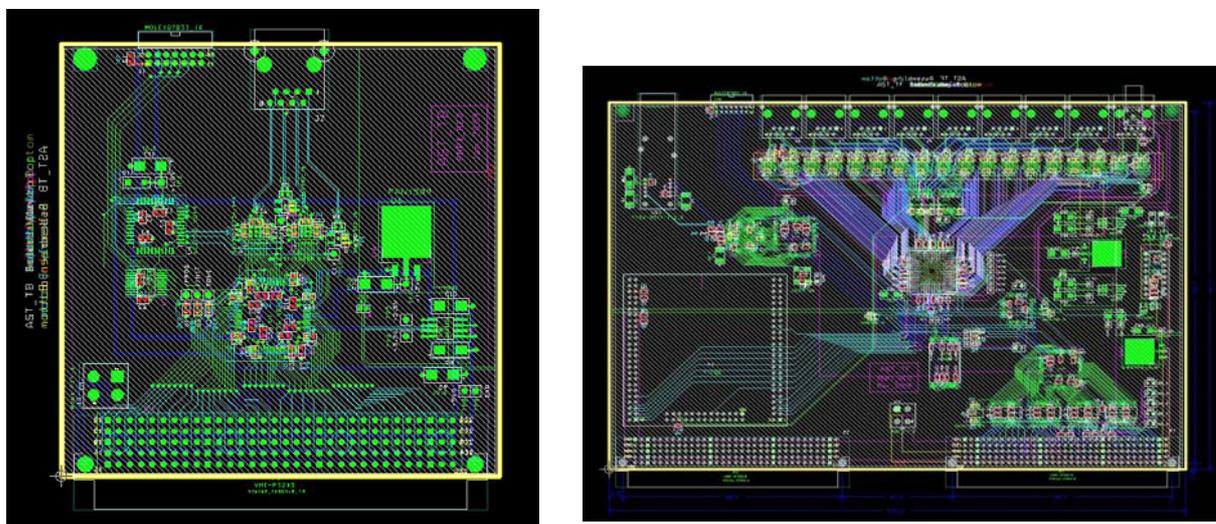


Рисунок 15 - Многослойная трассировка платы модулей TF и TS

Проведенные исследования по созданию FAST OR триггера для регистрации сильноионизирующих частиц на основе детектора переходного излучения TRT представлены во внутренней ноте сотрудничества ATLAS (https://svnweb.cern.ch/trac/atlasgroups/browser/Detectors/TRT/TRT_FastOR/Proposal/trunk/FastOR_Proposal.pdf).

4. Испытания облучательной установки и эталонных образцов, анализ результатов

Испытания облучательной установки, описание которой приведено в отчёте по 3-му этапу контракта, состояли из целого ряда мероприятий.

Прежде всего, до начала работы реактора после завершения монтажа всех новых элементов установки, было проверено качество функционирования электрического механизма передвижения установки.

Испытание состояло в неоднократном включении и выключении механизма передвижения, остановок установки в разных местах вдоль оси канала, в контроле срабатывания концевых выключателей в крайних положениях установки – перед активной зоной и в экспериментальном зале перед стеной биологической защиты. Эти перемещения установки вдоль канала позволили прокалибровать шкалу перемещения установки электроприводом, в итоге стало возможным легко выставлять облучательную установку в нужное место. При передвижениях установки проверялась легкость перемещения коммуникационных кабелей вместе с установкой, которые были вывешены на специальных подержках, закрепленных на пассивных элементах установки.

Перед началом работы реактора в контейнере на переднем фланце двутавра были помещены стандартные активационные детекторы контроля интегрального потока нейтронов. Готовая к работе установка механизмом перемещения была выдвинута из экспериментального зала к зоне реактора (установка «наехала» на зону реактора).

В процессе работы реактора при испытании облучательной установки контролировалась радиационная обстановка в экспериментальном зале ИБР-2М в зоне 3 канала. Отделом радиационной безопасности ОИЯИ в зале были размещены стационарные стандартные дозиметры, которые контролировали мощность дозы.

Во время цикла дежурными дозиметристами неоднократно осуществлялся контроль доз переносными дозиметрами. Измерения показали, что дозиметрическая обстановка в зоне канала №3 экспериментального зала реактора находится в соответствии с требованиями норм радиационной безопасности. Благодаря построенной радиационной защите работающий канал №3 не оказывал большого воздействия на дозиметрическую обстановку в зале и в зонах соседних каналов.

По завершении цикла работы реактора наведенная на стандартных детекторах (фольги-спутники) активность измерялась на специально созданном для этих целей спектрометре, показанном на рисунке 16.

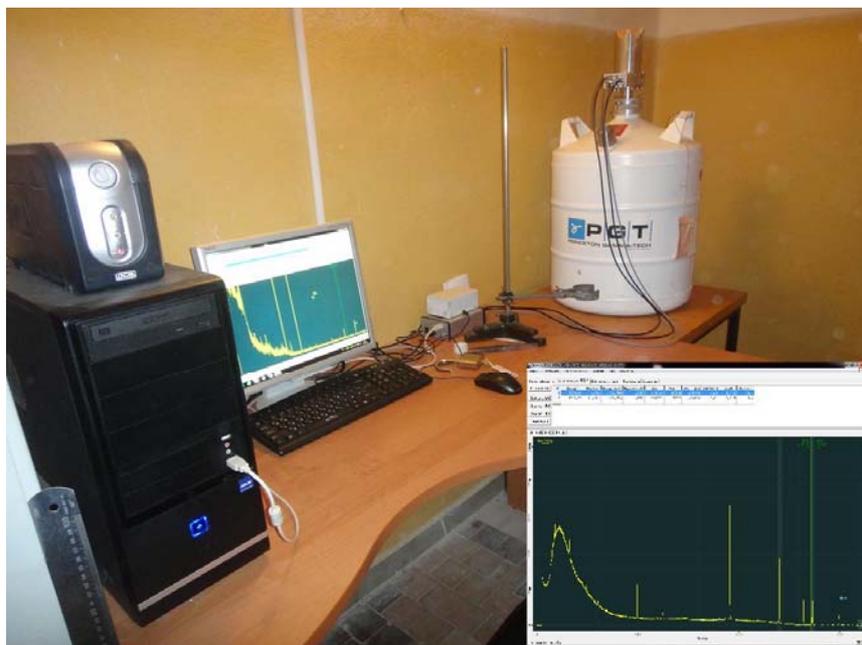


Рисунок 16 - Спектрометр для измерения наведенной активности

В его состав входили: защита, предназначенная для подавления радиационного фона; германиевый гамма-детектор с криогенным охлаждением; регистрирующая электроника и компьютер. Данный спектрометр, созданный на канале № 3, является неотъемлемой частью облучательной установки. Главной целью измерений было определение нейтронного флюэнса и измерение энергетического спектра нейтронов. Точность определения величины флюэнса в облучательной установке составляет порядка $10\div 20\%$.

Активированная нейтронами фольга монтируется на входном окне детектора. Гамма-кванты, вылетающие из фольги (см. рисунок 17), проходя через входное окно, попадают на поверхность кристалла германия.

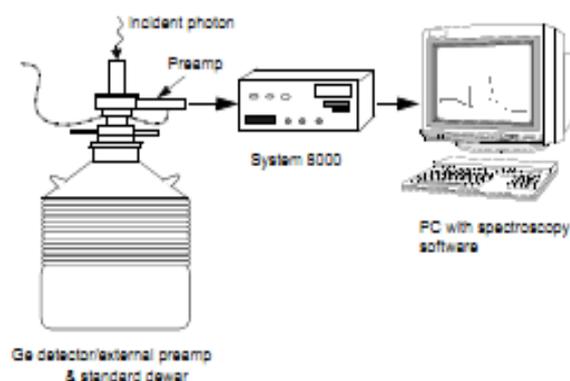


Рисунок 17 - Принципиальная схема гамма-спектрометра

Образующиеся в кристалле в результате комптоновского рассеяния электроны ускоряются электрическим полем и вызывают импульс, который усиливается и считывается регистрирующей электроникой, расположенной отдельно. Персональный компьютер, имеет специальное программное обеспечение, позволяющее идентифицировать гамма-пики (см. рисунок 16) и восстанавливать энергетические спектры.

В специальном цикле работы облучательной установки было проведено облучение набора пороговых детекторов, пороги активации которых лежат в диапазоне от 0,4 до 6 МэВ, с целью последующего восстановления энергетического спектра нейтронов. Этот набор включал в себя 13 химических элементов, среди которых имелись индий, никель, сера, ниобий, золото, цинк, хром и др.

Химический состав и вес каждого образца был точно известен. Образцы размещались в различных местах в зоне облучения. Часть образцов была обернута кадмиевой фольгой для снижения потока тепловых нейтронов, которые эффективно поглощаются кадмием. Всего было облучено около 60 образцов.

Наведенная в образцах гамма-активность определяется среди прочих параметров энергетической зависимостью сечения взаимодействия нейтронов и числом нейтронов определенной энергии - потоком нейтронов. Сечение взаимодействия нейтронов - величина известная и многократно измеренная.

Спектр нейтронов. восстанавливается с помощью специальной математической процедуры [5]. На рисунке 18 представлены восстановленные спектры кинетической энергии нейтронов.

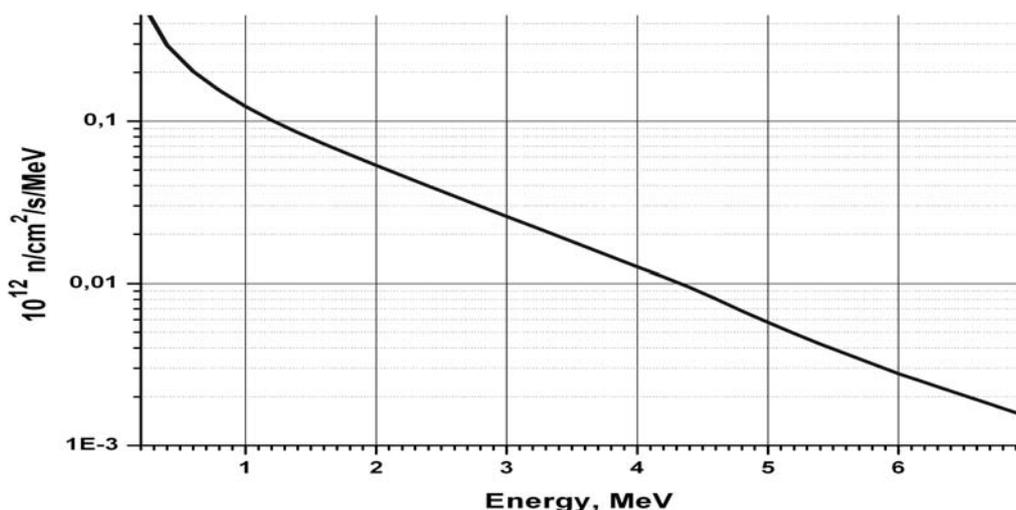


Рисунок 18 - Восстановленный спектр нейтронов в канале №3 реактора ИБР-2М. Прямые линии представляют аппроксимацию измерений спектров быстрых и резонансных нейтронов.

Средняя энергия и поток нейтронов в интервале от 0,4 до 10 МэВ составляют 1,5 МэВ и $1,3 \cdot 10^{10}$ н·см⁻²·сек⁻¹, соответственно.

Измеренная величина наведенной в фольге активности подтвердила правильность конструкторской проработки облучательной установки. В зоне контейнера с облучаемыми образцами суммарный поток нейтронов в первом сеансе облучения алмазных детекторов составил $1,5 \cdot 10^{17}$ н/см². Таким образом, проведенные испытания созданной облучательной установки показали, что она полностью отвечает требованиям технического задания, которое предполагало возможность проводить облучения в короткие сроки (один цикл работы реактора продолжается 11 суток) и такими потоками нейтронов, которые сравнимы с потоками, ожидаемыми на БАК при светимости, в 5 раз выше номинальной величины.

5. Облучение и измерение параметров тестируемых образцов

Для первого облучения на облучательной установке с новыми возможностями по интегральному потоку нейтронов по программе подготовки детектора АТЛАС к работе в условиях повышенной по сравнению с номинальной светимостью БАК были выбраны компоненты так называемого «mini-FCAL» калориметра [5,6]. Это прибор, который в случае успешных испытаний, обеспечил бы работу переднего жидкоаргонового калориметра с минимальными переделками механических структур торцевых

калориметров, а значит и с минимальным риском для целостности криостатов установки АТЛАС.

Активными элементами этого калориметра являются искусственные алмазы. Для облучения были отобраны также и пассивные компоненты калориметра. К пассивным составляющим относятся так называемые РЕЕК-волокна диаметром 100 и 500 микрон, по 10 штук каждого диаметра.

Следовало понять, приведет ли облучение к изменению диаметров волокон и изменению их гибкости. Пять печатных плат, применяемых для организации считывания сигнала с переднего калориметра, следовало визуально проверить на сохранение механической прочности после облучения. Следовало также проверить сохранность контактов на платах, к которым были припаяны коаксиальные кабели с BNC-разъемами, и убедиться в том, что медное покрытие платы прочно прилегает к каптоновой подложке – печатной плате (см. рисунок 19а)



а)

б)

Рисунок 19 - Материалы, облученные на канале №3 реактора ИБР-2М

Был облучен набор из четырех детекторов из искусственных алмазов. Как видно из рисунка 19б, детектор имеет форму диска, диаметром около 8 мм. Толщина диска составляет 3 мм. Каждая его сторона металлизирована Ti-Pt-Au слоем нанометровой толщины. Детектор размещен на керамической подложке. Два разъема соединяют его с измерительным прибором и используются для подачи высокого напряжения. В процессе облучения периодически регистрировался постоянный ток (ток утечки), который

генерируется в детекторе взаимодействующими с атомами углерода нейтронами.

Регистрирующая аппаратура вместе с компьютером располагалась в домике экспериментатора (см. рисунок 20).



Рисунок 20 - Домик экспериментатора: вид снаружи и изнутри. Виден монитор, на который выводились результаты on-line измерений.

Электронные блоки были ранее использованы нашими коллегами в TRIUMF (Ванкувер, Канада) в составе стенда для отработки методики измерений, после чего были перевезены в Дубну и вновь смонтированы в домике экспериментатора на канале №3. В цикле работы реактора был получен флюэнс нейтронов около $1,5 \cdot 10^{17}$ н·см⁻².

На рисунке 21а показан ток, протекающий через один из четырех детекторов, размещенных в контейнере, в зависимости от времени. Рисунок 21б демонстрирует временную картину поведения мгновенной мощности реактора за тот же интервал времени (показан период всего сеанса работы реактора).

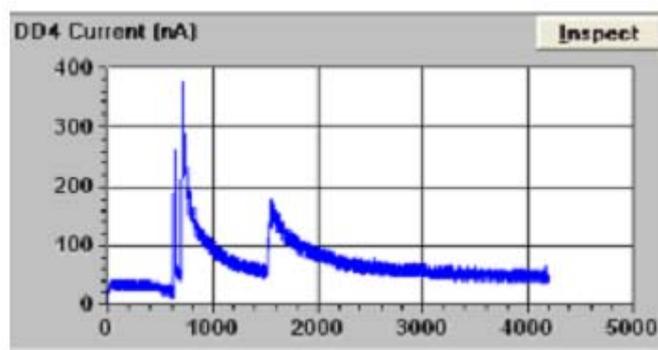


Рисунок 21(а) - Зависимость постоянного теневого тока детектора от интегрального потока нейтронов

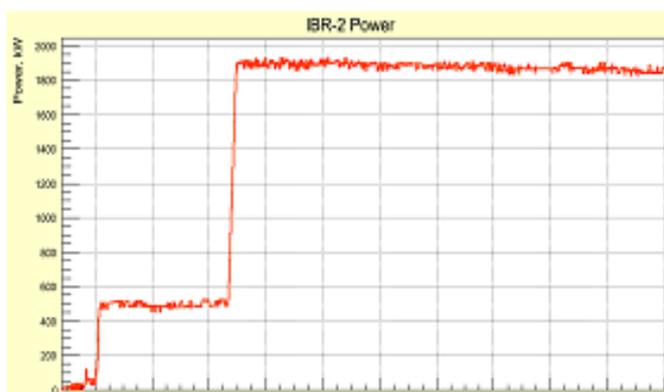


Рисунок 21(б) - Изменение мгновенной мощности реактора в ходе сеанса.

Интересующие нас характеристики алмазного детектора непрерывно изменяются – деградируют в ходе сеанса, по мере накопления флюэнса нейтронов. Нерегулярности в кривой зависимости тока от времени облучения объясняются изменением мощности реактора. При увеличении мощности видно мгновенное увеличение тока через детектор, сопровождающийся немедленным плавным уменьшением его величины, явлением, которое называют деградацией детектора.

Проведенные после облучения измерения требуемых механических характеристик волокон и печатных плат не обнаружили сколько-нибудь значимых изменений.

Постоянный ток, протекающий через искусственный алмаз, деградирует с набором флюэнса весьма существенно. К окончанию цикла реактора величина тока значительно уменьшилась и составляла около 5% от первоначальной.

6. Второй HV-тест перспективных материалов

Для испытаний были изготовлены тестовые образцы печатных плат из следующих перспективных материалов: полиимид (Kapton), Arlon 85N, G10, FR4, Rogers 4450B [7].

Для расширения спектра рассматриваемых материалов, к списку, первоначально планировавшемуся к испытаниям, был добавлен перспективный материал Arlon 85N [8], являющийся наиболее современным композитом на основе полиимида. При этом образцы на основе полиимида толщиной 100 мкм были сняты с тестирования по причине ограниченности объема зоны облучения и несущественности отличий от образцов толщиной 75 мкм.

Для обеспечения необходимых механических и геометрических требований, предъявляемых к платам, для финального образца из полиимида была применена измененная схема склейки слоев – средний слой полиимида с клеем был заменен на двойной слой препрега Arlon 37N.

Окончательная послойная структура тестовых плат из различных исследуемых материалов, подвергавшихся испытаниям, схематично представлена на рисунке 22.

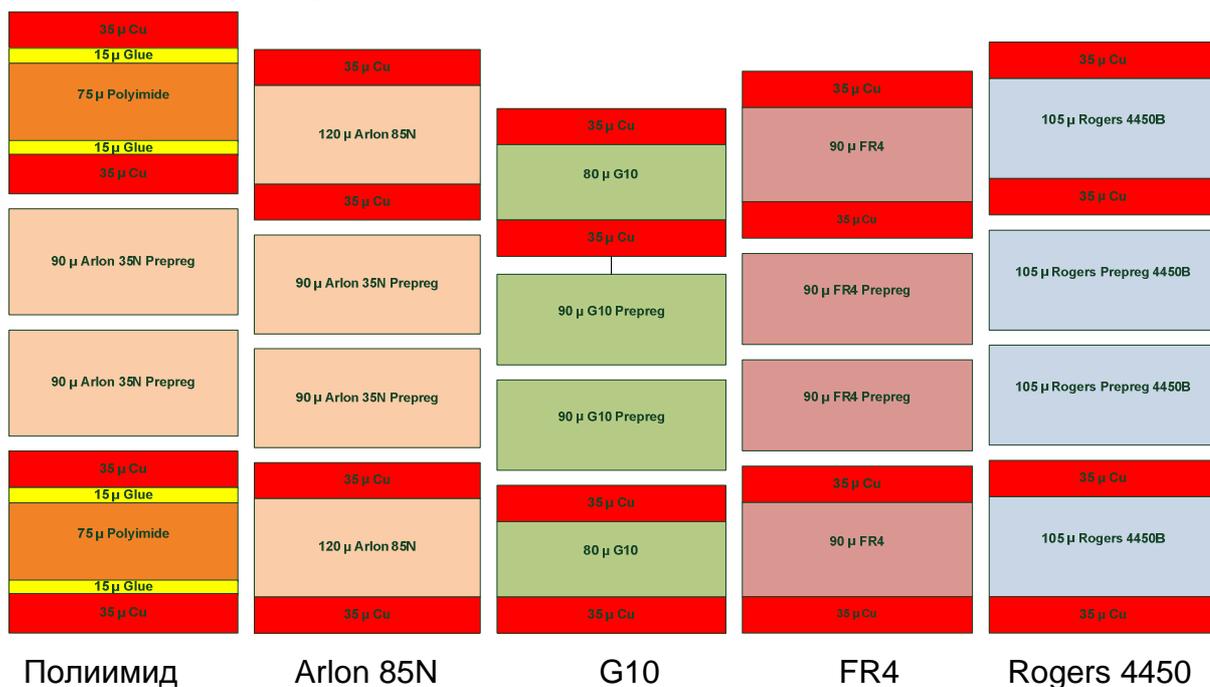


Рисунок 22 - Структура слоев тестовых образцов

Средние толщины ламинатов, из которых были изготовлены тестовые платы, составили для G10 – 480 μ, FR 4 – 500 μ, Rogers – 560 μ, Arlon – 560 μ, полиимид – 530 μ.

Из всех указанных материалов – полиимид (Kapton), Arlon 85N, G10, FR4, Rogers 4450B, были изготовлены одинаковые тестовые образцы печатных плат с разработанной топологией слоев, ориентированной на весь спектр тестов, а именно: электропрочностные, радиочастотные и тесты на стойкость к ультрафиолетовому излучению.

Фотография общего вида изготовленных тестовых плат из различных исследуемых материалов представлена на рисунке 23.



Рисунок 23 - Общий вид тестовых образцов

На рисунке 24 представлены отдельные образцы плат из различных материалов.

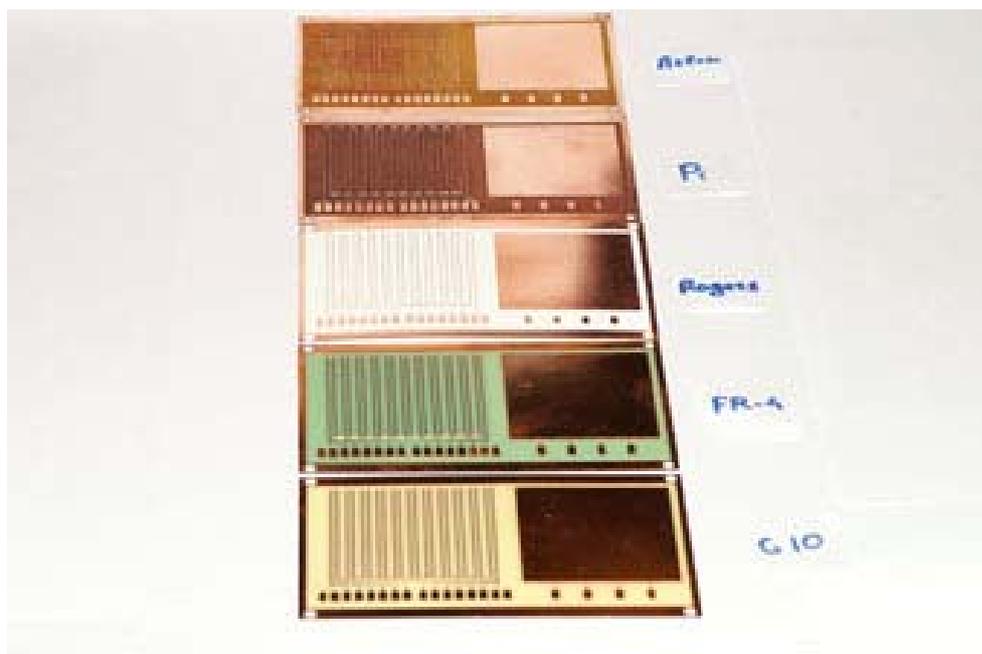


Рисунок 24 - Отдельные образцы плат из различных материалов

6.1 Результаты электропрочностных испытаний

Электропрочностные измерения (измерение токов утечки) проводились для образцов из всех представленных типов материалов, а именно: полиимид (Kapton), Arlon 85N, G10, FR4, Rogers 4450B, помещенных в зону нейтронного облучения.

Электропрочностные испытания (второй HV тест) тестовых образцов перспективных материалов проводятся после радиационного воздействия, эквивалентного десятилетней эксплуатации печатных плат из этих материалов в составе проектируемого варианта calorimetра mini-FCal с заполнением газообразным ксеноном под давлением 10 атм.

На рисунке 25 представлена принципиальная схема измерений.

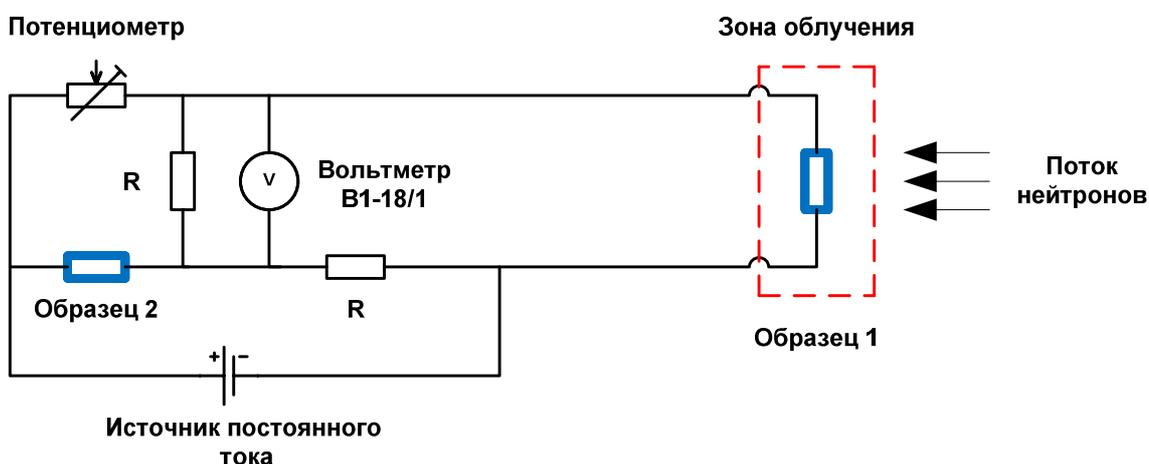


Рисунок 25 - Принципиальная схема измерений

Результаты испытаний представлены в таблице 4 в виде относительных изменений объёмного удельного сопротивления по сравнению с результатами испытаний в нормальных условиях, до нейтронного облучения.

Таблица 4. Относительное изменение электрической прочности (объёмного удельного сопротивления) образцов перспективных материалов после радиационного воздействия.

| Слои | Материал | | | | |
|------|----------|-----------|--------|--------|--------------|
| | Полиимид | Arlon 85N | G10 | FR4 | Rogers 4450B |
| 1-2 | +1,1% | -3,2% | -13,7% | -11,4% | -6,1% |
| 2-3 | -2,5% | -2,7% | -11,3% | -9,7% | -5,0% |
| 3-4 | -0,7% | -3,7% | -16,2% | -14,3% | -7,3% |

Подобные измерения проведены для образцов из всех представленных типов материалов, а именно: полиимид (Kapton), Arlon 85N, G10, FR4, Rogers 4450B.

Поскольку в зону облучения реактора ИБР-2 ОИЯИ Дубна одновременно помещаются только пять тестовых образцов, относительные измерения изменения объёмного удельного сопротивления проводились только для одного образца каждого типа между слоями 1-2, 2-3 и 3-4, содержащими медные проводники (см. рисунок 22).

По результатам испытаний мы видим очень малое изменение электропрочностных характеристик после облучения у образца из полиимида и незначительное изменение у тестовых образцов из Arlon 85N и Rogers 4450B.

7 Тестирование прототипов микроканальных детекторов

7.1 Оптимизация параметров и геометрии газо-пиксельных детекторов

Сравнение обработанных экспериментальных данных по газо-пиксельным детекторам, полученных на тестовом пучке ускорителя SPS в ЦЕРН в ноябре 2012 года, с результатами компьютерного моделирования показало очень хорошее согласие. Это дает уверенность в корректности и полноте разработанной компьютерной модели и позволяет с высокой степенью достоверности использовать ее для предсказания свойств газо-пиксельных детекторов с другими, отличными, от имеющихся в настоящий момент, свойствами, параметрами и геометрией. Поскольку область возможного использования газо-пиксельных детекторов при модернизации установки ATLAS окончательно не определена, то для разных применений могут потребоваться детекторы с разными характеристиками.

Здесь приведены результаты расчетов ожидаемых координатной и угловой точностей детекторов в зависимости от их параметров – состава газовой смеси, толщины дрейфового промежутка и размеров пикселей. Выбор последнего параметра геометрии детектора важен для желаемого уменьшения числа каналов электроники и, соответственно, стоимости всего детектора.

Моделировалась работа газо-пиксельных детекторов с двумя вариантами рабочей газовой смеси: на основе DME (50% DME + 50% CO₂) и на основе аргона (93% Ar + 7% CO₂). Первая из этих смесей обладает очень низкой диффузией, что позволяет получать рекордно высокие координатные точности, а вторая выглядит более реалистичной для применения в больших детекторах за счет своей дешевизны и безопасности. Рассмотрены два варианта толщины дрейфового газового промежутка – 5 и 10 мм, а также разные углы падения регистрируемой частицы на детектор: 30 и 20 градусов с вертикалью к плоскости чипа. Далее везде под координатой X имеется в виду координата, соответствующая координате по азимутальному углу φ в центральной части установки ATLAS. Точность изменения этой координаты

при прохождении частицы в магнитном поле определяет точность измерения импульса частицы. Координата Y далее в тексте соответствует координате вдоль направления пучков в ATLAS. Направление проекции трека падающей частицы ориентировано в основном вдоль оси Y , с небольшим дополнительным вращением в плоскости чипа (см. рисунок 26).

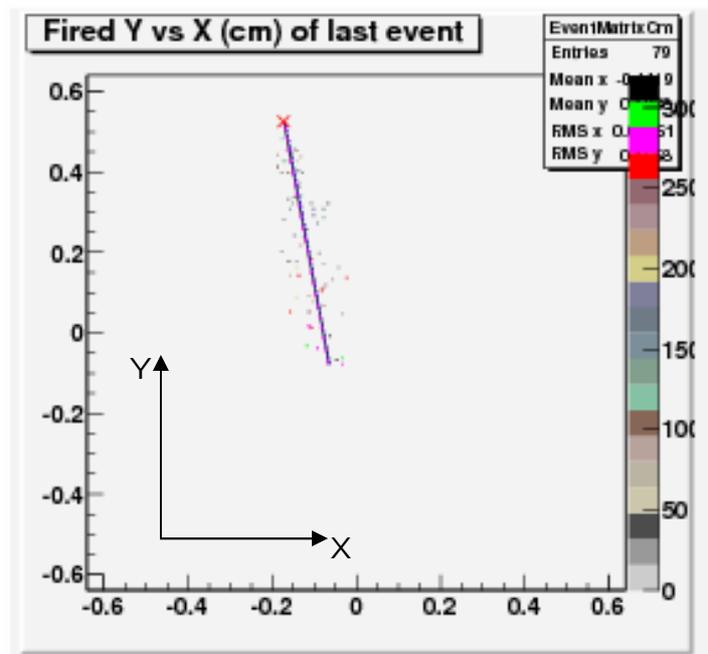


Рисунок 26 - Пример смоделированного события в плоскости чипа. Точками показаны сработавшие пиксели, отрезок прямой – проекция реконструированного трека, крестиком отмечена точка пересечения регистрируемой частицы с плоскостью чипа

Длина проекции определяется заданной толщиной дрейфового промежутка и углом падения регистрируемой частицы на детектор. Заметим, что этот угол в центральной части ATLAS определяется, главным образом, псевдобыстротой частицы.

На рисунках 27–30 приведены результаты расчетов для смеси на основе DME с различной толщиной дрейфового промежутка и при различном угле падения регистрируемой частицы.

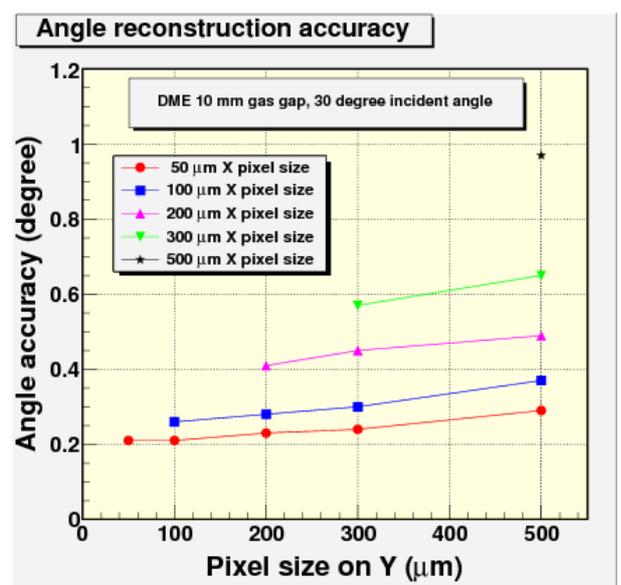
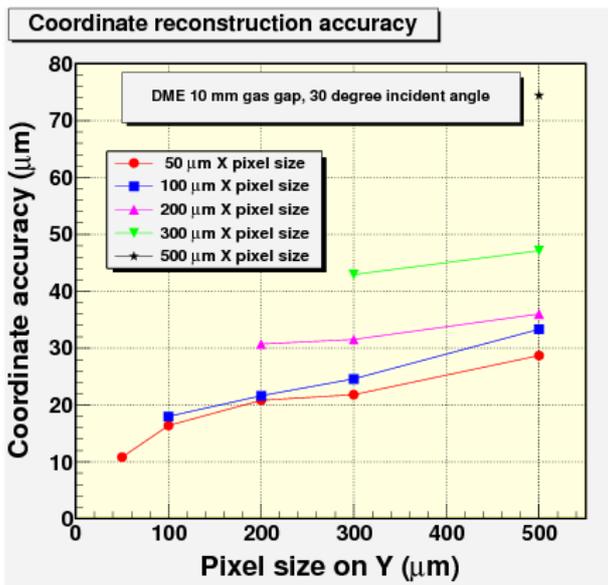


Рисунок 27 - Слева – координатная, справа – угловая точности восстановления трека в плоскости чипа. Приведены зависимости от размера пикселя по Y при различных размерах пикселя по X. Газовая смесь на основе DME, толщина дрейфового промежутка – 10 мм, угол падения регистрируемой частицы составляет 30° с нормалью к чипу.

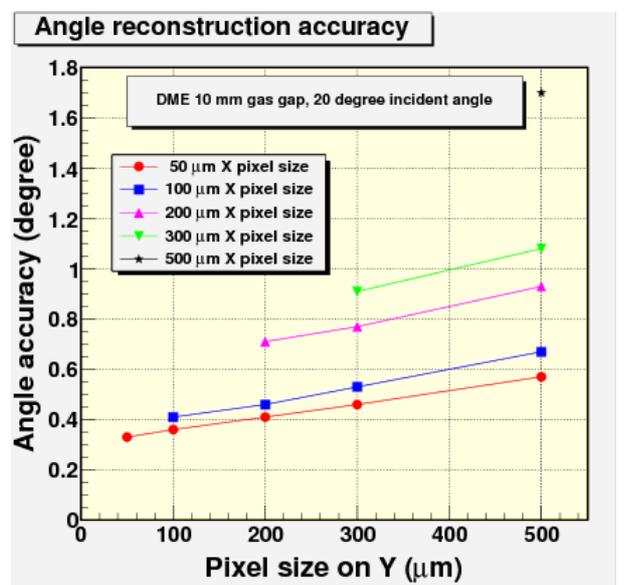
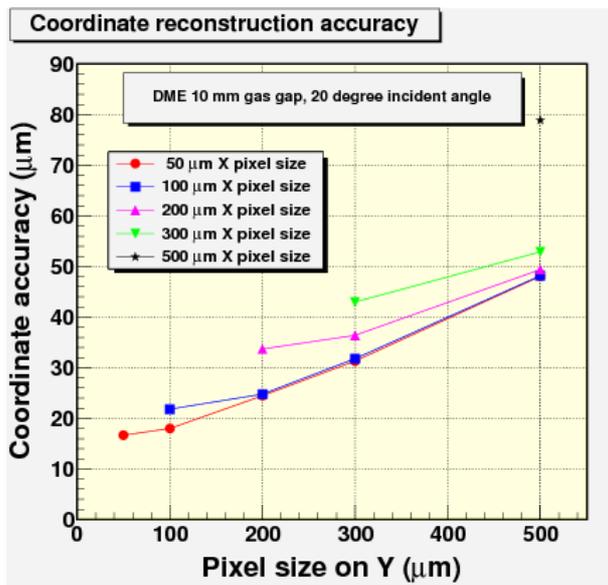


Рисунок 28 - То же, что и на рисунке 27, но угол падения регистрируемой частицы составляет 20°

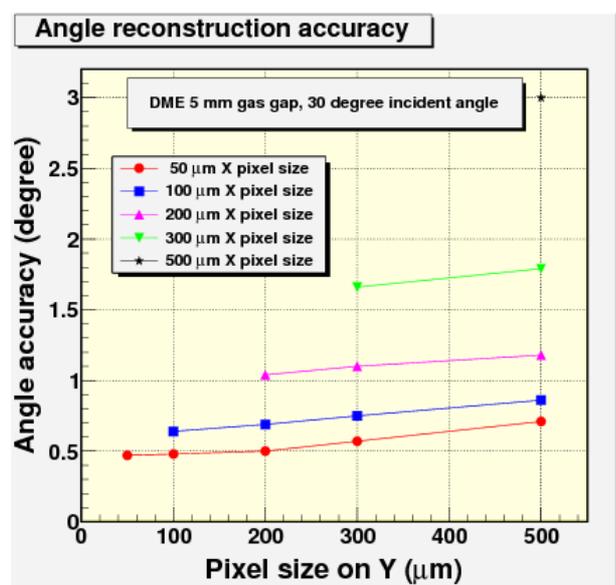
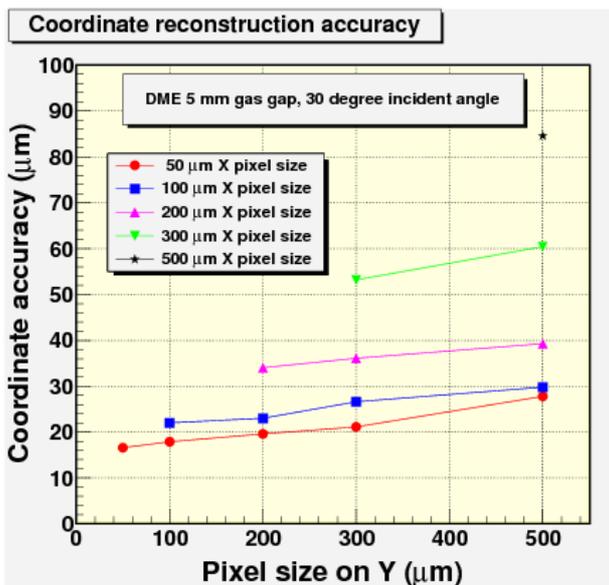


Рисунок 29 - То же, что и на рисунке 27, но толщина дрейфового промежутка составляет 5 мм

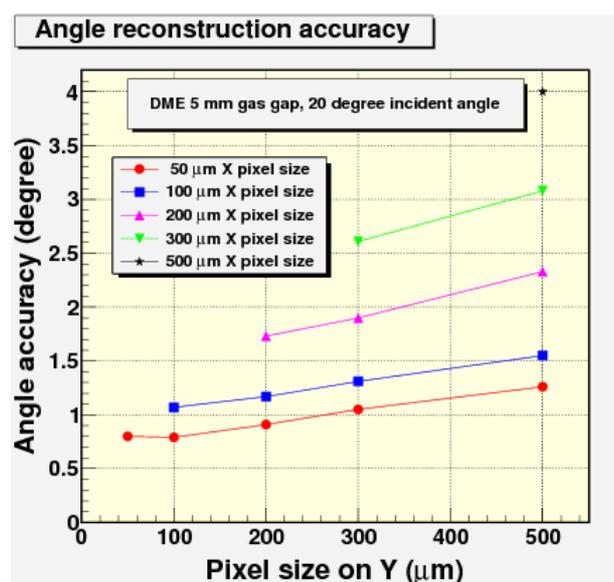
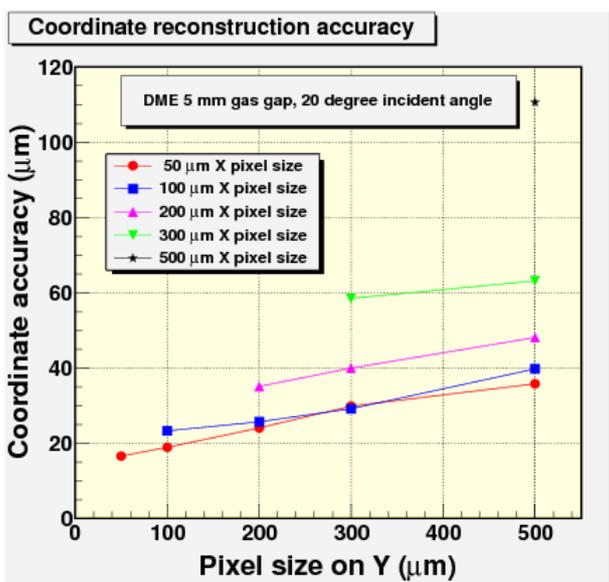


Рисунок 30 - То же, что и на рисунке 27, но толщина дрейфового промежутка – 5 мм, а угол падения регистрируемой частицы составляет 20°

От этих параметров зависит длина проекции трека на чип и число сработавших пикселей, а следовательно – и координатная и угловая точность восстановления трека. Как и можно было ожидать, точности улучшаются при меньших размерах пикселей, а также при увеличении толщины дрейфового промежутка. Ценой такого улучшения является увеличение числа каналов детектора и увеличение времени сбора сигнала с трека регистрируемой частицы.

Можно заметить, что в большинстве случаев размер пикселя 50 мкм по X выглядит неоправданно затратным: практически те же точности можно получить с размером пикселя по X в 100 мкм, что дает вдвое меньшее число каналов.

Зависимости точностей от размера пикселей по Y близки к линейным. При этом зависимость для координатной точности является несколько более резкой, чем для угловой. Это объясняется «эффектом параллакса»: в случае наклонного трека размер пикселя по Y вносит дополнительную неточность в определении координаты X.

Длина проекции трека (зависящая от толщины дрейфового промежутка и от угла частицы по отношению к детектору) в большей степени влияет на угловую точность, чем на координатную. Это происходит потому, что последняя в значительной степени определяется не всем треком, а его частью, близкой к вершине – точке пересечения с плоскостью чипа.

На рисунках 31–34 приведены аналогичные зависимости для смеси на основе аргона. Основное отличие аргоновой смеси по сравнению с DME с точки зрения трековых измерений это значительно более высокая диффузия (коэффициент поперечной диффузии для аргоновой смеси составляет $430 \text{ мкм/см}^{1/2}$, а для DME – $71 \text{ мкм/см}^{1/2}$).

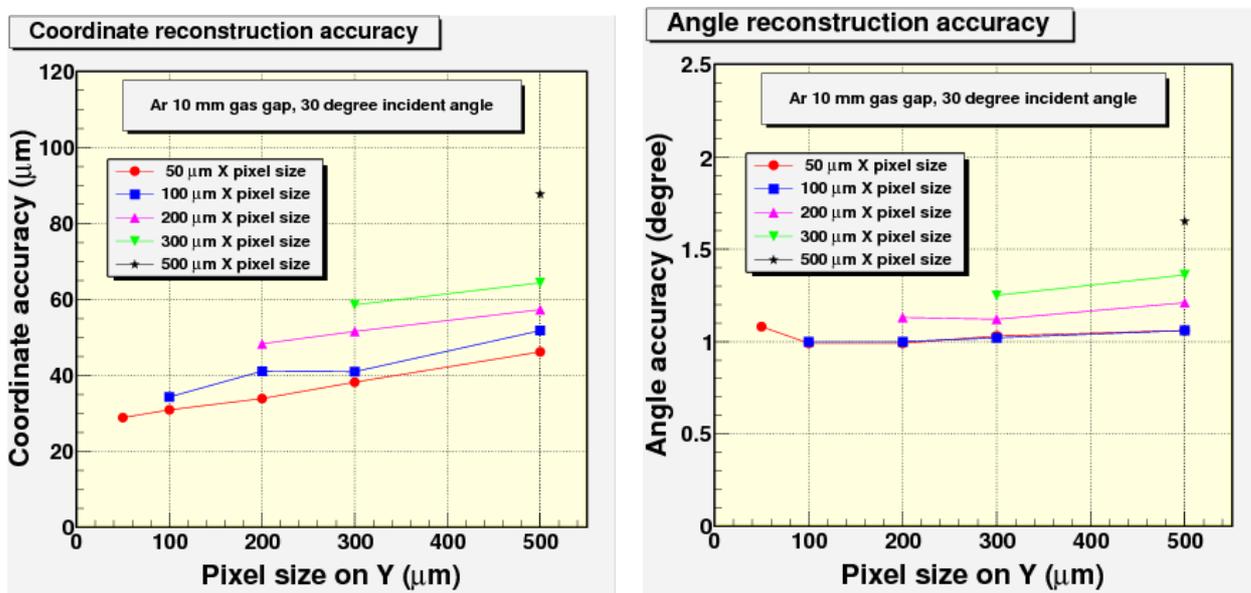


Рисунок 31 - Слева – координатная, справа – угловая точности восстановления трека в плоскости чипа. Приведены зависимости от размера пикселя по Y при различных размерах пикселя по X. Газовая смесь на основе аргона, толщина дрейфового промежутка – 10 мм, угол падения регистрируемой частицы составляет 30° с нормалью к чипу

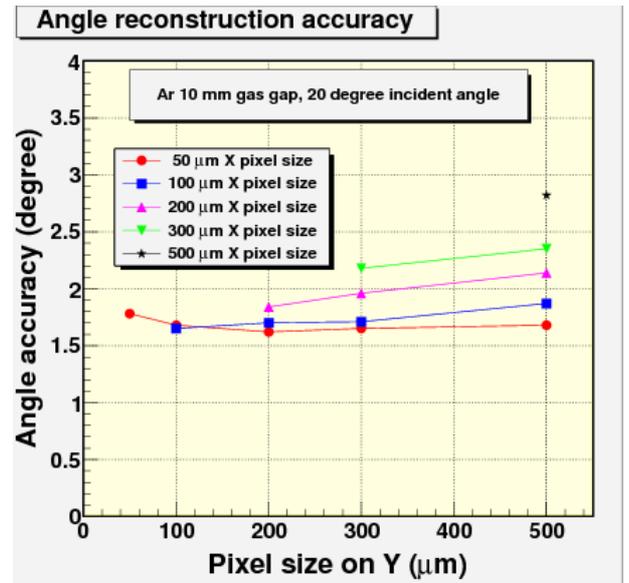
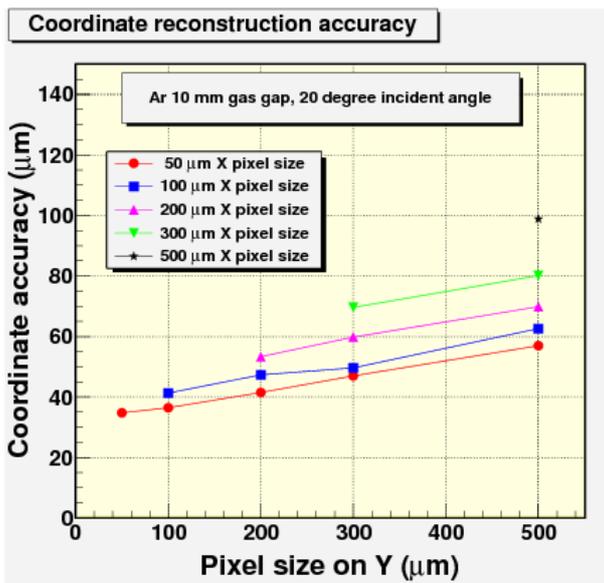


Рисунок 32 - То же, что и на рисунке 31, но угол падения частицы составляет 20°

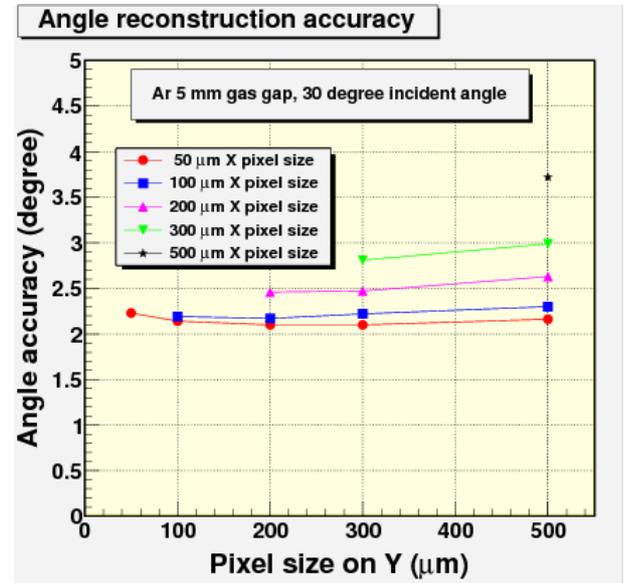
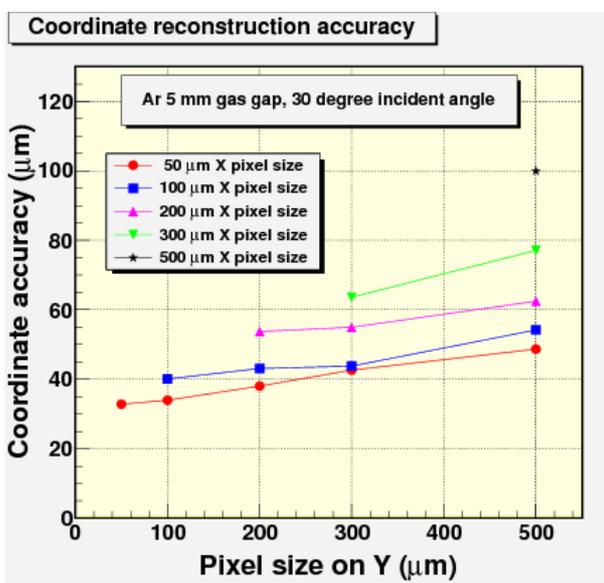


Рисунок 33 - То же, что и на рисунке 31, но толщина дрейфового промежутка составляет 5 мм

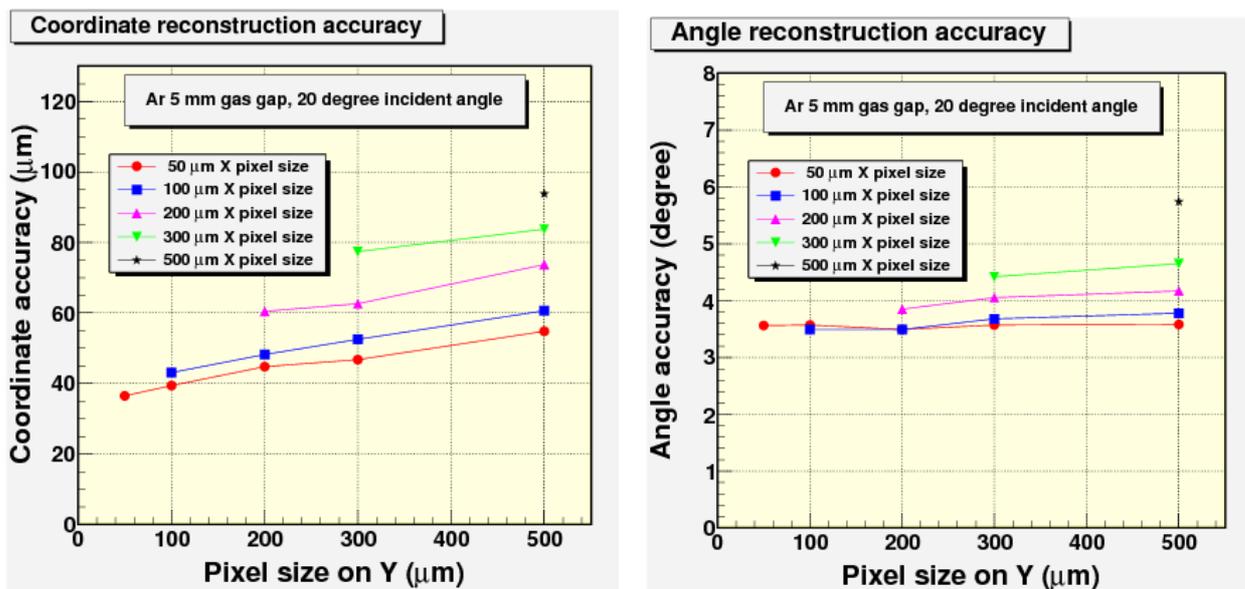


Рисунок 34 - То же, что и на рисунке 31, но толщина дрейфового промежутка – 5 мм, а угол падения регистрируемой частицы составляет 20°

Это, естественно, приводит к худшим точностям в координатных и угловых изменениях. В остальном можно повторить те же соображения и выводы, которые были сделаны выше для DME смеси.

Заметим, что все приведенные до сих пор результаты получены в предположении, что детекторы работают в тех же режимах и с теми же порогами регистрации сигнала с пикселя, что и применялись в тестовых измерениях в пучках ускорителя в ноябре 2012 года с чипом с размерами пикселей 55×55 мкм. Для DME смеси этот порог составлял 0,9 первичных электронов ионизации, для аргоновой смеси – 0,56.

В принципе, для детекторов с другими размерами пикселей могут потребоваться режимы с другими коэффициентами газового усиления и другими порогами регистрации сигнала. На рисунках 35 и 36 приведены результаты расчетов, показывающие, каким образом ожидаемые точности зависят от выбранного порога.

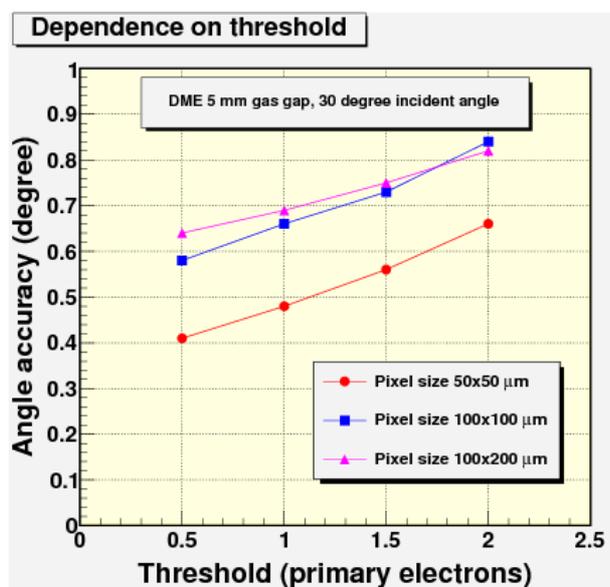
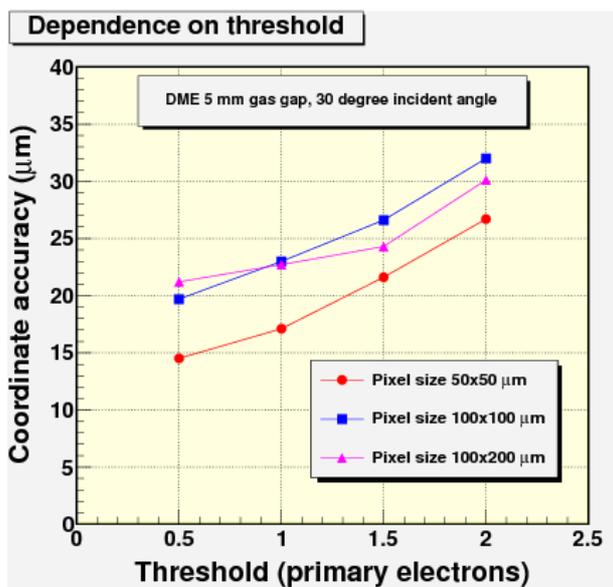


Рисунок 35. Зависимости координатной (слева) и угловой (справа) точности от порога регистрации сигнала с одного пикселя для смеси на основе DME и различных вариантов размера пикселя. Дрейфовый промежуток – 5 мм, угол падения регистрируемой частицы составляет 30°

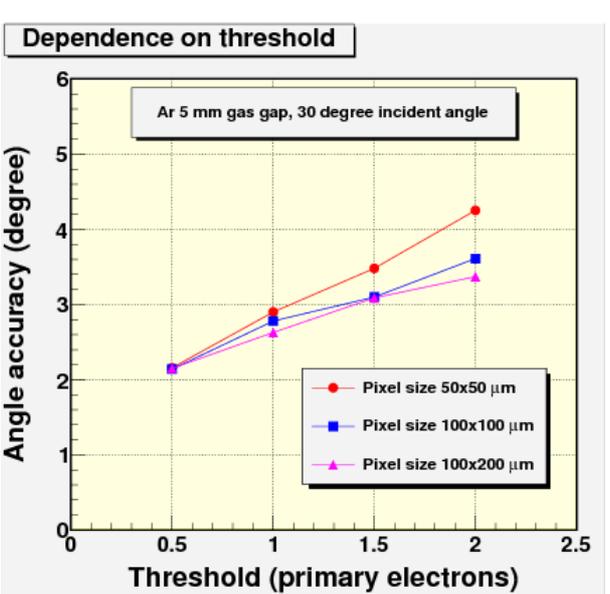
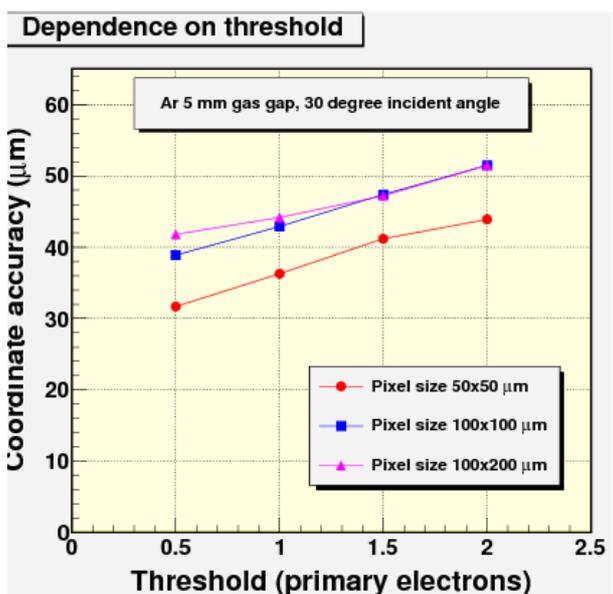


Рисунок 36 - То же, что и на рисунке 35, но для смеси на основе аргона

Эти графики могут использоваться для оценки точностей в случае изменения порога регистрации.

Окончательный выбор геометрических параметров детектора, в частности размера пикселей, величины дрейфового промежутка, а также порога регистрации в конечном счете будет зависеть от конкретных требований, предъявляемых к газо-пиксельным детекторам в реальной установке.

Для описанной далее разработки алгоритмов триггера первого уровня была выбрана геометрия детектора с размером пикселей 100 x 200 мкм.

7.2 Разработка алгоритмов триггера первого уровня на основе микроканальных детекторов, оптимизация его эффективности

Система газовых микроканальных детекторов может внести существенный вклад в выработку триггера первого уровня установки ATLAS, если считывание информации с отдельных пикселей, ее предварительная обработка, анализ полученных данных и передача информации в центр формирования триггера будет производиться в реальном масштабе времени и займет не более 1 мкс. Это означает, что все алгоритмы обработки информации должны быть реализованы на аппаратном уровне, без привлечения компьютера. Если за основу берется время-проекционный метод считывания и обработки информации, то необходимы следующие алгоритмы:

- Алгоритм съема информации с пикселя.
- Алгоритм передачи данных с пикселей в блок накопления и обработки информации (БНО), расположенный на краю каждого чипа.
- Алгоритм обработки информации в БНО для определения трехмерной картины прохождения частицы через газовый объем чипа и дальнейшего вычисления точки ее входа и углов φ и θ , под которыми она пересекла чип.
- Алгоритм передачи информации о прошедшей частице в центр формирования триггера первого уровня в минимальное время и с минимальным количеством линий связи.

7.3 Алгоритм съема информации с пикселя

В рамках время-проекционного метода считывание информации производится каждые 25 нс в соответствии с циклом работы ускорителя. Полагая, что максимальное время дрейфа электронов в газовом объеме пикселя составляет 200 нс, получаем, что вся информация о пролете частицы через пиксель укладывается в 8 циклов считывания.

За основу принимается бинарный метод оценки сигнала с пикселя, т.е. сигнал, превышающий порог дискриминации, оценивается как "1", а сигнал меньшей амплитуды (в основном, шумы и наводки) как "0".

На рисунке 37 приведена блок-схема электроники пикселя и временная диаграмма сигналов.

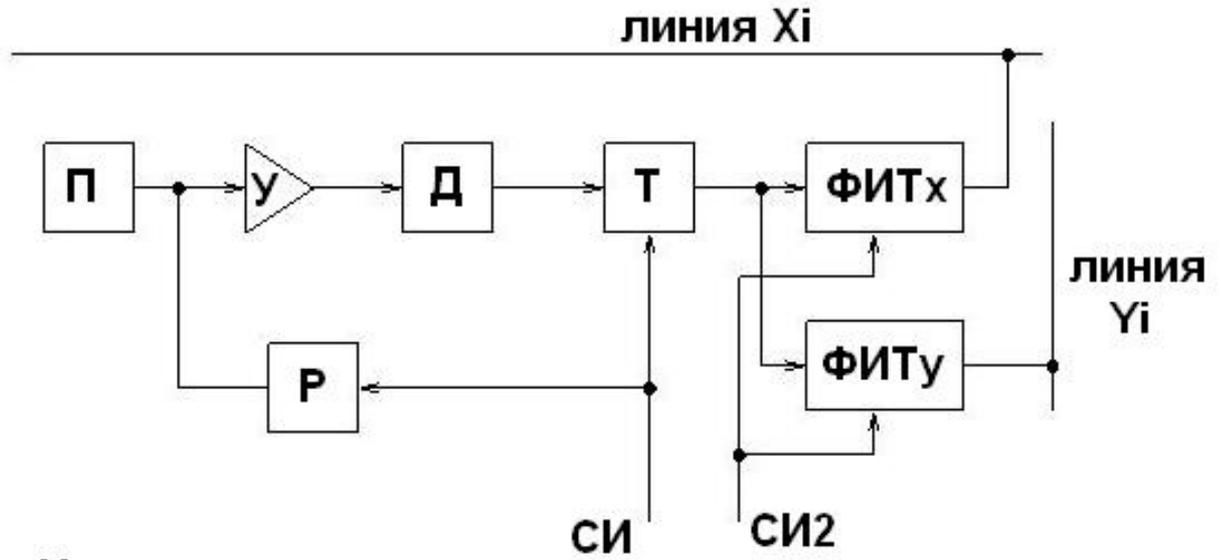


Рисунок 37а - Блок-схема электроники пикселя

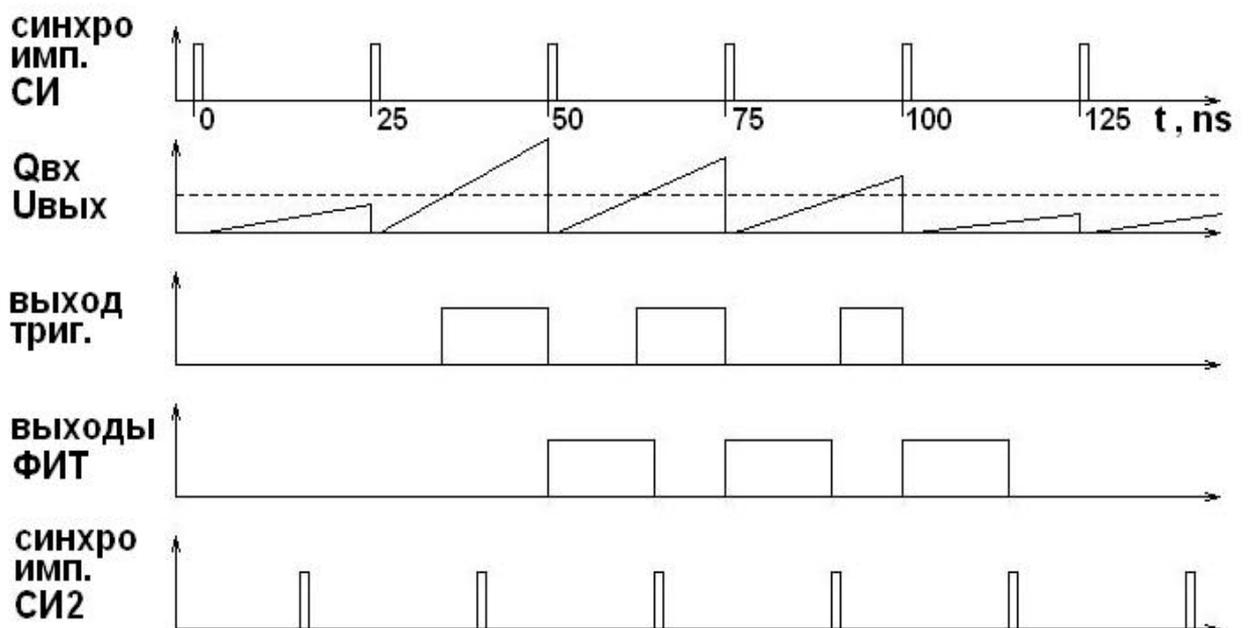


Рисунок 37б - Временная диаграмма работы электроники пикселя

Заряд, накапливающийся на аноде пикселя и входе усилителя, преобразуется в нарастающий потенциал на выходе усилителя. Если за время одного цикла (25 нс) амплитуда выходного импульса превысит установленный порог дискриминатора Д, срабатывает триггер Т. Этот триггер сбрасывается затем синхроимпульсом СИ. Спад сигнала триггера

производит запуск двух формирователей импульсов тока (ФИТ). Один из них выдает фиксированный по амплитуде и времени импульс тока на шину X_i , идущую вдоль всех пикселей чипа, имеющих координату X_i , а второй ФИТ на шину Y_i , идущую вдоль всех пикселей чипа, имеющих координату Y_i (рисунок 38).

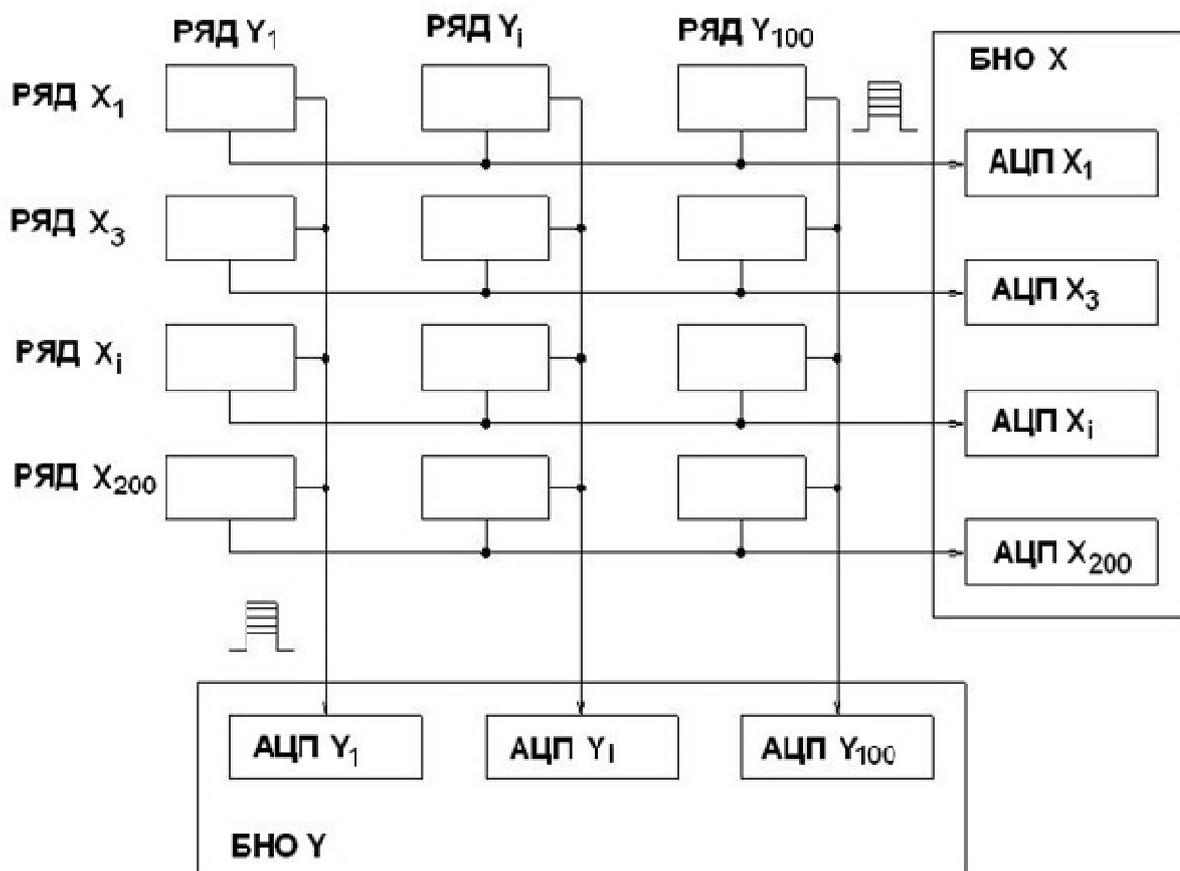


Рисунок 38 - Блок-схема передачи данных с отдельных пикселей в БНО X и БНО Y чипа

Сброс всех ФИТ осуществляется сигналом СИ2. Длительность сформированного импульса порядка 15 нс, и он заканчивается до начала следующего цикла. Синхроимпульс СИ также запускает схему разрядки R, обнуляя заряд на входе усилителя и подготавливая его к накоплению заряда в следующем цикле.

7.4 Алгоритм передачи данных с пикселей в БНО чипа

На рисунке 38 видно, что выходы всех пикселей ряда X_i , независимо от их координаты Y , подключены к одной шине X_i , через свой ФИТ. Импульсы тока от отдельных сработавших пикселей суммируются на шине и входе амплитудно-цифрового преобразователя АЦП X_i , находящегося в блоке обработки сигналов (БОС) на краю чипа.

Поскольку импульсы тока от отдельных пикселей равны по амплитуде и совпадают во времени, сигнал на входе АЦП имеет дискретную амплитуду $U=A \cdot n \cdot R$, где A амплитуда тока от одного пикселя, n число сработавших в данном ряду (X_i или Y_i) пикселей, R входное сопротивление АЦП.

Проведенное моделирование показывает, что при размерах пикселя 100 x 200 мкм, пролет одной заряженной частицы через газовый объем пикселя вызывает срабатывание не более 30 пикселей на один цикл даже для больших углов φ и θ (рисунок 39).

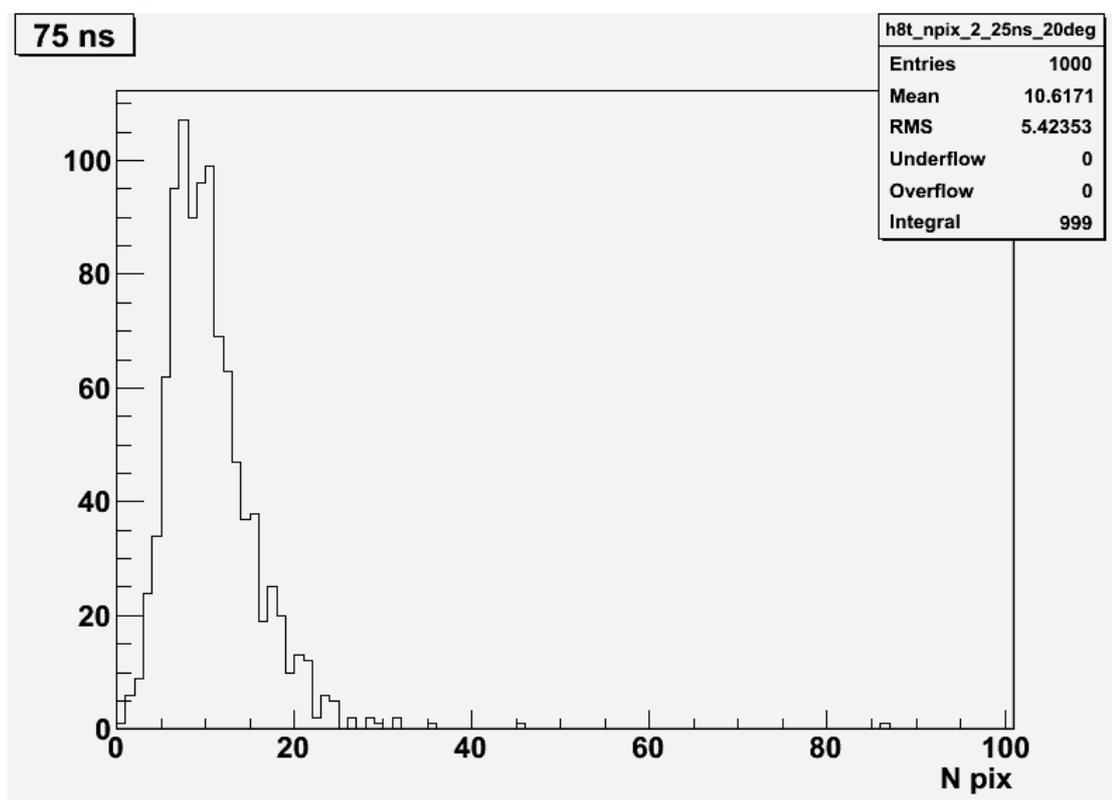


Рисунок 39 - Пример распределения числа сработавших пикселей в одном 25-наносекундном временном интервале

При этом в одном ряду X_i или Y_i , число сработавших пикселей не превышает 10 на 1 цикл. Поэтому максимальное число "ступенек" на входе АЦП не превышает 10. Если задать амплитуду одной ступеньки $U_{ст} = 0,05$ В, то максимальный сигнал на входе АЦП U_{max} не превысит 0,5 В, а при $U_{ст} = 0,1$ В U_{max} составит не более 1 В.

Учитывая малую длину линии (менее 2 см), низкое входное сопротивление АЦП и большую амплитуду сигнала, можно пренебречь влиянием наводок. И появившаяся на выходе АЦП цифра будет точно отражать число сработавших в данном ряду (X_i или Y_i) пикселей в данном цикле.

Именно числа сработавших в каждом ряду X_i и каждом ряду Y_i пикселей являются исходной информацией для применения алгоритма обработки данных в БНО.

7.5 Алгоритм обработки информации в БНО

Вся плоскость чипа, состоящая из 20000 пикселей, разбита на 200 строк по 100 пикселей в строке и 100 колонок по 200 пикселей в колонке (рисунок 38). Номер строки от 1 до 200 определяет координату X , а номер колонки от 1 до 100 координату Y . Вдоль каждой строки X_i идет шина, на которой суммируются импульсы тока от всех пикселей данной строки. На конце данной шины, в блоке накопления и обработки информации БНО X , находится аналого-цифровой преобразователь АЦП данной строки. Он преобразует суммарную амплитуду импульсов тока всех сработавших в данной строке пикселей в число, указывающее, сколько именно пикселей сработало в данной строке в данный 25 нс интервал времени. Аналогично, на конце шины каждой колонки Y_i находится АЦП данной колонки, фиксирующий число пикселей, сработавших в данной колонке. Поскольку в плоскости XU сработавшие пикселей концентрируются вокруг точки, отражающей положение частицы в газовом объеме чипа, число сработавших пикселей отражает координату X и координату Y частицы. Следует учитывать, что размер пикселя вдоль оси X - 100 мкм, а вдоль оси Y - 200 мкм.

На рисунке 40 приведен пример распределения сработавших пикселей по координате X , отраженной как номер строки, и по координате Y , отраженной как номер колонки, для временного интервала 100-125 нс.

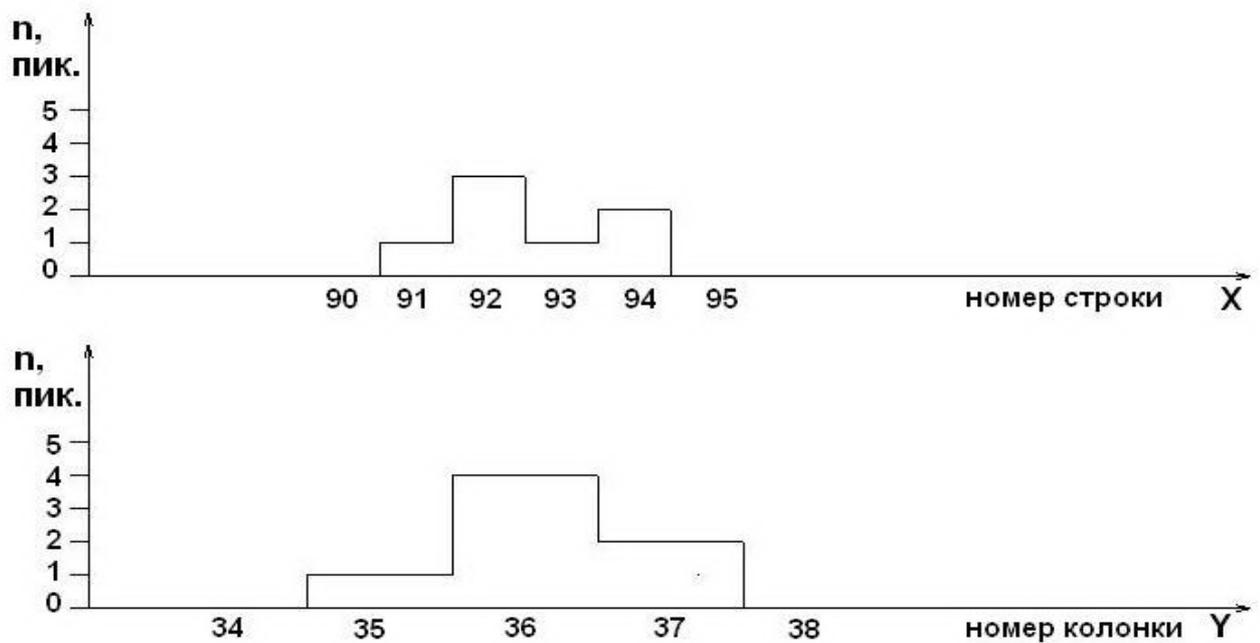


Рисунок 40 - Пример распределения пикселей, сработавших в одном временном интервале по оси (строке) X и оси (колонке) Y

Общее число сработавших пикселей - 7, независимо от того, в какой проекции они зафиксированы. Для определения координаты частицы вычисляется центр тяжести образовавшейся фигуры. Номер строки умножается на число пикселей в строке, полученные произведения суммируются, а сумма делится на общее число пикселей.

$$\text{Для примера, на рисунке 40 } X = \frac{91 \cdot 1 + 92 \cdot 3 + 93 \cdot 1 + 94 \cdot 2}{7} = 96,2 \text{ пикселя,}$$

или, учитывая, что размер пикселя по координате X составляет 100 мкм, координата частицы $X = 96,2 \cdot 0,1 \text{ мм} = 9,26 \text{ мм}$ от края рабочей части чипа.

$$\text{Соответственно, для координаты Y: } Y = \frac{35 \cdot 1 + 36 \cdot 4 + 37 \cdot 2}{7} = 36,14$$

пикселя или $Y = 36,14 \cdot 0,2 \text{ мм} = 7,23 \text{ мм}$ от края рабочей части чипа.

Более широкое распределение пикселей по оси Y связано не с размерами пикселей, а с тем, что угол θ вдоль оси Y был больше, чем угол ϕ вдоль оси X, и форма облака, образованного дрейфующими в газовом объеме чипа электронами, была ближе не к кругу, а к эллипсу.

Координата частицы по оси Z определяется по номеру временного интервала. Считая, что толщина (высота) газового объема чипа 10 мм, а полное время дрейфа электронов $\approx 200 \text{ нс}$, получаем, что за один 25 нс

интервал, образовавшееся в газе после пролета частицы электронное облако, смещается на $10 \cdot \frac{25}{200} = 1,25$ мм.

Регистрация прибывших на анод пикселя электронов начинается в 0 нс и заканчивается в 25 нс каждого интервала. Взяв в качестве временной отметки середину интервала (12,5 нс), мы получаем, что первому временному интервалу (0-25 нс) соответствует координата частицы $Z_1 = 1,25$ мм / 2 = 0,625 мм от поверхности пикселей чипа. Соответственно, $Z_2 = 1,875$ мм, $Z_3 = 3,125$ мм и т.д.

Таким образом, зарегистрировав в БНО X и БНО Y все 8 циклов дрейфа образованных частицей электронов, получаем 8 координат X в БНО X, 8 координат в БНО Y и 8 координат Z данной частицы по номеру цикла регистрации. Учитывая один цикл задержки при передаче информации в БНО, получаем, что после 9 циклов или через 225 нс в БНО зафиксирована полная трехмерная картина прохождения частицы через чип.

Опираясь на координаты частицы в плоскости XZ и плоскости YZ, определяется проекция траектории частицы на плоскости XZ и YZ, соответственно, как это показано на рисунке 41.

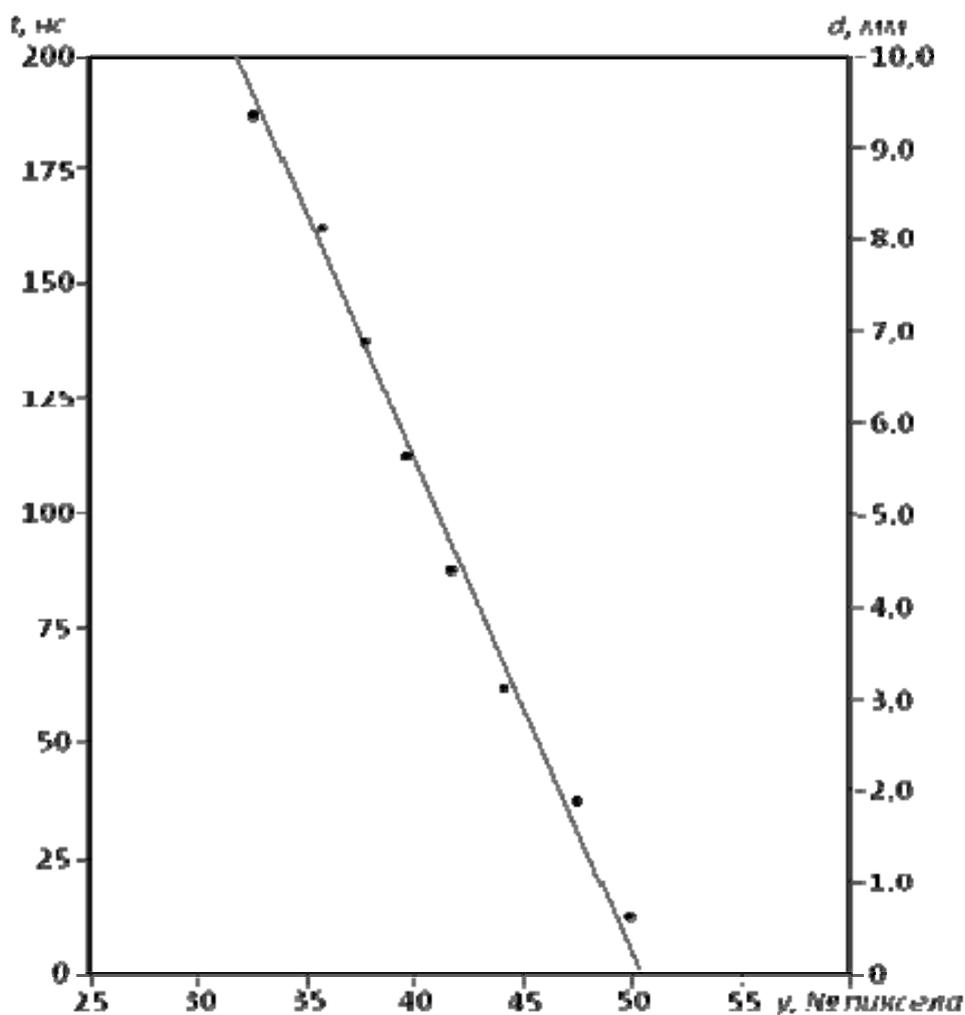


Рисунок 41 - Восстановленная проекция частицы на плоскость YZ

Отсюда определяются координаты $X_{вх}$ и $Y_{вх}$ входа частицы в чип и оба угла φ и θ , под которыми частица пересекла газовый объем чипа.

Для оценки эффективности применения данного алгоритма был проведен большой объем моделирования прохождения пионов с энергией 20 ГэВ под разными углами φ и θ .

На рисунках 42 и 43 приведены результаты восстановления угла в плоскости YZ ($\theta=20^\circ$) и координаты Y точки входа частицы в чип.

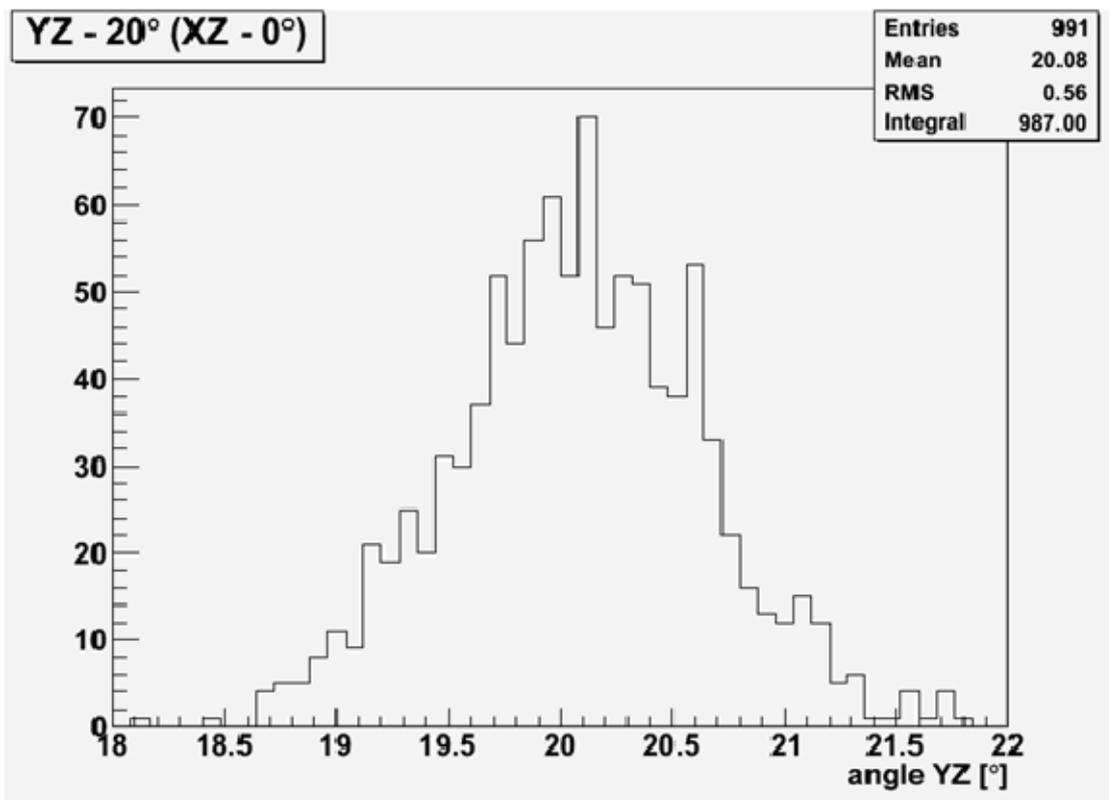


Рисунок 42 - Восстановленный угол, под которым частица пересекла чип вдоль длинной стороны пиксела (угол θ)

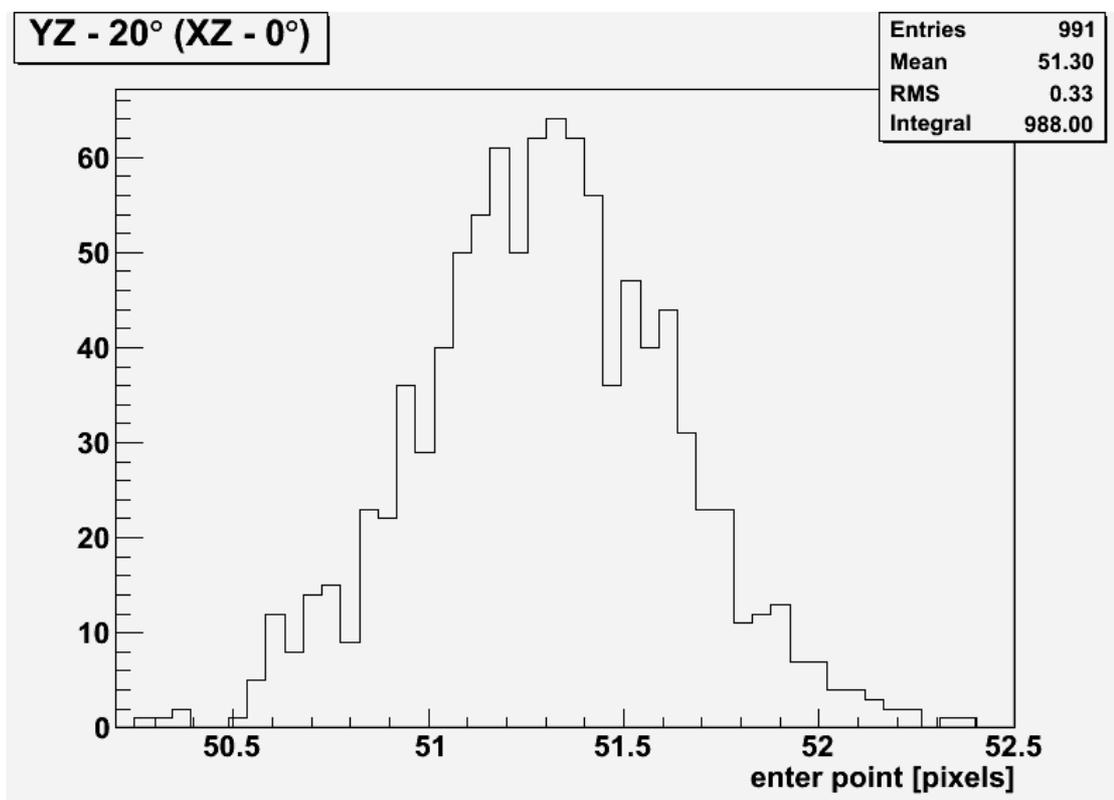


Рисунок 43 - Восстановленная координата Y точки входа частицы

Видно, что даже вдоль длинной стороны пикселя (200 мкм) RMS угла составляет $0,56^\circ$, а RMS точки входа 0,33 пикселя или 66 мкм.

На рисунке 44 приведены восстановленные значения угла в плоскости XZ (φ). Видно, что даже в наиболее сложном случае ($\varphi = 0$), $RMS = 0,44^\circ$.

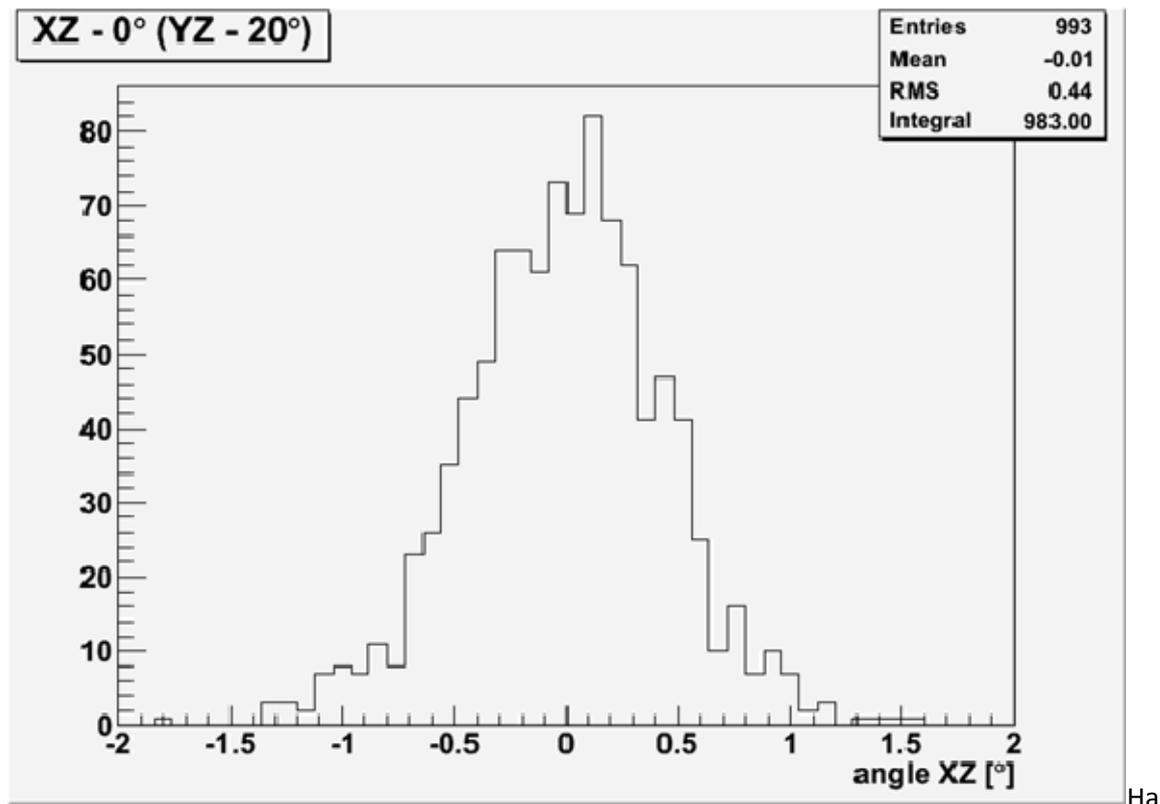


Рисунок 44 - Восстановленные значения угла в плоскости XZ (φ)

На рисунке 45 приведены восстановленные значения координаты X точки входа: $RMS = 0,37$ пикселя или 37 мкм.

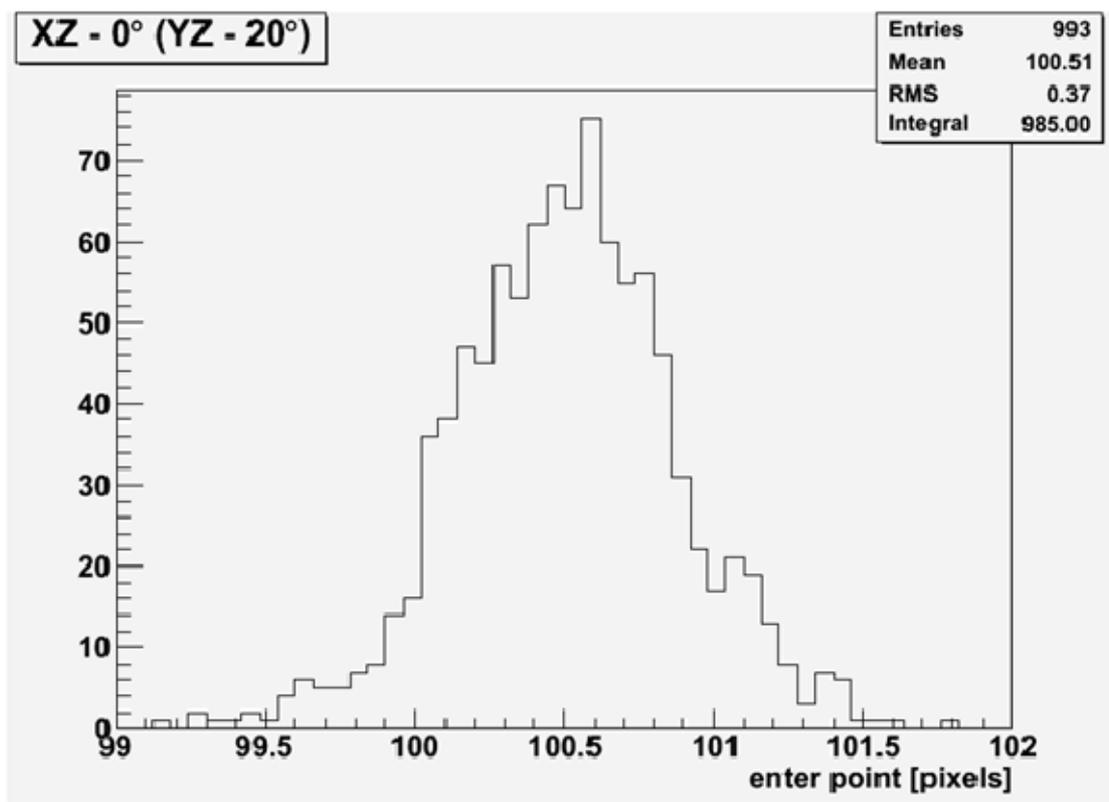


Рисунок 45 - Восстановленные значения координаты X точки входа частицы

7.6 Алгоритм передачи информации в центр формирования триггера первого уровня

Основной задачей является передача полной информации о прошедшей через данный чип частице в центр формирования триггера первого уровня.

Идеальным представляется вариант, когда вся информация будет передана по одной линии в режиме последовательного кодирования за минимальное время, не превышающее 250-300 нс.

Информация включает следующие данные о прошедшей частице:

- Номер чипа. Это позволит объединять чипы в группы и передавать данные от всех чипов группы по одной линии. Количество чипов в группе может меняться, в зависимости от общей загрузки системы. Учитывая, что количество чипов в системе газовых пикселей составит 20–40 тысяч, объединение их в группы позволит существенно сократить число линий связи.
- Время прихода частицы (номер цикла ускорителя) для синхронизации газо-пиксельных детекторов с другими трековыми системами и всей установкой в целом.
- Координаты точки входа частицы (X и Y) внутри данного чипа.

- Угол φ в плоскости XZ и угол θ в плоскости YZ, под которыми частица пересекла газовый объем чипа.

Поскольку время сбора информации в БНО жестко связано с временем дрейфа частицы в газовом объеме чипа (200 нс) и составляет 225 нс, система обработки данных в БНО и передача данных в центр формирования триггера первого уровня должны осуществляться на гораздо более высоких частотах, чем 40 МГц (частота работы ускорителя). Предположим, что рабочая частота БНО и системы передачи данных составляет 500 МГц, и оценим время, необходимое для передачи информации, исходя из ее максимального объема.

С учётом разрядности по позициям:

- номер чипа внутри группы – от 0 до 63 (6 бит),
- координата X точки входа – до 199.9 (11 бит),
- координата Y точки входа – до 99.9 (10 бит),
- угол φ траектории частицы – до 12.7 град (7 бит),
- угол θ траектории частицы – до 51.1 град (9 бит) и
- время прихода частицы (номер цикла) – до 255 (8 бит),

получаем, итого - 51 бит

При частоте 500 МГц время передачи не превысит 100 нс.

Очень важно отметить, что объединение чипов в группы возможно лишь при умеренных загрузках. Если в одной группе за 8 циклов сбора информации сработали 2 или 3 чипа, то объем передаваемой информации практически удвоится или утроится, а время передачи дойдет до 250 нс.

Описанный выше алгоритм показывает принципиальную возможность определения параметров трека и реализации трекового триггера первого уровня за время ~ 10 циклов БАК (~ 250 нс). В реальном случае с учетом компрессии информации для передачи данных и с увеличением загрузки это время может достигать ~ 1 мкс, что, тем не менее, находится в пределах требований к трековому триггеру первого уровня. Хотя современное состояние развития технологии газовых пиксельных детекторов требует значительных усилий и ресурсов для ее конверсии в реальный детектор, проведенная работа демонстрирует уникальные возможности таких

детекторов, при реализации которых открываются возможности их применения во многих смежных областях науки и техники.

8. Дрейфовые трубки

Решение сотрудничества АТЛАС о создании новых «малых колес» имеет следующее обоснование. Нынешняя конфигурация мюонного спектрометра АТЛАС была разработана и создана для работы с номинальной светимостью БАК $1 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Намеченное на 2018 год увеличение до $(2-3) \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ (модернизация, фаза 1) приведет к тому, что ныне используемые трековые мюонные камеры (MDT – камеры на основе дрейфовых трубок и CSC – Cathode Strip Chambers), расположенные вблизи пучка (так называемые EI – “End Cap Internal” станции) будут существенно перегружены увеличившимся фоном и потому не смогут обеспечить надежную регистрацию продуктов взаимодействия.

Новые «малые колеса» планируется установить в шахте АТЛАС, взамен существующих, во время большой остановки 2018г.

Существует три предложенных варианта обновления трековой системы «малых колес»: 1) дрейфовые трубки уменьшенного (15 мм) диаметра [9], 2) микроканальные камеры, разработанные в рамках проекта RD51 [10] и 3) вариант дрейфовых трубок с проволочными полеформирующими электродами, предложенный в [11,12] и развитый [13] в ГНЦ ИФВЭ.

Учитывая большой опыт в разработках и изготовлении прецизионных дрейфовых трубок (в частности, в составе детектора АТЛАС в настоящее время используется 76 000 дрейфовых трубок, изготовленных в ГНЦ ИФВЭ), существующую инфраструктуру и наличие подготовленного персонала, ГНЦ ИФВЭ сконцентрировал усилия на разработке и подготовке производства камер по вариантам (1) и (3), основанным на дрейфовых трубках.

Результаты разработки и исследования дрейфовых трубок для АТЛАС с проволочными полеформирующими электродами в ГНЦ ИФВЭ подробно описаны в отчетах за 2-й и 3-й кварталы настоящего контракта.

Актуальность разработки технологии дрейфовых трубок уменьшенного (15 мм) диаметра возросла в начале 2013г., когда сотрудничество АТЛАС приняло решение, в рамках «фаза-1 модернизации» изготовить и установить в составе детектора АТЛАС 14 новых трековых камер в секторах 12-14, в области «ног» детектора между мюонными камерами типа VMF. Детектирующими ячейками этих новых камер будут дрейфовые трубки

диаметром 15мм. Площадь каждой камеры – $0,815 \times 1,5 \text{ м}^2$. Камера состоит из двух мультислоев, в каждом из которых 4 слоя дрейфовых трубок, по 54 трубки в слое. Количество дрейфовых трубок в камере – 432 шт., а полное количество трубок для четырнадцати камер – 6048 шт.

Место изготовления дрейфовых трубок малого диаметра – ГНЦ ИФВЭ, место склейки трубок в камеры – институт Макса Планка (Германия).

С точки зрения работоспособности при увеличенных нагрузках, связанных с повышением светимости БАК, преимущество дрейфовых трубок уменьшенного (15 мм) диаметра по сравнению с ныне используемыми 30-мм дрейфовыми трубками складывается из следующих факторов:

- при той же рабочей газовой смеси (93% Ar + 7% CO₂) и допустимом газовом усилении ($2 \cdot 10^4$), максимальное время дрейфа для 15 мм дрейфовой трубки составляет ~ 200 нс, что в 3,5 раза меньше, чем для 30 мм трубки, у которой максимальное время дрейфа ~ 700 нс.;
- скорость счета дрейфовой трубки пропорциональна ее диаметру, поэтому для трубки вдвое меньшего диаметра имеет место выигрыш в 2 раза по скорости счета.

Эти два фактора гарантируют в 7 раз меньшую нагрузку (осцирапсу) дрейфовых трубок малого диаметра по сравнению со «стандартными», 30 мм трубками. Ухудшение характеристик дрейфовых трубок при больших нагрузках связано с образованием объемного заряда положительных ионов. Величина объемного заряда в 15-миллиметровых трубках в 8 раз меньше, по сравнению с 30-миллиметровыми. Ухудшение разрешения из-за флуктуаций объемного заряда, вызванного большими нагрузками, и связанного с объемным зарядом ослабления газового усиления, на порядок меньше для трубок малого диаметра.

Преимущества трубок малого диаметра для работы в условиях ожидаемых после реконструкции БАК возросших нагрузок очевидны. Расчеты, подтверждающие достаточность нагрузочной способности трубок малого диаметра после реконструкции БАК, приведены в [14]. В частности, показано, что в то время как для 30 мм трубок эффективность восстановления сегмента трека начинает ухудшаться при нагрузках 200 – 300 кГц, трубки диаметром 15мм сохраняют близкую к 100% эффективность, даже при нагрузках, превышающих 1000 кГц на трубку, ожидаемых при

светимости $5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ для трубок длиной 50см, расположенных в наиболее «горячих» местах мюонного спектрометра АТЛАС.

Конструкция дрейфовой трубки малого диаметра показана на рисунке 46, а фотография её, в собранном и разобранном виде – на рисунке 47.

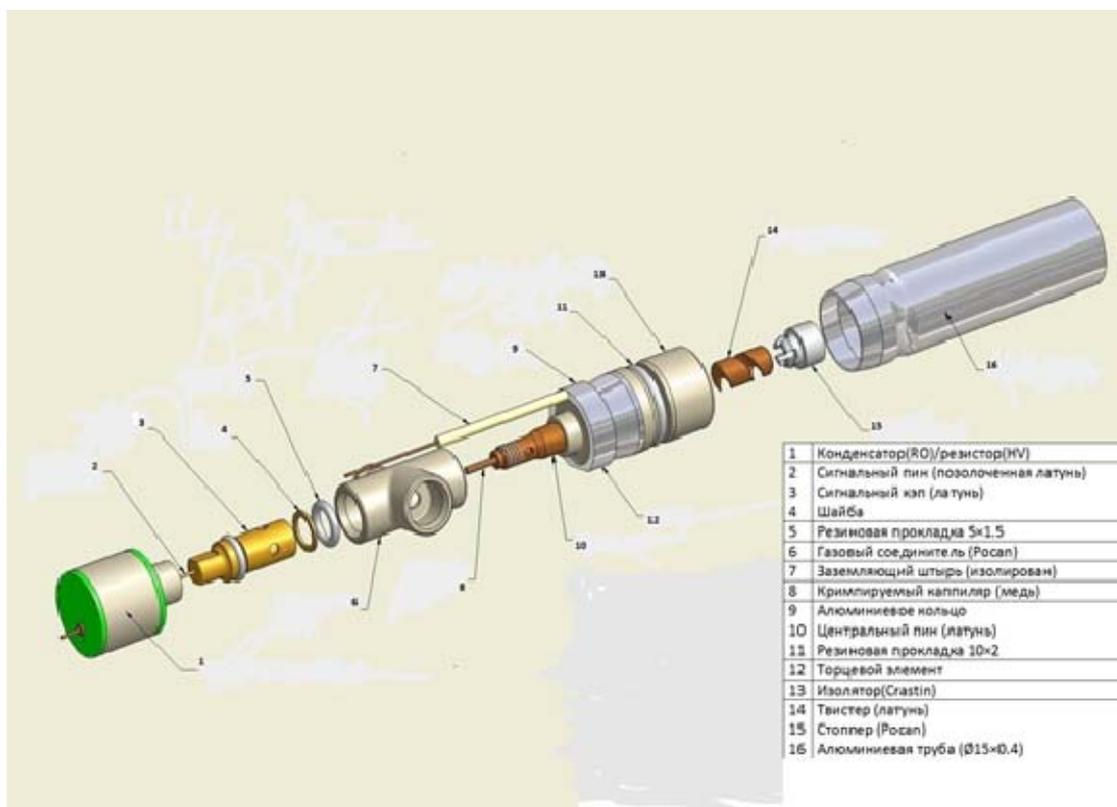


Рисунок 46 - Конструкция 15-мм дрейфовой трубки



Рисунок 47 - Фотография 15 мм трубки в сборе и ее деталей

Внешний вид стандартной (30 мм) и трубки малого диаметра (15 мм) для сравнения приведен на рисунке 48.



Рисунок 48 - Трубки диаметром 30 и 15 мм

Как и для технологии дрейфовых трубок с проволочными полеформирующими электродами, в ГНЦ ИФВЭ подготовлен и утвержден документ «Разовый технологический регламент производства прецизионных дрейфовых трубок малого (15 мм) диаметра» (см. Приложение Б). В этом документе подробно описана технология сборки данных трубок.

Непосредственно после сборки все дрейфовые трубки (как диаметром 30 мм с полеформирующими проволоками и без них, так и диаметром 15 мм) подвергаются тестовым испытаниям на герметичность и высоковольтную стабильность. Для этих испытаний в ГНЦ ИФВЭ созданы соответствующие стенды.

На рисунке 49 приведена принципиальная схема указанного стенда проверки на герметичность.

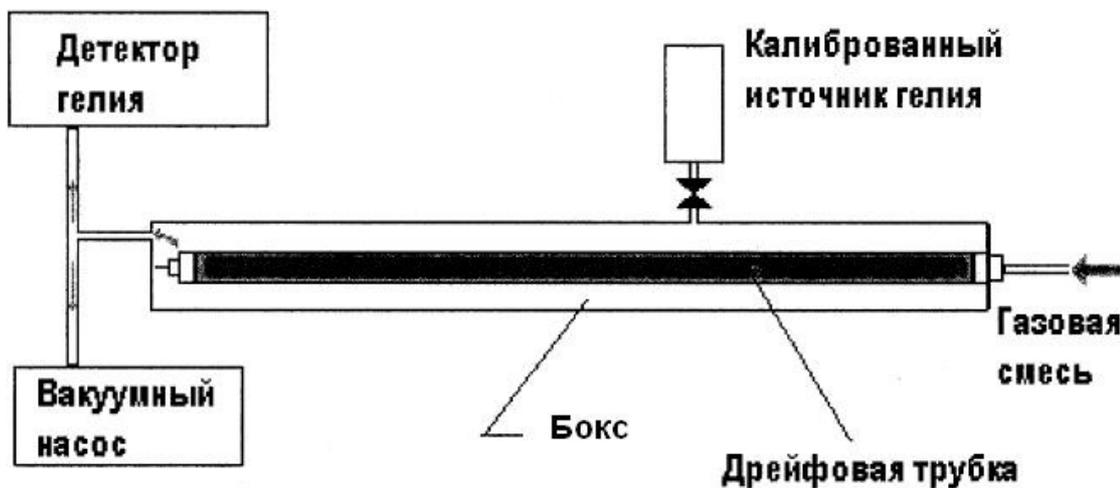


Рисунок 49 - Принципиальная схема стенда проверки герметичности детектора

Проверяемая дрейфовая трубка помещается внутри металлической трубы (бокс). После герметизации происходит откачка воздуха из объема бокса и проверяемой дрейфовой трубки. Затем дрейфовая трубка заполняется газовой смесью $N_2+10\%He$ (азот с примесью гелия) под давлением 3 атм, а объем бокса соединяется с гелиевым масс-спектрометром.

В случае наличия течи в любом месте дрейфовой трубки гелий из нее попадает в объем бокса и детектируется масс-спектрометром. В результате за короткое время измерений (3-4 минуты) удастся определить герметичность дрейфовой трубки на требуемом уровне $2 \cdot 10^{-8}$ бар·л/сек при точности измерения около 30%. Для ускорения проверки в установке имеются два независимых бокса.

Общий вид установки показан на рисунке 50.

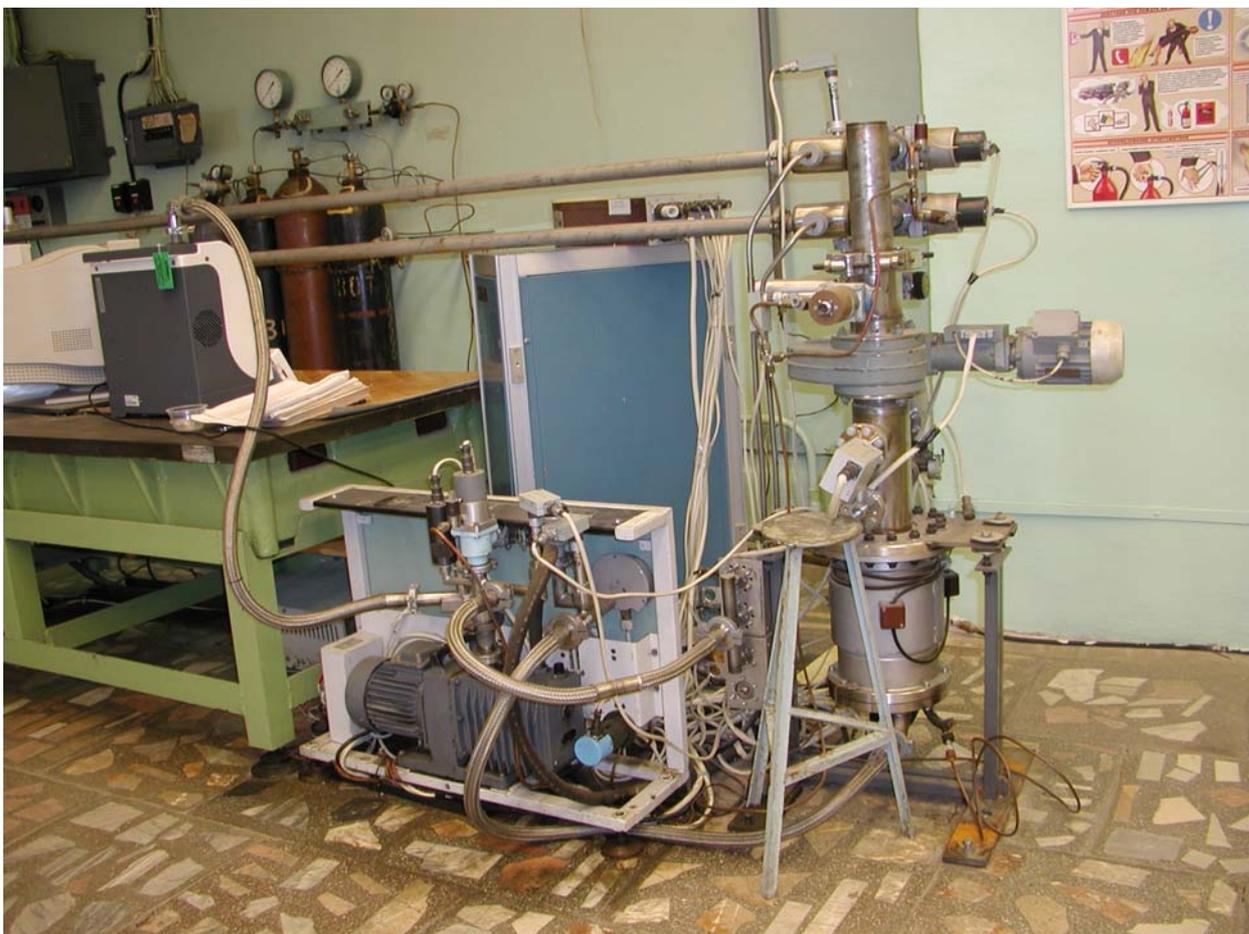


Рисунок 50 - Стенд для проверки дрейфовых трубок на герметичность

Цель высоковольтных испытаний дрейфовых трубок - выявление возможных дефектов проволоки (заусенцы, прилипшие пылинки и т.п.) и электрической изоляции торцевых элементов. Для этого была разработана специальная методика [15], основанная на измерении вольт-амперной характеристики дрейфовых трубок (зависимости тока от приложенного напряжения), заполненных обычным воздухом при нормальных условиях.

Измерения выполняются на специальном автоматизированном стенде, блок-схема которого показана на рисунке 51.

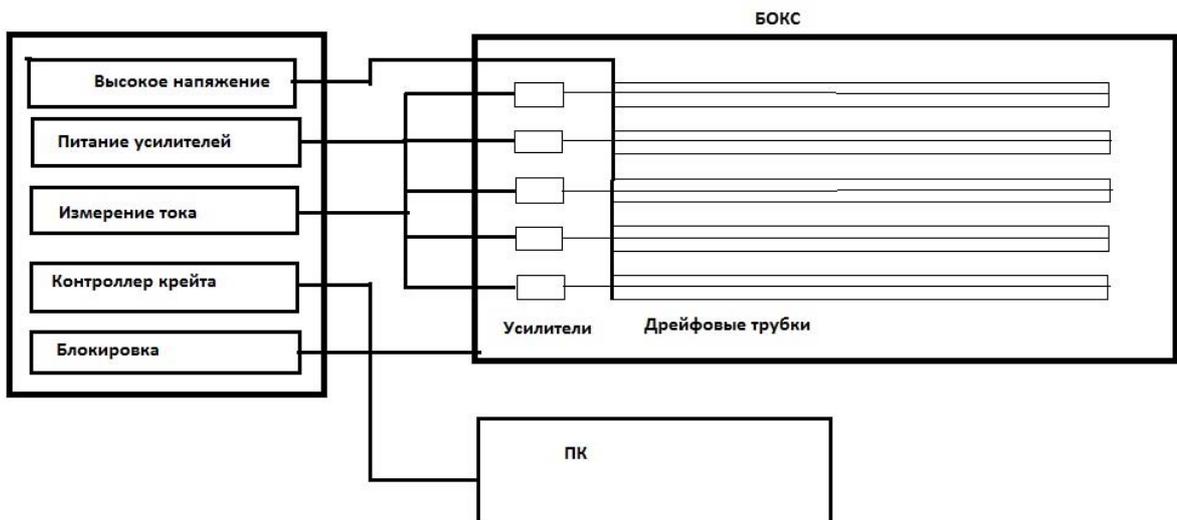


Рисунок 51 - Блок-схема стенда высоковольтных испытаний дрейфовых трубок

Стенд включает контейнер (бокс), куда заключаются испытуемые трубки. Контейнер служит электромагнитным экраном и защищает персонал от высокого напряжения, которое подается на корпуса дрейфовых трубок.

Фотография открытого контейнера с загруженными трубками показана на рисунке 52.

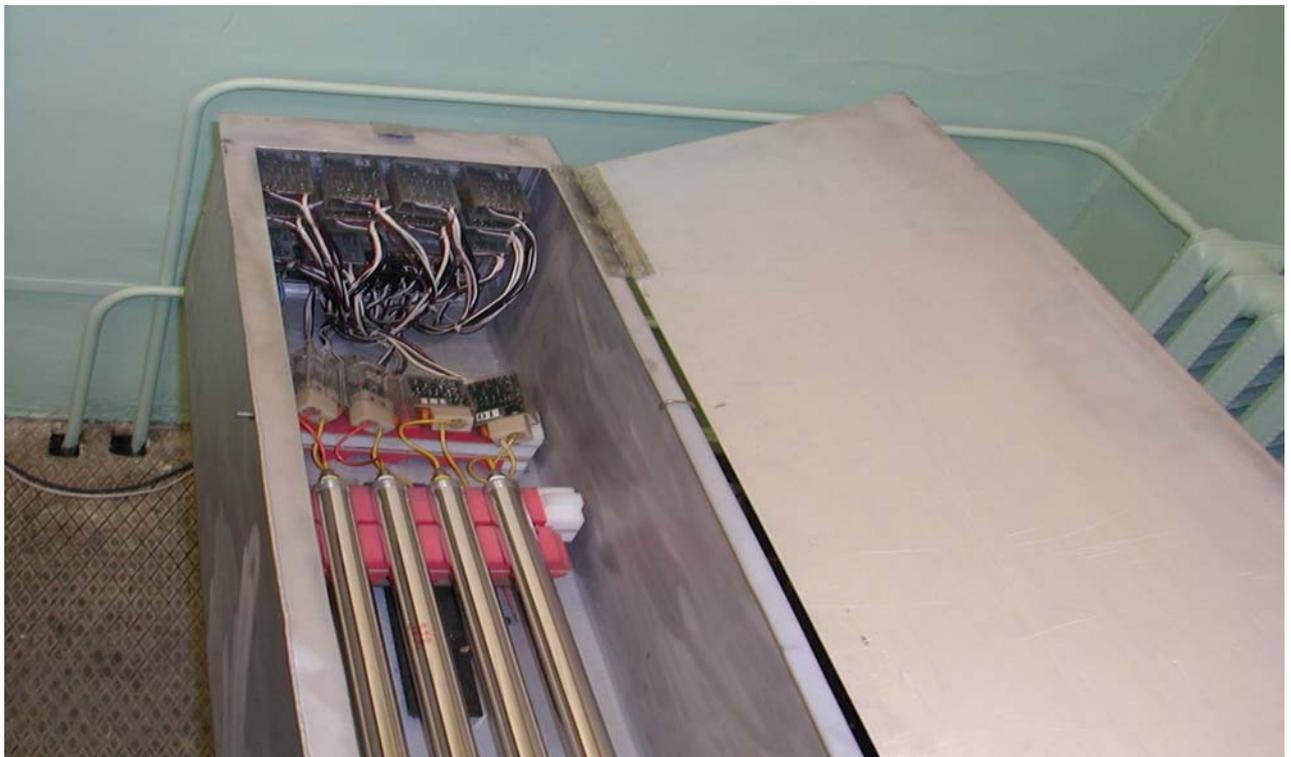


Рисунок 52 - Контейнер с дрейфовыми трубками на стенде высоковольтных испытаний

Ток сигнальных проводов усиливается и передается на многоканальный измеритель. Высокое напряжение подается от специального источника с автоматическим управлением. Блок управления высоковольтным

источником и измерители тока расположены в корзине «СУММА», связанным через контроллер K331 с персональным компьютером.

Предусмотрена блокировка питания высоковольтного источника в случае открытого контейнера. Процедура проверки полностью автоматизирована и включает два направления изменения высокого напряжения: нарастание и уменьшение. Между ними имеется пауза, когда трубка выдерживается около 2-х минут при максимальном напряжении.

Диапазон напряжения определяется автоматически в соответствии с током сигнальной проволоки трубки, который меняется в интервале от 0,2 нА до 2 мкА. Отбраковка трубок происходит также автоматически при обнаружении аномалий вольт-амперной характеристики, с учетом атмосферного давления и относительной влажности воздуха. Одновременно может испытываться до 5 трубок, полный цикл проверки занимает около 10 минут. Результаты проверки сохраняются в файле и могут импортироваться в базу данных.

9. Рекомендации по использованию результатов НИР для массового изготовления аппаратуры для исследований при повышенной светимости pp-столкновений на установке АТЛАС

Основные направления работ по модернизации установки АТЛАС для работы при повышенной светимости БАК связаны с радиационной стойкостью детекторов (определяется стойкостью применяемых материалов) и со способностью детекторов, системы сбора данных от них и системы триггеров отобрать и зарегистрировать повышенное (в единицу времени) количество событий и вторичных частиц.

9.1. Торцевые жидкоаргоновые калориметры

Для работы в условиях HL-LHC (т.е. с максимальной светимостью $7 \cdot 10^{34} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ и интегральной светимостью 3000 fb^{-1}) потребуются модернизация передних калориметров (FCAL). Существуют две возможности такой модернизации: создание нового детектора с уменьшенным зазором (sFCAL) либо установка небольшого калориметра (Mini-FCAL) перед существующим передним калориметром.

В первом случае существующие передние калориметры с зазором 260 мкм будут заменены на новые с той же структурой, но с зазором 100 мкм. Каждая ячейка FCAL состоит из медной трубки с внутренним диаметром 5,25 мм и медной проволоки диаметром 4,712 мм. Между трубкой и

проволокой помещён разделитель, представляющий собой намотанное по спирали изолирующее волокно (см. рисунок 53). При модернизации необходимо уменьшить внутренний диаметр трубки и увеличить толщину проволоки таким образом, чтобы середина зазора осталась на том же радиусе. Это нужно для сохранения оптимальной однородности калориметра.

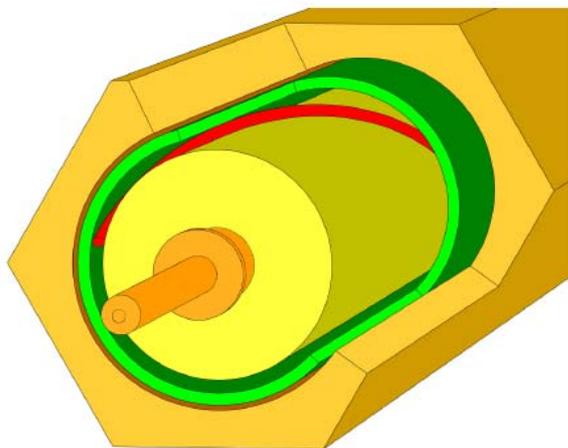


Рисунок 53 - Структура одной ячейки sFCAL

Также будет необходимо заменить суммирующие платы, уменьшив величину резисторов с 1 МОм до ~100 КОм, при этом средний ток в калориметре сохранится, а время дрейфа электронов уменьшится с 60 до 23 нс.

Во втором случае перед существующим передним калориметром устанавливается новый калориметр – Mini-FCAL. Такой калориметр с медным поглотителем толщиной в 18 радиационных длин уменьшит поток частиц в 2-3 раза и позволит существующему FCAL работать при светимости HL-LHC.

На рисунке 54 приведён отклик системы калориметров с Mini-FCAL на электрон с энергией 120 ГэВ в зависимости от псевдобыстроты. В настоящее время рассматриваются несколько вариантов Mini-FCAL, основными из которых являются жидкоаргоновый (со структурой, аналогичной sFCAL), либо газовый, заполненный ксеноном высокого давления.

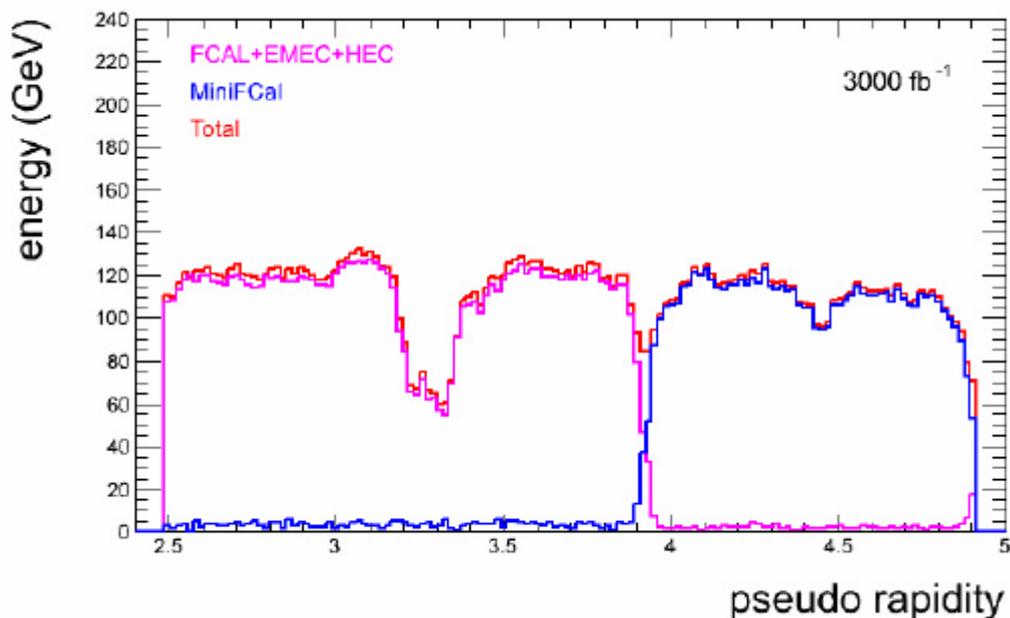


Рисунок 54 - Отклик системы калориметров с Mini-FCAL на электрон с энергией 120 ГэВ в зависимости от псевдобыстроты.

9.2. Материалы для придетекторной электроники

Измерения деградации тестовых образцов перспективных материалов для изготовления печатных плат после радиационного воздействия потоком нейтронов суммарной дозой $3 \cdot 10^{17}$ нейтронов/см², эквивалентной радиационному воздействию на элементы печатных плат калориметра mini-FCAL в течение десятилетнего срока эксплуатации ускорителя LHC в режиме сверхвысокой светимости.

Полученные результаты позволяют рекомендовать полиимид в качестве перспективного материала для изготовления печатных плат регистрирующих элементов одного из возможных вариантов калориметра mini-FCAL. Примененная измененная схема склейки слоев – средний слой полиимида с клеем был заменен на двойной слой препрега Arlon 37N, показала свою надежность и может быть рекомендована к применению при создании модуля «Прототип» mini-FCAL.

При этом необходимо отметить, что Arlon 85N и Rogers 4450B также могут быть использованы для этих целей, учитывая их электропрочностные характеристики.

Ламинаты G10 и FR4, в которых используются компаунды на основе эпоксидных смол, участвовавшие в тестировании, как весьма широко распространенные материалы электронной промышленности, показали

несколько худшие результаты с точки зрения деградации электропрочностных характеристик.

9.3. Применение других материалов и электроники для переднего электромагнитного калориметра

– РЕЕК – волокна, кабели, плата и разъемы могут быть рекомендованы к применению в калориметре, поскольку облучение не выявило никаких изменений их механических и электрических характеристик.

– Искусственные алмазы HE могут быть рекомендованы к использованию в качестве активной среды слоистого калориметра “mini-FCAL” из-за драматической (в 20 раз) деградации их основных характеристик.

9.4. FAST OR триггер

Существующие триггеры сильноионизирующих частиц в эксперименте ATLAS используют информацию с электромагнитного калориметра. Поэтому они не обеспечивают надежной регистрации сильновзаимодействующих частиц.

Выполненные разработки показывают, что можно на порядок увеличить эффективность триггирования сильноионизирующих частиц в эксперименте ATLAS, если использовать трековый FAST OR триггер на основе детектора TRT.

Рекомендуемая полномасштабная реализация триггера позволит проводить поиск сильноионизирующих частиц в условиях повышенной светимости работы ускорителя LHC.

10. Подготовка материалов для заявки на патент «Разработка детекторов с повышенной радиационной стойкостью»

Необходимость увеличения радиационной стойкости пластмассовых сцинтилляторов вряд ли требует особых комментариев, так как при работе в мощных радиационных полях на ядерно-физических объектах и на современных экспериментальных установках в области ядерной физики и физики высоких энергий часто возникает необходимость замены десятков и более тонн сцинтилляторов, что связано с накоплением в них радиационных дефектов.

Решение этой проблемы актуально и для работы сцинтилляционных детекторов в мощных радиационных полях на ядерно-физических объектах,

так как именно сцинтилляторы определяют срок службы детекторов в таких условиях. Изучение данной проблемы показывает, что она может быть решена, например, при смещении спектра сцинтилляционного излучения в красную и инфракрасную области спектра и использовании в качестве фотоприёмников кремниевых ФЭУ. Альтернативным решением является введение в стекловидную полимерную матрицу сцинтилляторов соединений поливалентных металлов, что, как известно, в случае минеральных стёкол позволило повысить радиационную стойкость на несколько порядков величины. Рассмотрим проблему более подробно.

При облучении твердотельных органических сцинтилляторов ионизирующим излучением изменяются (как правило, уменьшаются) как световыход от сцинтилляций, так и прозрачность среды к собственному излучению. Это связано с образованием при облучении активных радикалов, радиолизом полимерной матрицы и сцинтилляционных добавок, что приводит к появлению полос оптического поглощения наиболее интенсивных в ультрафиолетовой и синей областях спектра [16]. На рисунках 55 и 56 соответственно представлены зависимости выхода света из полистирольных сцинтилляторов различного типа от полученной дозы ионизирующего излучения (γ -кванты от радиоактивных источников ^{137}Cs) и спектры оптического поглощения до и после облучения [17].

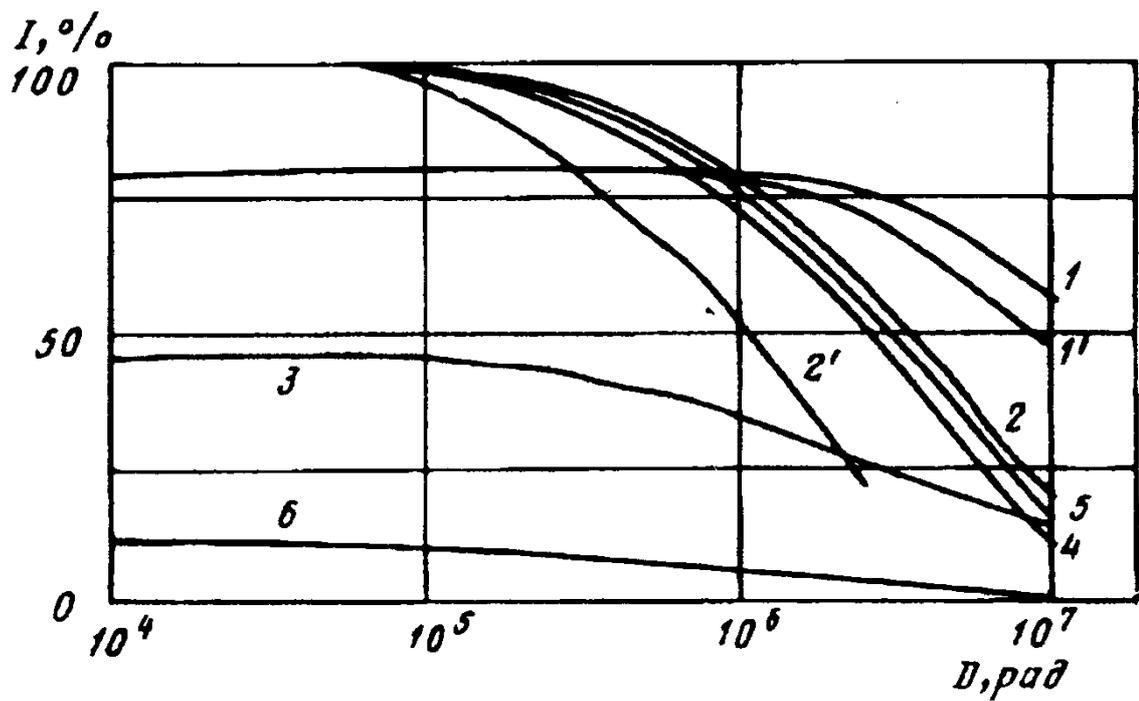


Рисунок 55 - Зависимости выхода света I от полученной дозы для различных полистирольных сцинтилляторов: 1, 1' – соответственно наилучшего и наихудшего образцов литьевых сцинтилляторов, 2, 2' - соответственно наилучшего и наихудшего образцов блочного полистирольного сцинтиллятора, 3 - блочный полистирольный сцинтиллятор с 3% PPO.

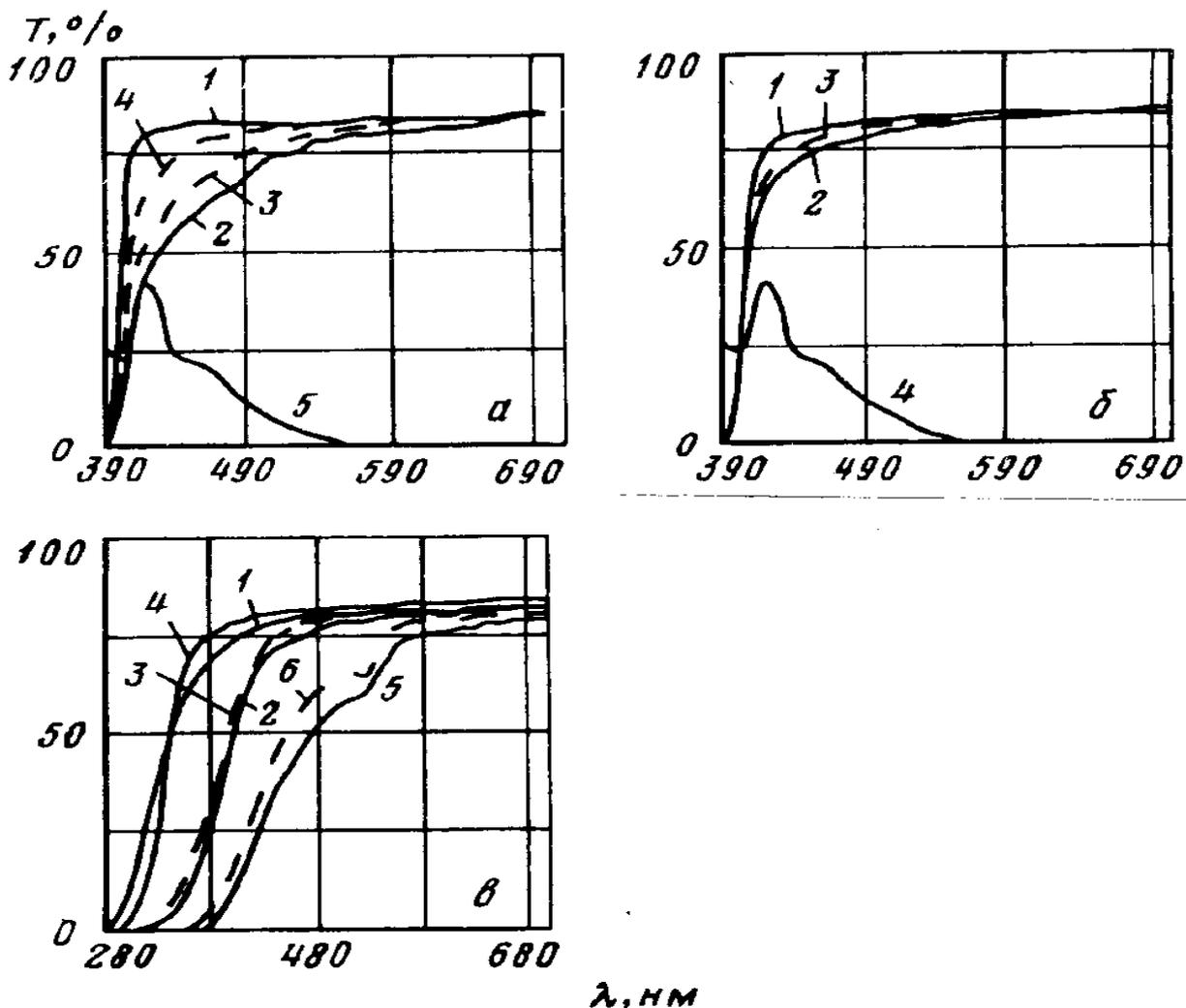


Рисунок 56 - Прозрачности сцинтилляционных пластин до и после облучения:
 а – блочный полистирольный сцинтиллятор (1 – до облучения, 2 – после 10^7 рад,
 3 – после 7 дней восстановления, 4 – после 40 дней восстановления) и спектр
 люминесценции РОРОР (5);

б – литьевой сцинтиллятор (1 – до облучения, 2 – после 10^7 рад, 3 – после 20 дней
 восстановления) и спектр люминесценции РОРОР (4);

в – чистого литьевого полистирола (1 – до облучения, 2 – после 10^7 рад,
 3 - после 20 дней восстановления) и блочного полистирола
 (4 – до облучения, 5 – после 10^7 рад, 6 - после 20 дней восстановления).

Сравнение кривых, приведённых на рисунках 56а и 56б, показывает, что спектры поглощения и световыход сцинтилляторов, изготовленных методом литья под давлением (из полистирольных гранул ПСМ-115) гораздо менее подвержены влиянию облучения, чем сцинтилляторы, изготовленные методом блочной полимеризацией. Причины этого, к сожалению, точно не известны, но могут быть связаны с существенно большим содержанием

остаточного мономера в блочных сцинтилляторах (несколько %) по сравнению с литьевыми (доли %) и более узким распределением молекулярных весов полимера в последнем случае.

Следует отметить, что сами сцинтилляционные добавки, из которых наиболее распространёнными являются р-терфенил (первичная добавка) и РОРОР (вторичная добавка), в виде кристаллов имеют радиационную стойкость в несколько раз меньшую чем, например, полистирольный сцинтиллятор с 2% р-терфенила и 0,05% РОРОР [18]. В то же время жидкие сцинтилляторы на основе толуола с указанными выше добавками имеют радиационную стойкость (доза, при которой световыход уменьшается на 10%) порядка 100 Мрад. Такое различие в уровнях радиационной стойкости, в зависимости от агрегатного состояния сцинтилляторов провидимому связано с тем, что дезактивация радиационных дефектов высоко возбуждённых состояний радикалов [19] и электронных ловушек [19] в твердотельном состоянии, особенно в кристаллической фазе, медленнее, чем в жидких растворах. Радиационная деградация приповерхностных слоёв пластмассовых сцинтилляторов усугубляется при облучении образцов в кислородной или воздушной средах, что связано с окислительными реакциями в присутствии образующихся при облучении радикалов.

Результаты изучения механизма образования радиационных дефектов в сцинтилляторах позволяют наметить и пути повышения их радиационной стойкости, а именно, повышение радиационной стойкости пластмассовых сцинтилляторов и спектросмещающих волокон за счёт смещения их спектров излучения и спектральной чувствительности фотоприёмников в длинноволновую область.

Смещение спектров излучения сцинтилляторов, спектросмещающих волокон и спектральной чувствительности фотоприёмников в длинноволновую область представляется достаточно очевидным способом повышения радиационной стойкости. Действительно, из рисунка 5б видно, что прозрачность сцинтилляторов к собственному излучению, с которой в значительной мере связана радиационная стойкость протяжённых сцинтилляторов, в том числе и при использовании светосбора с помощью WLS волокон, будет существенно увеличена при смещении спектра излучения в область длин волн $\lambda \geq 600\text{нм}$. Но и световыход сцинтилляторов со смещённым в длинноволновую область спектром излучения оказывается менее подверженным радиации, чем в случае обычных сцинтилляторов с

максимумом излучения в области 420-430 нм. В таблице 5 приведены полученные в работе [17] результаты измерения световыхода Φ полистирольных сцинтилляторов с различными сцинтилляционными добавками до (Φ_0) и после (облучения Φ/Φ_0).

Таблица 5. Световыход полистирольных сцинтилляторов.

| № п/п | Сцинтиллятор | Φ_0 , % | Φ/Φ_0 , % | | |
|----------|---|--------------|---------------------|-----------|---------------|
| | | | $3.4 \cdot 10^3$ Gy | 10^5 Gy | После 23 дней |
| 1 | 2% pTp + 0.025% POPOP | 100 | 48 | 23 | 52 |
| 2 | NE-110* | 126 | 63 | 48 | 59 |
| 3 | 5% Nph + 2% pTp + 0.025% POPOP | 96 | 63 | 36 | 51 |
| 4 | 1.5% pTp + 0.05% ЗНФ | 60 | 75 | 55 | 66 |
| 5 | 10% PPO + 0.05% X25 | 80 | 72 | 43 | 63 |
| 6 | 2% PPO + 0.5% POPOP + 0.05 X25 | 92 | 68 | 40 | 60 |
| 7 | 10% PPO + 0.5% POPOP + 0.05 X25 | 92 | 74 | 51 | 72 |
| 8 | 2% 1EN + 1.5% pTp + 0.1% X25 | 65 | 73 | 50 | 55 |
| 9 | 10% PPO + 0.05% X31 | 79 | 65 | 49 | 66 |
| 0 | 10% PPO + 0.1% X25 + 0.05% ЗНФ | 88 | 68 | 49 | 67 |
| 11 | 2% pTp + 0.02% NB1 | 98 | 68 | 36 | 53 |
| 12 | 0.25% D12 | 16 | 89 | 50 | 63 |
| 13 | 1.5% pTp + 0.025% TPB | 89 | 50 | 36 | 45 |
| 14 | 1.5% pTp + 0.025% D36 | 63 | 65 | 38 | 52 |
| 15 | 5% 1EN + 0.025% POPOP | 68 | 65 | 40 | 45 |
| 16 | 10% PPO + 0.05% ЗНФ | 52 | 58 | 36 | 57 |
| 17 | 2% pTp + 0.05% POPOP + 0.02% K-27 | 76 | 66 | 56 | 74 |
| 18 | 20% 1MN + 2% pTp + 0.05% POPOP + 0.02% K-27 | 46 | 102 | 88 | 85 |
| 19 | 20% Dbph + 2% pTp + 0.05% POPOP | 25÷35 | 98 | 81 | 82 |
| 20 | 20% 1MN + 2% pTp + 0.05% POPOP | 85÷95 | 102 | 79 | 78 |
| 21 | 20% IN + 2% pTp + 0.05% POPOP | 90 | 102 | 77 | 76 |

* Изготовлено Nuclear Enterprise, Англия.

Световыход (Φ) сцинтиллятора № 17 со смещённым в длинноволновую область спектром излучения ($\lambda_{\max}=520\text{нм}$) составляет при дозе в 10 Мрад 0,76 от исходной величины (Φ_0), в то время как световыход обычного сцинтиллятора (№ 1) уменьшается до 0,23. Исходный световыход сцинтиллятора № 17 по измерениям авторов составляет 0,76 от световыхода сцинтиллятора №1, что в значительной мере связано со спектральной чувствительностью ФЭУ-110, использованного в измерениях.

Приведённые выше данные показывают, что с точки зрения увеличения радиационной стойкости сцинтилляторов целесообразно использовать сцинтилляторы, изготовленные из полистирольных гранул. Это в свою

очередь приводит к необходимости использования для светосбора спектросмещающих (WLS) и транспортных волокон, в том числе и из-за низкой прозрачности таких сцинтилляторов. Смещение спектра излучения сцинтилляторов в длинноволновую область, например, в область с $\lambda_{\max}=600\text{нм}-650\text{нм}$ требует использования WLS волокон со спектром люминесценции, соответствующим $\lambda_{\max}=700\text{нм}-750\text{нм}$. Как видно из рисунка 56а и 56в, в районе 700нм прозрачность полистирольных сцинтилляторов и чистого полистирола с точностью до погрешностей измерений не изменяется до доз облучения в 10 Мрад. Можно ожидать, что и на длину затухания собственного излучения в полистирольных WLS волокнах влияние таких доз облучения будет минимальным.

В большинстве детекторов АТЛАСа сцинтилляционное излучение собирается как раз с помощью WLS волокон и смещение спектров в красную или инфракрасную области потребует использования фотодетекторов с высокой чувствительностью в указанных областях спектра. Доступным по стоимости фотодетекторами в этой области являются кремниевые фотоумножители (SiPMT или MPP), которые благодаря своей миниатюрности удачно вписываются в конфигурации современных сцинтилляционных детекторов с WLS сбором излучения.

Квантовая чувствительность этих фотоприёмников практически постоянна в диапазоне длин волн от 600 нм до 800 нм, то есть во всей нужной области.

Не менее важным является и большой опыт, накопленный в ИФВЭ в области разработок и производства сцинтилляторов различных типов, сцинтилляционных и спектросмещающих волокон, а также многолетнее успешное сотрудничество с разработчиками сцинтилляционных добавок и добавок, повышающих радиационную стойкость.

Это Ростовский Государственный Университет, Нижегородский Государственный Университет, ООО Синтез-2000, которые готовы к участию в данном проекте.

10.1. Подготовка прототипов полноразмерных сцинтилляторов для установки АТЛАС

С целью оперативного получения экспериментальных образцов радиационно-стойких сцинтилляторов и отработки технологии производства полноразмерных сцинтилляторов для установки Атлас были изготовлены первые образцы “плавленных” сцинтилляторов метровых размеров на основе новой технологии плавления смеси полистирольных гранул со

сцинтилляционными добавками в формах с зеркальными стенками (см. отчёт по 3 этапу контракта) с размерами $20 \times 500 \times 500 \text{ мм}^3$, $50 \times 200 \times 1000 \text{ мм}^3$ и $50 \times 100 \times 1800 \text{ мм}^3$.

Измерения световыхода “плавленных” сцинтилляторов были проведены при использовании образцов размерами $50 \times 200 \times 1800 \text{ мм}^3$ с уложенными WLS волокнами во фрезерованные в образцах канавки. Измеренное количество фотоэлектронов при использовании в качестве фотодетектора ФЭУ 115М составляло около 15.

10.2. Испытания кремниевых ФЭУ (SiPM) для радиационно-стойких сцинтилляционных детекторов установки АТЛАС

С целью разработки сцинтилляционных детекторов с высокой радиационной стойкостью были выполнены испытания кремниевых ФЭУ, как отечественных (СРТА), так и производства фирмы Намаматсу с размерами чувствительной области $3 \times 3 \text{ мм}^2$.

На рисунках 57 и 58 приведены амплитудные спектры указанных ФЭУ при малой импульсной засветке.

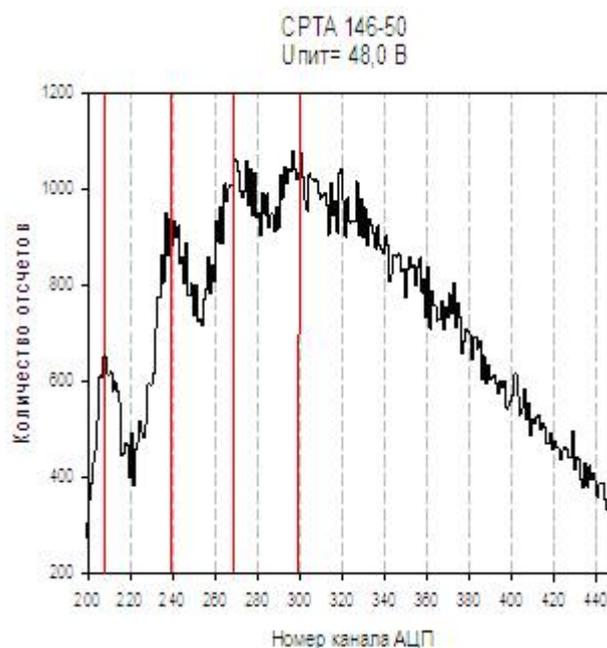


Рисунок 57 - Амплитудный спектр кремниевых ФЭУ

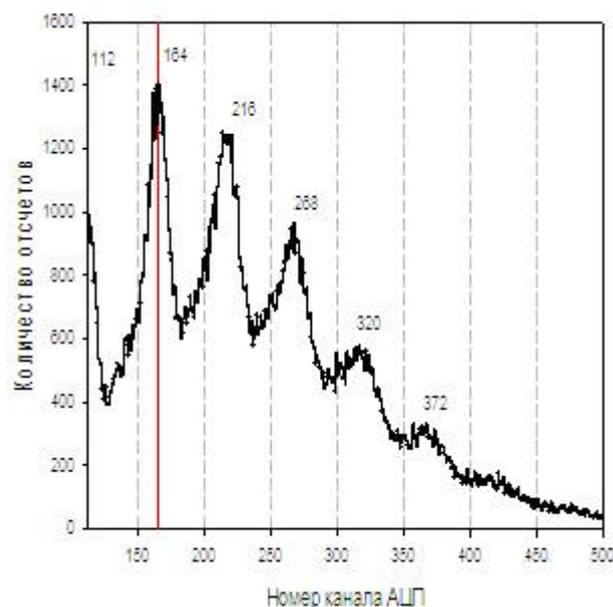


Рисунок 58 - Амплитудный спектр лавинного фотодиода НАМАМАТСУ S10362-33-100С

По степени разделения пиков, соответствующих разному количеству фотоэлектронов можно считать, что фотоприёмник Хамаматсу несколько превосходит СРТА прибор. На рисунке 59 показан суммарный амплитудный спектр двух кремниевых ФЭУ (Хамаматсу), “просматривающих“ с противоположных сторон сцинтилляционную пластину $10 \times 60 \times 2000 \text{ мм}^3$ с уложенными в пазы тремя WLS волокнами диаметром 3 мм (крайняя область пластины).

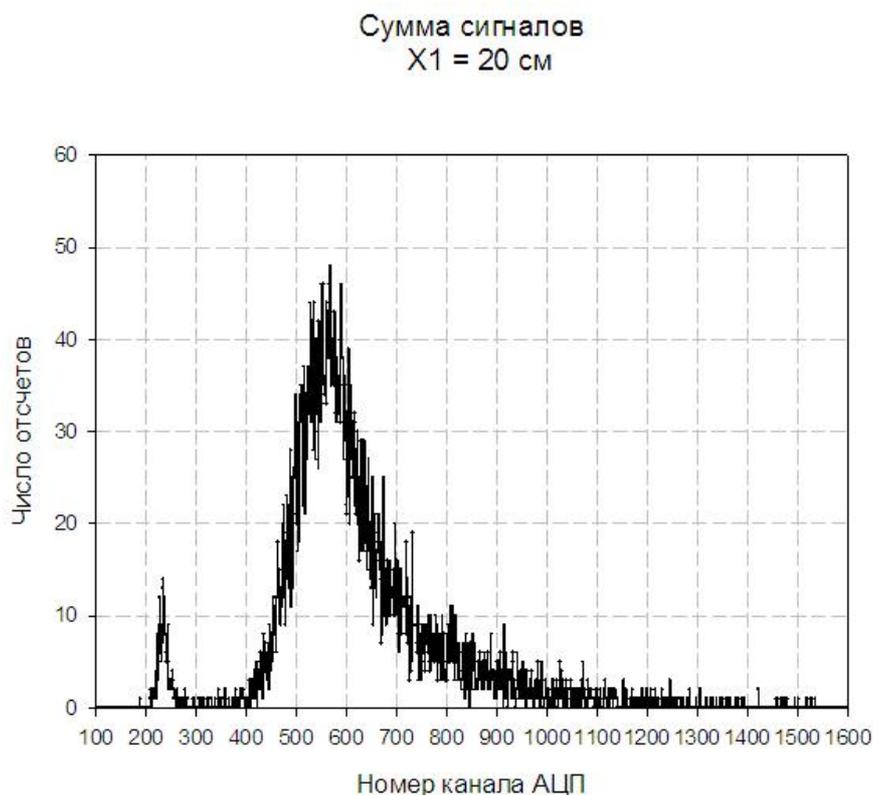


Рисунок 59 - Суммарный спектр кремниевых ФЭУ.

10.3. О возможности повышения радиационной стойкости пластмассовых сцинтилляторов при их допировании металлоорганическими соединениями поливалентных металлов

Ещё одной возможностью создания радиационно-стойких пластмассовых сцинтилляторов и WLS волокон, правда, не столь очевидной, как описанная в предыдущем разделе, является введение в полимерную матрицу металлоорганических солей поливалентных металлов. Собственно речь идёт о попытке значительного повышения радиационной стойкости стекловидных органических полимерных матриц по аналогии с известным крайне эффективным способом изготовления радиационно-стойких минеральных стёкол. Для производства подобных стёкол в шихту вводятся пары солей поливалентных металлов с разной валентностью таких, как церий, олово или висмут в количестве нескольких % по весу. Механизм повышения радиационной стойкости стёкол связан с устранением радиационных дефектов (центров окраски) в присутствии ионов металлов, легко меняющих валентность. Радиационная стойкость стёкол с оптимальной концентрацией солей поливалентных металлов (например, солей церия, как показано в работе [21] превышает десятки Мрад в то время как у обычных стёкол радиационная стойкость не превышает десятков Крад [21]. Основной проблемой, задерживающей проведение синтеза органических стёкол (полистирола), содержащих соединения поливалентных металлов, являлось отсутствие пар металлоорганических соединений с различной валентностью металла, растворимых в неполярных органических растворителях.

Металлоорганические соединения церия неизвестны, в случае олова известно соединение с четырёхвалентным оловом (тетрафенилолово), но специально синтезированное двухвалентное соединение (дифенилолово) оказалось нестабильным и сильно окрашенным. И только в последнее время нашим коллегам из Нижегородского Государственного Университета удалось синтезировать первую пару соединений поливалентного металла, что позволило начать работы в указанном направлении.

В итоге были проведены 4 цикла полимеризации образцов сцинтилляторов на основе полистирола (2% паратерфенила, 0,05% РОРО) с добавками трифенилсурьмы и диакрилат трифенилсурьмы в количестве 3% по весу каждой добавки. В ходе тщательного подбора температурного режима термической полимеризации впервые удалось получить два оптически совершенных образца сцинтилляторов, содержащих два

металлоорганических соединения сурьмы с валентностью 3 и 5. Для сравнения радиационной стойкости полученных образцов со стойкостью полимеризованных сцинтилляторов и изготовленных методом литья под давлением были также изготовлены идентичные по размерам образцы полимеризованных и литьевых сцинтилляторов.

Таким образом, открывается возможность детального изучения сравнительных характеристик сцинтилляторов, содержащих соединения поливалентных металлов и, главным образом, радиационной стойкости.

Заявка «Сцинтилляционный радиационно стойкий детектор» подготовлена к отправке в Роспатент.

11. Разработка стендов испытаний детектирующих элементов трековых детекторов, выбранных для комплектации новых «малых колес» мюонного спектрометра АТЛАС

11.1. Рентгеновский сканнер широкого назначения для тестирования камер NSW

Контроль качества производства детекторов является критической составляющей процесса производства, от которой зависит их дальнейшая работа и судьба эксперимента в целом. Оба типа камер Малого Мюонного Кольца ATLAS состоят из 8 слоёв, и в процессе сборки камеры склеиваются. Поэтому внутренние компоненты детекторов достаточно быстро становятся недоступными, и, следовательно, качественная диагностика проблем на самых ранних стадиях должна быть неотъемлемой частью производственного процесса.

Основываясь на опыте проверки качества детекторов, которые работают в эксперименте ATLAS, предлагается в качестве проверки конечной работоспособности и надежности детекторов их тестирование в условиях облучения внешним источником. Использование радиоактивного источника позволит протестировать полную функциональность камер при высоких нагрузках и выявить возможные дефекты на самой ранней стадии, когда еще возможны коррекции процесса изготовления детекторов. Система контроля схематически изображена на рисунке 60.

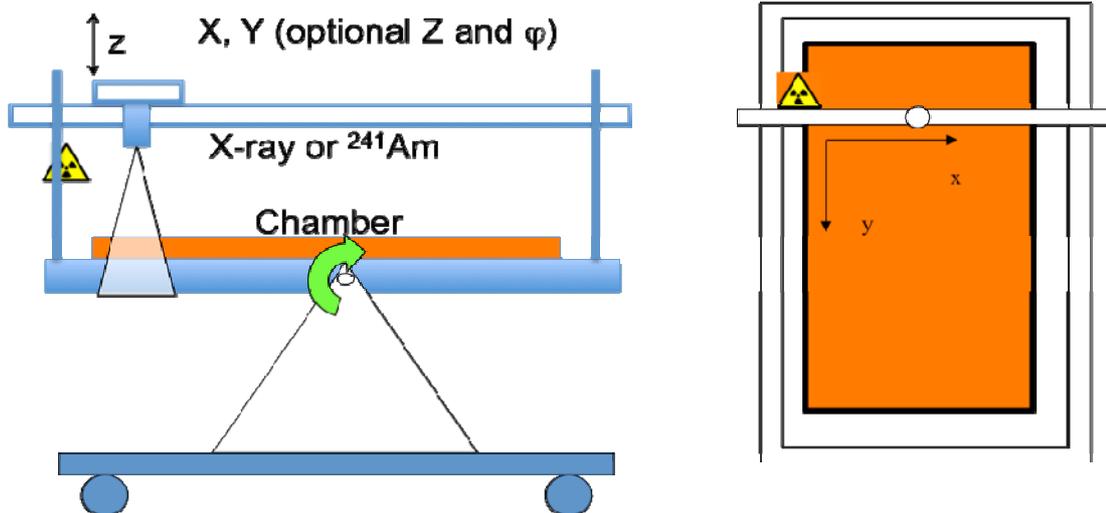


Рисунок 60 - Эскиз станда тестирования камер NSW с использованием радиоактивного источника (рентгеновский сканер)

Детектор с шириной 1 м и длиной 2 м фиксируется на плоском столе, который может устанавливаться как вертикально, так и горизонтально (см. рисунок 60). На столе также располагается рама с подвижной кареткой, в которой фиксируется рентгеновская трубка или источник радиоактивного излучения. Каретка перемещается с помощью роботизированной системы управления шаговыми моторами.

При необходимости каретка может быть дооборудована моторами, позволяющими перемещать каретку как в строго перпендикулярном к поверхности детектора направлении (вдоль оси Z), так и изменять угол наклона каретки. Если в каретке закреплен коллимированный источник гамма-излучения, то движение каретки вдоль оси Z позволяет изменять размер зоны облучения, а поворотом источника, изменяется угол наклона пучка и, следовательно, обеспечивается возможность облучать камеру под разными углами наклона.

Процедура проверки камер осуществляется следующим образом:

- роботизированная система доставляет радиоактивный источник в нужную точку, в соответствии со специально разработанной программой;
- когда каретка достигает заданной позиции на поверхности, компьютер записывает положение источника, величину тока, текущего через каждый слой детектора, и другие параметры;
- программа анализа данных работает параллельно;

- процедура осуществляется в полностью автоматическом режиме;
- результаты анализа представляются в виде графиков и таблиц, и записываются в специальную базу данных по завершении программы;
- в случае если к детектору присоединена электроника, то анализируются корреляция данных и положения пучка.

В настоящее время происходит уточнение спецификации для станций контроля с рабочими группами NSW, однако уже сейчас можно сказать какие задачи, можно решать с помощью этой системы:

- проверка равномерности газового усиления по всей площади детектора;
- выявление «горячих точек», в том числе из-за отслоения напыления для sTGC или дефекты сетки Micromegas;
- обнаружение зон нестабильности высокого напряжения;
- контроль токов утечки при облучении;
- облучение наклонными пучками коллимированных источников;
- проверка точности изготовления и позиционирования камер.

11.2. Предварительные испытания возможностей проверки точностей и позиционирования камер

Предварительная работа по исследованию возможностей применения универсального стенда была проведена на испытательном оборудовании, оснащённом рентгеновской трубкой Mini-X, общий вид панели управления которой представлен на рисунке 61.

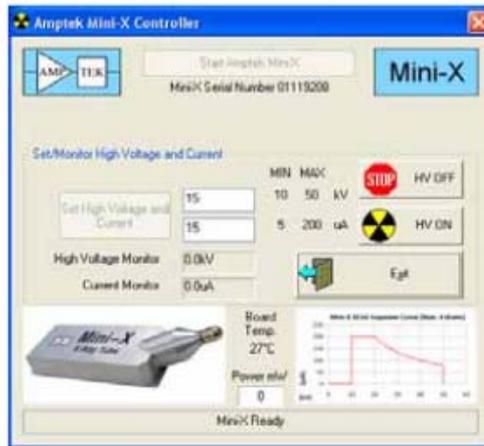


Рисунок 61 - Общий вид панели управления рентгеновской трубкой Mini-X

Трубка способна облучать пучком фотонов с энергией до 50 кэВ и имеет интерфейс управления USB. Для тестирования камеры Micromegas были закреплены на подвижном столе, который способен менять положение камер с точностью около 2 мкм. Фотография тестового стенда показана на рисунке 62.

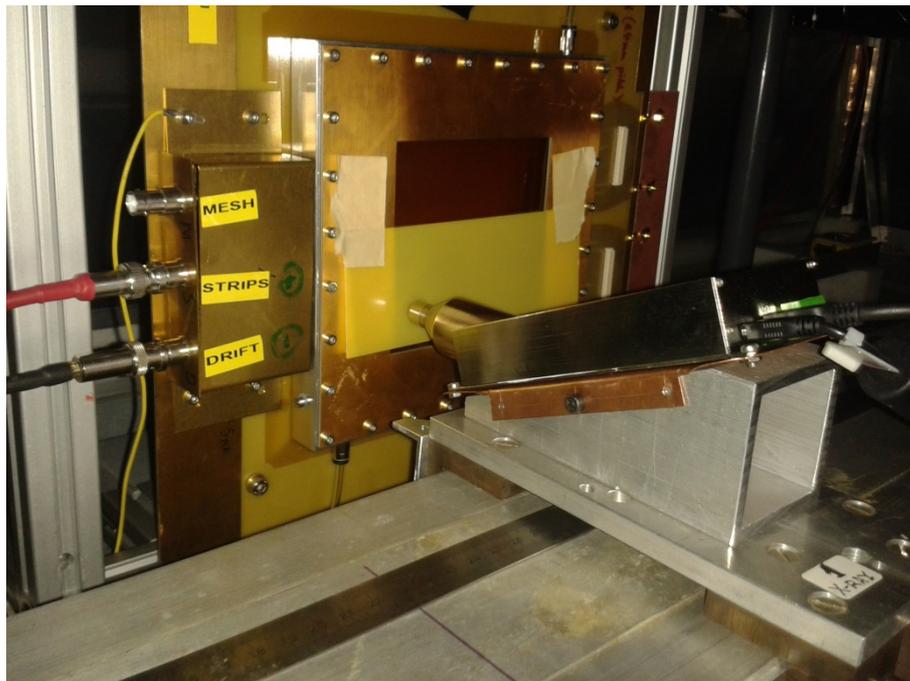


Рисунок 62 - Тестовый стенд для испытаний камер Micromegas с помощью рентгеновской трубки.

Прототип камер Micromegas имела считывающие электроды шириной 0,3 мм и расположенные в вертикальном направлении с шагом 0,4 мм. Сопротивление резистивного слоя было 20 МОм/см^2 . Камера имела активную рабочую зону $10 \times 10 \text{ см}^2$ и продувалась стандартным газом 93% Ar + 7% CO₂.

Напряжение на дрейфовом промежутке было установлено 510 В, а на аноде 300 В. Газовое усиление составляло менее 10^4 . Прежде всего, исследовалась стабильность тока камеры во времени в зависимости от интенсивности облучения рентгеновской трубки (см. рисунок 63).

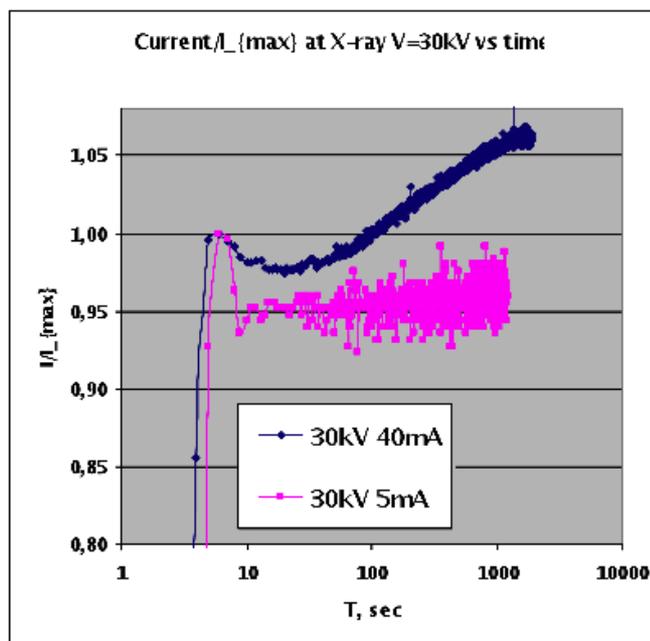


Рисунок 63 - Зависимость тока в камере Micromegas от времени для различных токов в рентгеновской трубке

Как видно из этого рисунка, при токе в трубке 5 мА после начального периода нестабильности связанной с процессами перезарядки, ток в камере выходит на постоянный режим работы в течение нескольких секунд.

Важным моментом с точки зрения безопасности работ стала необходимость убедиться в том, что при умеренной энергии рентгеновского излучения и его интенсивности, ток в последних слоях камер достаточно высок для выполнения поставленных задач. На рисунках 64 и 65 показан ток в четырех слоях камер при облучении рентгеновской трубкой при напряжении 30 и 40 кВ соответственно.

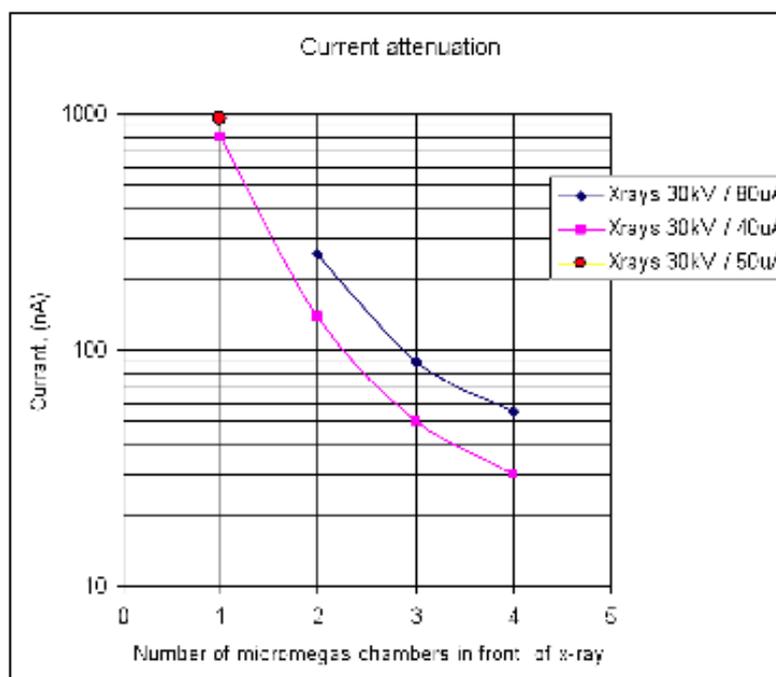


Рисунок 64 - Проверка интенсивности пучка от числа камер при напряжении на рентгеновской трубке 30 кВ

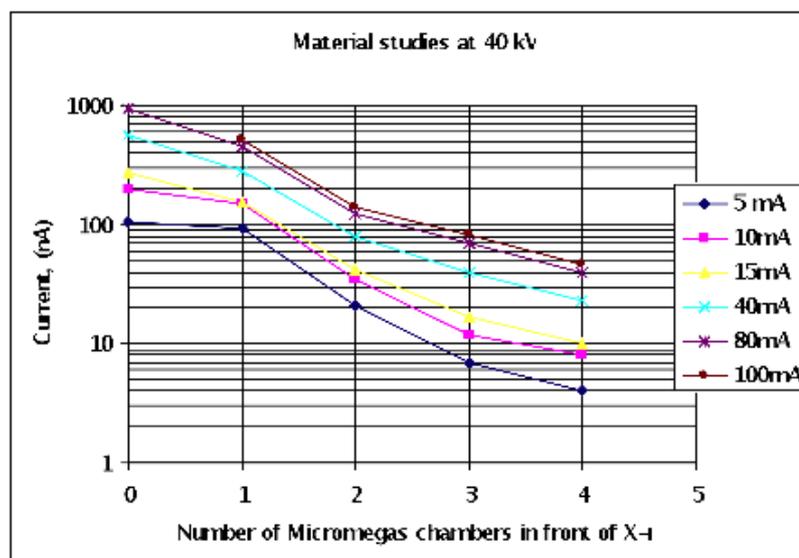


Рисунок 65 - Проверка интенсивности пучка от числа камер при напряжении на рентгеновской трубке 40 кВ

Как видно из этих рисунков, хотя ток в последней камере падает больше, чем в 10 раз, можно добиться того, чтобы он был выше 10 нА, что обеспечивает достаточную точность измерения его однородности.

Однородность газового усиления (стабильность во времени) составила 0,5%. В качестве примера был сделан скан тестовой камеры и показана стабильность во времени результатов измерения, как видно из рисунка 66.

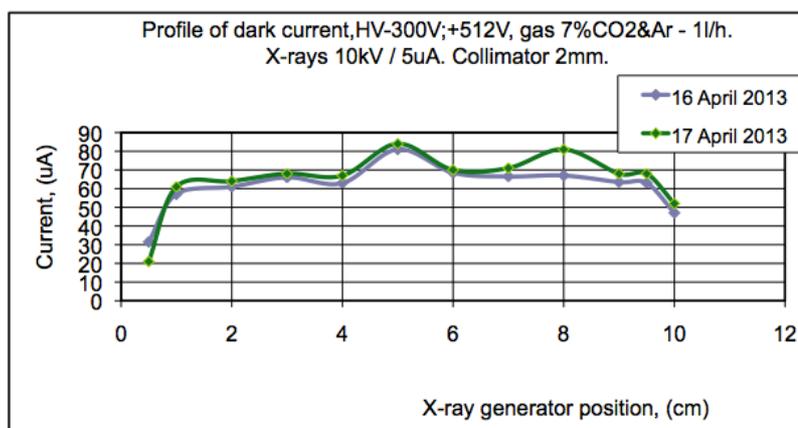


Рисунок 66 - Проверка однородности газового усиления камеры Micromegas и стабильности измерений во времени

Для проверки точностей изготовления камер с помощью коллимированного пучка рентгеновского излучения был предложен метод взвешивания счета со стрипов. Был изготовлен и собран стенд, содержащий тестовую камеру, установленную на микрометрическом столе. Пучок рентгеновского излучения был коллимирован как показано на рисунке 67. Коллиматор имел ширину 0,2 мм.

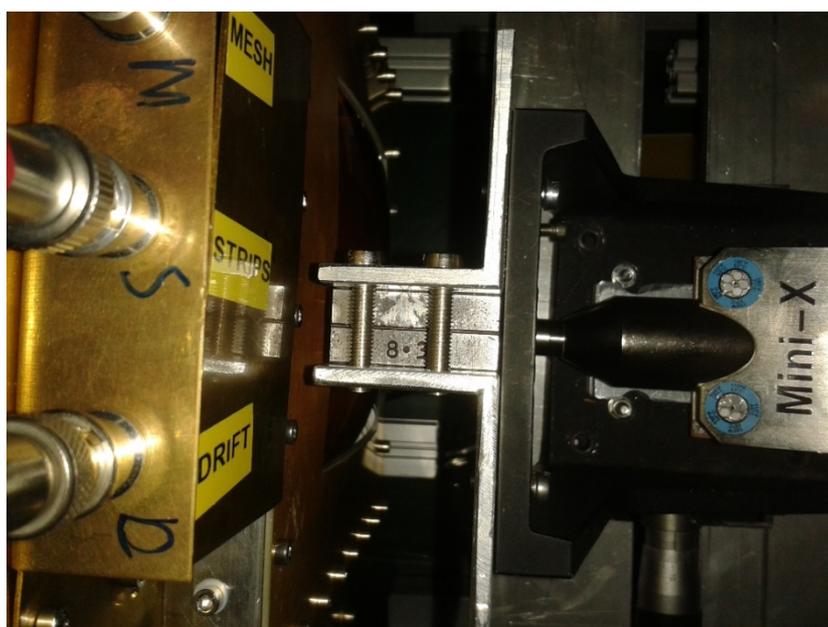


Рисунок 67 - Тестовый стенд для проверки точности изготовления камер Micromegas. Тестовая камера расположена на микрометрическом столе слева. Коллиматор виден в середине, и справа находится рентгеновская трубка.

Для проведения этих измерений камера была оснащена тестовой электроникой и системой сбора данных AVP25. Чтобы избежать насыщения электроники, тесты проводились при уменьшенном газовом усилении (анодное напряжение было установлено 470 В вместо 520 В). Напряжение на трубке и ток тоже были ограничены (10 кВ и 100 мкА), чтобы избежать наложения сигналов. На рисунке 68 показано распределение скорости счета со стрипов камеры при указанных условиях.

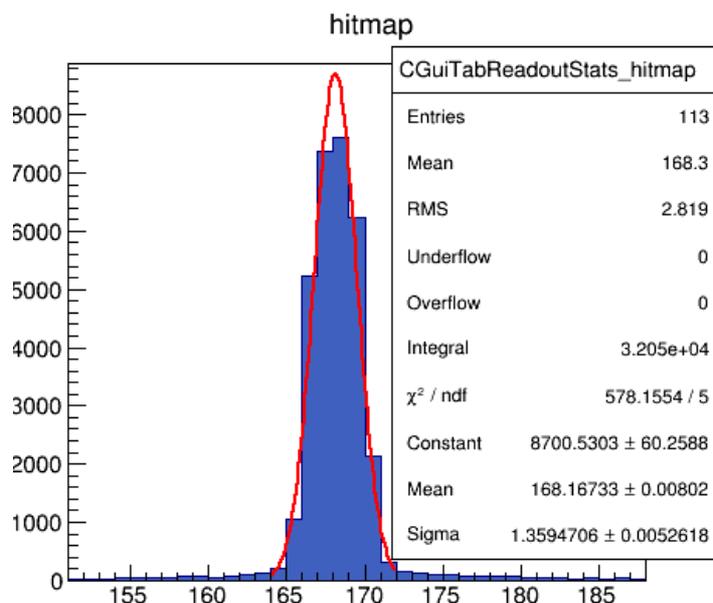


Рисунок 68 - Распределение счета событий по стрипам при облучении камеры коллимированным источником рентгеновского излучения.

Точность положения пучка определяется точностью среднего фита и составляет в данном случае приблизительно $0,008 \cdot 400 \text{ мкм} = 32 \text{ мкм}$.

Используя микрометрический стол, был сделан скан с шагом 20 мкм.

На рисунке 69 показаны результаты скана на большой статистике, где по горизонтальной оси отложены смещение коллиматора от начальной точки, а по вертикальной – измеренное предложенным методом положение пучка фотонов.

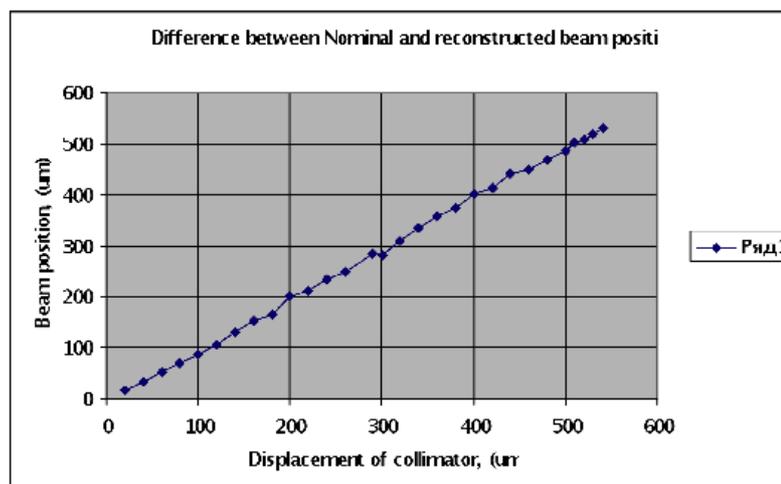


Рисунок 69 - Измеренное положение пучка как функция его позиции в камере Micromegas. Каждая точка соответствует изменению положения камеры на 20 мкм.

На основе этих измерений было показано, что предложенный метод обеспечивает точность определения положения анодных стрипов лучше, чем 10 мкм.

11.3. Процедуры контроля качества производства sTGC и Micromegas для (NSW)

На основе выполненных работ были сделаны предложения по процедурам контроля качества изготовления камер NSW. Эти процедуры были включены в Технический Проект Малого Мюонного Колеса [22]. Нужно сказать, что все процедуры определены пока в общих чертах, и их детальная спецификация находится в стадии проработки.

Для детекторов sTGC предполагается оснащение сканирующим устройством всех участки производства камер. В качестве первого шага каждая индивидуальная плоскость камеры будет просканирована интенсивным потоком рентгеновского излучения при одновременном измерении тока через камеру. Сканы должны делаться при двух напряжениях 2,5 кВ и 2,85 кВ. При умеренном облучении будет производиться измерение газового усиления, и составляться его карта. Детекторы, не удовлетворяющие требованиям, будут забракованы. После сборки камер в квадруплет сканирование камер выполняется в вертикальном положении. На рисунке 70 показана система поворота камер на последнем этапе сборки.

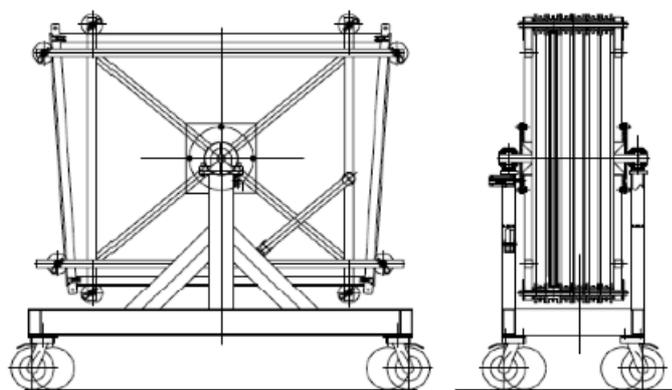


Рисунок 70 - Сборка камер sTGC после склейки, готовая к сканированию.

После окончательной склейки группы камер в вертикальном положении они будут наполнены газом и отсканированы с использованием стенда (см. рисунок 60).

В отличие от камер sTGC, процесс производства камер ММ находится в стадии становления, и критерии контроля качества требуют глубокой проработки. К настоящему моменту ясно, что скан, позволяющий построить карту коэффициента газового усиления, является обязательным компонентом процедуры контроля качества. Так же, как и в случае sTGC, после сборки камер в квадруплет с помощью коллимированного пучка будет проводиться проверка взаимного положения камер.

Общие требования к рентгеновскому сканеру:

- Должен быть легким и удобным для перемещения и фиксации камер.
- Размер объектов для сканирования $1 \cdot 2 \text{ м}^2$ (рабочая область).
- Возможность поворота плоскости стола на 90 градусов.
- Плоскости, на которые крепятся камеры, после установки должны жестко фиксироваться и исключать возможные люфты.
- Рентгеновская трубка должна быть зафиксирована на подвижной каретке с учетом возможностей изменения высоты трубки и угла ее наклона (до 30 градусов).
- В большинстве случаев позиция каретки должна быть определена с точностью около 1 мм, а лучше – до уровня 100 мкм, если это не будет сильно влиять на стоимость.

- На отдельные экземпляры сканирующих столов, условия точности определения относительного положения каретки могут быть повышены до 20 мкм.

- Система должна обеспечивать автоматическую работу по заранее заданным программам. По завершению работы должна быть визуализирована и сохранена карта значений исследуемых параметров, и/или найденные результаты измерения взаимных координат камер и других параметров представлены в виде таблиц и графиков.

В настоящее время производится уточнение технического задания для рентгеновского сканера для обеих технологий детекторов. Окончательное техническое задание будет выработано в соответствии с нуждами массового производства, однако общие принципы уже достаточно ясны. После начала финансирования в кратчайшие сроки должен быть построен прототип, на котором будут отработаны все критерии контроля и режимы работ. Оценка стоимости сканеров также находится в процессе проработки.

12. Разработка технического проекта «малых колес» установки АТЛАС

Технический проект новых малых колёс подготовлен [22], однако по причине его большого объёма мы вывели его из текста отчета и представляем в виде отдельного документа. Приводим здесь краткую аннотацию.

В настоящее время планируется провести несколько стадий работ по улучшению характеристик ЛНС, что позволит существенно расширить программу физических исследований. В результате работ в течение первой длительной остановки ЛНС в 2013-2014 годах планируется увеличить энергии пучков до проектной величины (7 ТэВ на пучок), а также достичь проектной светимости, около $1 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$. После второй длительной остановки в 2018 году предполагается увеличить светимость в 2-3 раза, что позволит АТЛАС набирать статистику, которая соответствует светимости 100 fb^{-1} в год. В дальнейшем предполагается еще одна большая остановка, во время которой светимость будет увеличена примерно вдвое. В конечном счете, предполагается, что за 10 лет работы на ЛНС будет получена экспериментальная статистика, соответствующая светимости 3000 fb^{-1} .

Эксперимент АТЛАС сконструирован для проведения широкой программы исследований, включая поиск бозона Хигса, а после его обнаружения - изучение свойств этого бозона, поиск новых тяжелых частиц,

таких как суперсимметричные и другие массивные объекты, которые возможно дадут указание на новые явления за пределами стандартной модели. Детектирование энергичных мюонов является одним из инструментов, совершенно необходимых для этих задач. Детектор АТЛАС сконструирован таким образом, чтобы с максимальной точностью восстанавливать параметры самых энергичных мюонов.

Для того чтобы в полной мере использовать высокую светимость, которая ожидается на установке АТЛАС после первой стадии модификации ускорителя LHC, необходимо заменить часть мюонной системы АТЛАС, которая предназначена для детектирования мюонов, вылетающих под малыми углами по отношению к пучку протонов. Эта часть установки называется малое мюонное колесо, оно расположено непосредственно вблизи пучковой трубы ускорителя. Новое малое мюонное колесо (NSW) должно функционировать в условиях высокого радиационного фона (до 15 тысяч заряженных частиц на см^2 в секунду) и при этом обеспечивать высокую точность реконструкции мюонных треков, а также предоставлять информацию для мюонного триггера первого уровня.

Для точной реконструкции треков необходима точность пространственных измерений около 100 микрон, а угловая точность реконструкции сегментов треков для триггера первого уровня должна быть порядка 1 миллирадиана. NSW будет иметь чувствительные камеры двух типов. Один из них предназначен для триггера первого уровня (так называемые микростриповые камеры с малым зазором, sTGC), а другая разновидность – для точной реконструкции треков (так называемые микромегас детекторы, MM).

sTGC разработаны для обеспечения триггера и должны дать возможность выработки триггера на отдельное пересечение сгустков сталкивающихся протонов. MM детекторы позволяют получить исключительно точную реконструкцию благодаря малым размерам чувствительных полосок (приблизительно 0,5 мм) и благодаря малому размеру чувствительной области (5 мм).

Такая высокая точность необходима для обеспечения высокой точности измерения импульса мюона в условиях высокого фона при повышенной светимости ускорителя.

MM камеры также способны подтверждать существование сегментов треков, которые найдены в следующей, промежуточной мюонной станции

(большие мюонные колеса). sTGC камеры также собирают информацию, которая позволяет улучшить точность реконструкции мюонных треков.

Таким образом, комбинация sTGC и MM камер позволяет получать избыточную информацию, обеспечивая этим дополнительные проверки для триггера и геометрической реконструкции мюонных треков как во время сбора информации (online), так и при последующей обработке (offline).

Существенно уменьшается частота ложных срабатываний триггера на мюоны. Данная комбинация элементов детектора была специально разработана, чтобы обеспечить очень хорошую функциональность детектора и в условиях последующего увеличения светимости на LHC, после 2018 г.

13. Методика исследования материалов и электроники на облучательной установке, выбор образцов для исследования

Приступая к исследованию радиационной стойкости электроники и материалов на облучательной установке, созданной в экспериментальном зале реактора ИБР-2М, следует отчетливо представлять себе две группы факторов, первая из которых относится к параметрам и возможностям конкретной облучательной установки, а вторая – к облучаемым предметам – материалам или электронике.

Прежде всего, следует знать спектр энергий нейтронов. Реактор обеспечивает наличие в канале №3, на котором расположена облучательная установка, нейтронов, величина средней энергии которых около 1 МэВ, а спектр энергий простирается от тепловых значений порядка 1 эВ до 20 МэВ. Также необходимо помнить, что размеры облучаемых образцов в поперечном сечении не должны превышать 20 см x 40 см. В пределах этого сечения обеспечивается высокая однородность пучка нейтронов ($\approx 5\%$).

Облучательная установка в состоянии обеспечить за один стандартный цикл работы реактора (11 суток) попадание на облучаемый образец потока нейтронов общим числом до 10^{18} н/см². Если требуется по условиям задачи меньший флюэнс нейтронов, то облучаемый образец следует разместить на более далеком от активной зоны реактора расстоянии, руководствуясь фактором обратной квадратичной зависимости потока нейтронов от расстояния до активной зоны реактора.

Следует также различать температурные условия облучения – облучение образцов при комнатной температуре и при температуре жидкого аргона или жидкого азота (около -196°C). Поскольку пока нет запроса от эксперимента

АТЛАС на экспериментальное изучение радиационного (вызванного нейтронами) воздействия на материалы и электронику в жидком аргоне, мы не будем сейчас обсуждать этот вопрос.

Подготовка к облучению должна включать в себя следующие этапы.

Выбор образцов. По номенклатуре образцы должны представлять все материалы, которые могут быть использованы при конструировании установки или отдельных её элементов. Выборка должна быть репрезентативна. Для повышения статистической точности интерпретации результатов облучения следует каждого наименования материала иметь не менее 3-5 образцов. Если общее число образцов окажется столь велико, что не может быть размещено в контейнере, то облучение следует разнести на 2 или более циклов. Причем, для такого случая рекомендуется в каждом последующем цикле облучения использовать набор образцов материала, представители которого были облучены в предыдущем сеансе. Такой подход не повлияет кардинально на выводы о пригодности облучаемого материала к использованию в установке, но даст возможность уменьшить погрешности, зависящие от режима работы реактора и активности соседствующих с нашим каналом пучков ИБР-2м. Надо ясно себе представлять элементный состав образцов, чтобы ещё до проведения облучения оценить ожидаемый уровень наведенной при облучении нейтронами активности и время последующего ожидания (выдержки образцов) для достижения уровня радиационной активности, допустимой для начала серии измерений.

Измерения характеристик. Перед облучением, в соответствии с заданием на сеанс, характеристики образцов должны быть тщательно измерены. Как правило, для материалов это геометрические размеры образцов, их упругость и механическая прочность. Следует тщательно осмотреть состояние поверхности образцов. Последнее особенно важно для печатных плат, используемых для монтажа электронных комплектующих. При облучении радиочастотных кабелей следует непременно измерить омическое и волновое сопротивления кабелей при различных частотах. Очевидно, что эти измерения должны быть проведены для всех образцов. После завершения облучения образцов и изъятия их из контейнера в первую очередь должен быть измерен уровень наведенной активности в образцах. На основе результатов измерения наведенной активности следует спланировать во времени последовательность измерений и осмотра облученных образцов.

Работа с электроникой. Методические рекомендации, изложенные выше, по работе с материалами на облучательной установке в полной мере могут быть использованы и при работе с электроникой. Опыт создания установки АТЛАС и других детекторов в физике элементарных частиц показывает, что разработчики стремятся вывести активную электронику из зон, в которых радиационная нагрузка очень велика. Поэтому максимальный флюэнс нейтронов (или заряженных частиц) в эксперименте не должен превышать величины порядка $10^{14} - 10^{15}$ н см⁻², что необходимо учитывать при планировании облучения. Это можно реализовать в облучательной установке двумя способами: либо разместить электронику в таком месте облучательной установки (на двутавре), где нужный флюэнс мог бы быть набран за полный цикл работы реактора, либо разместить электронику на конце двутавра и облучательную установку подвести к активной зоне реактора на необходимое, но меньшее, чем максимально возможное расстояние. Если по заданию следует изучить изменение характеристик по мере увеличения флюэнса, а полный цикл измерения занимает не пренебрежимо малое время, то, планируя проведение цикла облучения, необходимо в программе проведения цикла предусмотреть перекрытие пучка в канале, т.е. закрытие шибера канала. Перекрытие пучка обязательно следует согласовывать с пультом управления работой реактора ИБР-2М.

Для работы с электроникой высокочастотные и кабели питания должны быть выполнены из радиационно-стойких материалов.

Для контроля фактически набранного за цикл работы реактора флюэнса нейтронов исследуемыми образцами материалов рядом с ними надлежит разместить стандартные образцы дозиметров, по наведенной активности в которых после облучения будет уточнен интегральный поток нейтронов.

Для первого облучения на облучательной установке с новыми возможностями по интегральному потоку нейтронов, по программе подготовки детектора АТЛАС к работе в условиях повышенной по сравнению с номинальной светимостью БАК были выбраны компоненты так называемого «mini-FCAL» калориметра [23]. Это прибор, который в случае успешных испытаний, обеспечил бы работу переднего жидкоаргонового калориметра с минимальными переделками механических структур торцевых калориметров, а значит и с минимальным риском для целостности криостатов установки АТЛАС.

Одной из возможностей является использование в этом калориметре в качестве активных элементов искусственных алмазов. Для облучения были отобраны также и пассивные компоненты калориметра. К пассивным составляющим относятся так называемые РЕЕК-волокна диаметром в 100 и 500 микрон, по 10 штук каждого диаметра. Следовало понять, приведет ли облучение к изменению диаметров волокон и изменению их гибкости. Пять печатных плат, применяемых для организации считывания сигнала с переднего калориметра, следовало визуально проверить на сохранение механической прочности после облучения. Следовало также проверить сохранность контактов на платах, к которым были припаяны коаксиальные кабели с BNC-разъемами, и убедиться в том, что медное покрытие платы прочно прилегает к подложке.

Результаты испытаний изложены в разделе 5 выше.

14. Создание алгоритмов триггера для выделения распадов В-мезонов с образованием двух мюонов

14.1. Анализ требований к триггеру $B \rightarrow \mu\mu X$ в условиях повышенной светимости

Изучение редких полуплептонных распадов b -адронов представляет интерес с точки зрения экспериментальных поисков Новой Физики. На кварковом уровне они представляют собой переход $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$, и происходят, таким образом, через нейтральный слабый ток, меняющий аромат. Такие процессы запрещены в Стандартной Модели на древесном уровне, их амплитуда определяется петлевыми диаграммами более высокого порядка. Частицы, предсказываемые различными моделями Новой Физики, могут давать вклады в эти диаграммы, оказывая влияние на вероятность этих процессов и другие их наблюдаемые характеристики. Таким образом, сравнение экспериментально измеряемых величин с предсказаниями Стандартной Модели могут оказаться косвенным свидетельством в пользу таких теорий либо позволят установить экспериментальные ограничения на их параметры.

Наиболее благоприятными для экспериментального поиска являются четыре распада: $B^+ \rightarrow \mu\mu K^+$, $B_s \rightarrow \mu\mu\phi(K^+K^-)$, $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+\pi^-)$ и $\Lambda_b \rightarrow \mu\mu\Lambda(p\pi^-)$, имеющие относительную парциальную ширину порядка 10^{-6} . Именно на отбор этих каналов и нацелен разрабатываемый алгоритм триггера высокого уровня.

Важным требованием к триггеру таких распадов является отбор событий с парой мюонов, инвариантная масса которой может лежать в широком диапазоне от 200 МэВ до 5,5 ГэВ. По этой причине триггерные алгоритмы, созданные для отбора событий с J/ψ -мезоном, распадающимся по мюонному каналу, не подходят для рассматриваемых распадов, т. к. работают в диапазоне масс мюонной пары 2÷4 ГэВ. Другим возможным вариантом триггера для таких распадов является алгоритм DiMu, отбирающий мюонные пары в более широком диапазоне инвариантных масс. Однако при текущей светимости БАК порядка $10^{33}\div 10^{34}$ см⁻²·с⁻¹ он создаёт неприемлемо высокие потоки событий, поэтому используется с высоким коэффициентом деления частоты (prescale). Таким образом, возникает задача создания специализированного алгоритма триггера высокого уровня для рассматриваемых распадов с достаточно широким массовым окном для пары мюонов, и, вместе с тем, не создающего слишком высокие потоки событий. Последнее может быть достигнуто путём дополнительного отбора, основанного на использовании треков, реконструированных внутренним детектором (ID), для полной реконструкции этих распадов.

Для оценки потоков событий, создаваемых существующими алгоритмами, и выработки требований к новому алгоритму были проанализированы результаты ряда сеансов работы ускорителя БАК в начале 2012 г. с числом сталкивающихся сгустков протонов от 72 до 618 и концентрацией числа протонов в одном сгустке в диапазоне $(1-4)\cdot 10^{30}$ протонов. Это данные были перенормированы на величину светимости 10^{34} см⁻²·сек⁻¹ - максимальной ожидаемой в текущем цикле работы БАК. На рисунке 71 показаны результаты предсказаний потока событий, отбираемых на втором (L2) и третьем (EF) уровне триггера.

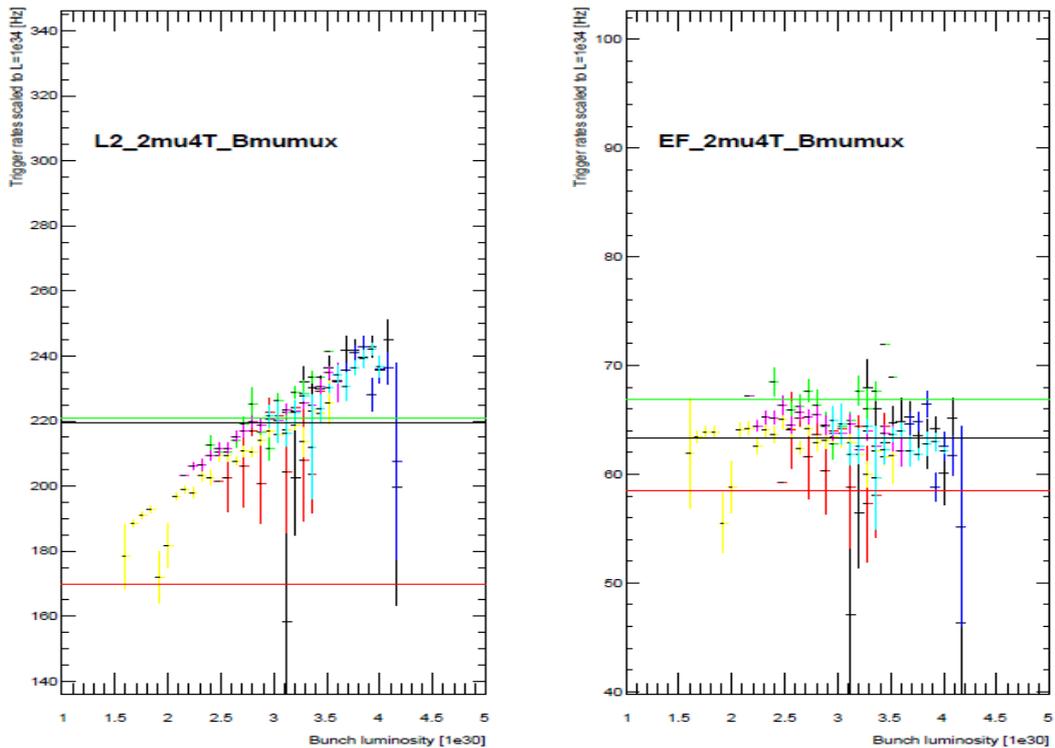


Рисунок 71 - Ожидаемые потоки событий для двухмюонного триггера высокого уровня на стадиях L2 (справа) и EF (слева) при светимости $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Из графика следует, что существующий алгоритм будет производить поток событий около 65 Гц, что в несколько раз превышает максимально допустимое значение для данного типа событий. Это обуславливает необходимость создания нового алгоритма, отбирающего нужные события с приемлемой частотой и высокой эффективностью.

14.2. Разработка алгоритма триггера $B \rightarrow \mu\mu X$

Алгоритмы фильтра событий, производящие отбор каналов $B^+ \rightarrow \mu\mu K^+$, $B_s \rightarrow \mu\mu\phi(K^+ K^-)$, $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+ \pi^-)$ и $\Lambda_b \rightarrow \mu\mu\Lambda(p\pi^-)$, были созданы по единой схеме. Логика работы алгоритма представлена на рисунке 72.

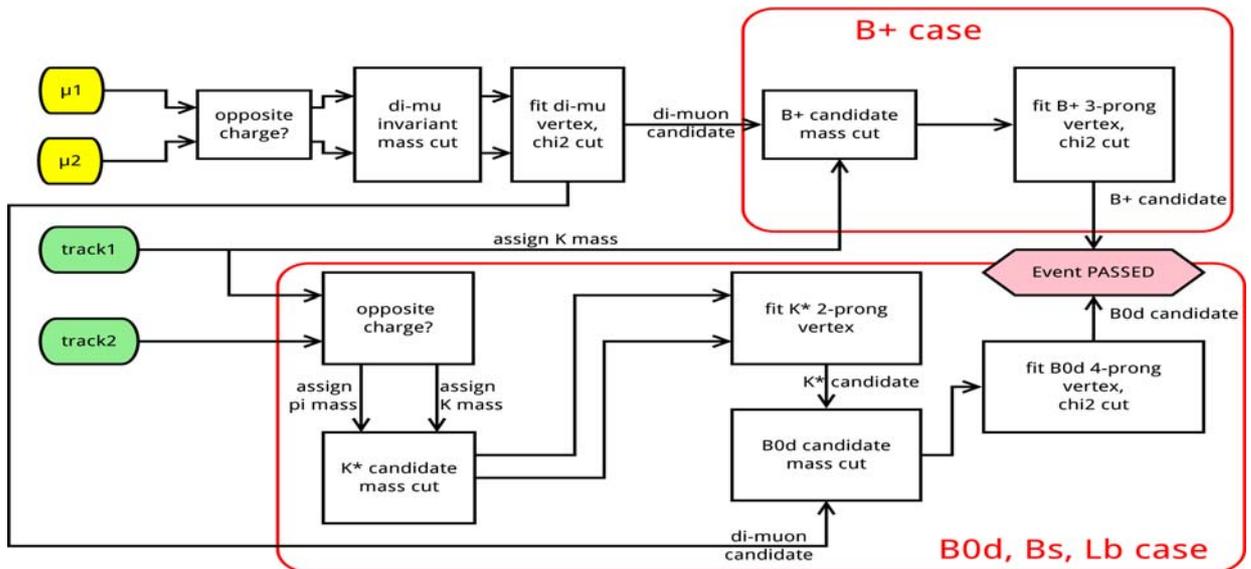


Рисунок 72 - Схематичное представление логики разработанного алгоритма фильтра событий

Алгоритм принимает на вход два мюона, реконструированных на уровне фильтра событий при помощи алгоритмов, аналогичных используемому при оффлайн-реконструкции. Кроме того в геометрической «области интереса» (Region of Interest) вокруг этих мюонов производится реконструкция треков, измеренных внутренним детектором, для их последующего использования при построении кандидатов в полуплептонные распады.

Производится фитирование двух противоположно заряженных мюонов к общей вторичной вершине, и налагается условие на инвариантную массу пары (не более 5,5 ГэВ) и качество фитирования вершины ($\chi^2 < 20$).

Затем по отдельности производится построение кандидатов для различных топологий всех рассматриваемых полуплептонных распадов. В случае 3-частичного распада $B^+ \rightarrow \mu\mu K^+$ построенная мюонная пара комбинируется с каждым из реконструированных Внутренним Детектором треков (за исключением треков самих мюонов), которому присваивается масса каона. Три трека фитируются к общей вершине, накладывается условие на их инвариантную массу и качество фитирования. Если все они выполняются, событие отбирается триггером.

Для других трёх распадов, имеющих 4 частицы в конечном состоянии, первоначально отбираются все возможные пары противоположно заряженных треков, не являющихся мюонами. Каждая пара фитируется к общей вершине, и отбираются те, инвариантная масса которых близка к массе одной из подходящих частиц, в рамках соответствующей массовой

гипотезы. Затем эта пара комбинируется с построенной парой мюонов, и четыре трека вновь фитируются к общей вершине. Если их инвариантная масса и качество фитирования удовлетворяют установленным критериям, триггер также отбирает это событие. Данная процедура повторяется по отдельности для каждого из трёх распадов с 4-частичной топологией с соответствующими различными массовыми гипотезами для адронных треков и пороговыми значениями инвариантных масс. Единственное отличие для распада $\Lambda_b \rightarrow \mu\mu\Lambda(p\pi^-)$ заключается в отсутствии этапа фитирования 4-частичной вершины в связи с большим временем жизни Λ -гиперона.

В таблице 6 приведены установленные пороговые значения инвариантных масс и показателей качества фитирования χ^2 .

Таблица 6. Диапазоны инвариантных масс и пороговые значения χ^2 для различных распадов; под частицей X понимаются K^* , ϕ или Λ в соответствующих распадах.

| Распад | Масса частицы X, ГэВ | Масса b -адрона, ГэВ | Порог χ^2 |
|---|----------------------|------------------------|----------------|
| $B^+ \rightarrow \mu\mu K^+$ | - | 4,4–5,8 | 50 |
| $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+\pi^-)$ | 0,94–1,10 | 4,8–5,8 | 60 |
| $B_s \rightarrow \mu\mu\phi(K^+K^-)$ | 0,70–1,10 | 4,6–5,9 | 60 |
| $\Lambda_b \rightarrow \mu\mu\Lambda(p\pi^-)$ | 1,04–1,20 | 5,1–6,1 | 60 |

Первые оценки эффективности триггерного отбора с использованием нового алгоритма показали низкую эффективность отбора событий распадов $\Lambda_b \rightarrow \mu\mu\Lambda(p\pi^-)$ при полной реконструкции всех 4-х частиц в конечном состоянии. Это связано с существенным падением эффективности реконструкции адронных треков триггером высокого уровня, когда они выходят из вершины, сильно смещённой относительно точки pp -соударений (в данном случае — из вершины распада Λ -гиперона). В связи с этим была предложена схема отбора т. н. «частично реконструированных» распадов Λ_b , когда восстанавливается лишь один из треков от распада Λ -гиперона, и определяется инвариантная масса его и пары мюонов. В этом случае нижний порог окна допустимых значений этой массы должен быть снижен, чтобы компенсировать массу и импульс, уносимый вторым треком, который не был реконструирован.

Таким образом, распады $B_b \rightarrow \mu\mu A(p\pi^-)$ эффективно рассматриваются как имеющие 3 частицы в конечном состоянии. Эти события могут отбираться той частью алгоритма, которая нацелена на отбор 3-частичного распада $B^+ \rightarrow \mu\mu K^+$. Для увеличения эффективности такого отбора распадов B_b нижняя граница массового окна для кандидата в B^+ -мезон была установлена на уровне 4,4 ГэВ, значительно более низком, чем это необходимо при отборе распадов самого B^+ . В результате эффективность отбора распадов B_b по такой схеме значительно увеличилась.

Параллельно с разработкой алгоритма уровня фильтра событий был модифицирован уже существовавший алгоритм триггера второго уровня, созданный для отбора событий с указанными распадами и имеющий сходную логику работы. В нём была оптимизирована структура программного кода, исправлено несколько ошибок, используемые пороговые значения инвариантных масс приведены в соответствие с аналогичными значениями на уровне фильтра событий.

Были сконфигурированы новые цепочки триггера высокого уровня, последовательно включающие эти два алгоритма.

Весь разработанный и модифицированный программный код триггерных алгоритмов был размещён в SVN-репозитории программного обеспечения эксперимента ATLAS. Он также включён в тестовые сборки, предназначенные для проверки новых алгоритмов перед их вводом в эксплуатацию в онлайн-режиме.

Предварительные оценки потоков событий, порождаемых новыми триггерными цепочками, показали, что они находятся на приемлемом уровне для дальнейшего отбора событий онлайн. Временные характеристики работы нового алгоритма также удовлетворяют требованиям, предъявляемым к алгоритмам фильтра событий (среднее время обработки одного события составляет 13 мс в сеансе с наложением 22-х протон-протонных столкновений). Это позволяет уже на текущем этапе включить новые цепочки в онлайн отбор экспериментальных событий. Это было сделано во время очередной технической остановки ускорителя БАК в июле 2012 г.

14.3. Создание алгоритма обнаружения моды распада $B_c \rightarrow D_s^* \mu^+ \mu^-$

Выполнена разработка триггера высокого уровня для обнаружения моды распада B_c мезона с двумя мюонами в конечном состоянии, в частности моды распада $B_c \rightarrow D_s^* \mu^+ \mu^-$.

Для регистрации D_s^* мезонов используются их распады $D_s^* \rightarrow D_s \pi^0 / \gamma$ с последующим каскадным распадом $D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+ \rightarrow K^+ K \pi^+$ (и зарядово-сопряжённая мода). Реконструкция данного каскадного распада отлажена на данных коллаборации ATLAS. На рисунке 73 показано распределение по инвариантной массе $M(K^+ K \pi^+)$ для отобранных кандидатов. Сигнал от D_s^\pm мезона хорошо виден. На рисунке 74 показано распределение по инвариантной массе $M(K^+ K^-)$ для кандидатов в D_s^\pm мезоны с реконструированной массой двух каонов в интервале значений $1,93 < M(K^+ K \pi^+) < 2,01$ ГэВ. В этом распределение хорошо виден сигнал от ϕ мезона.

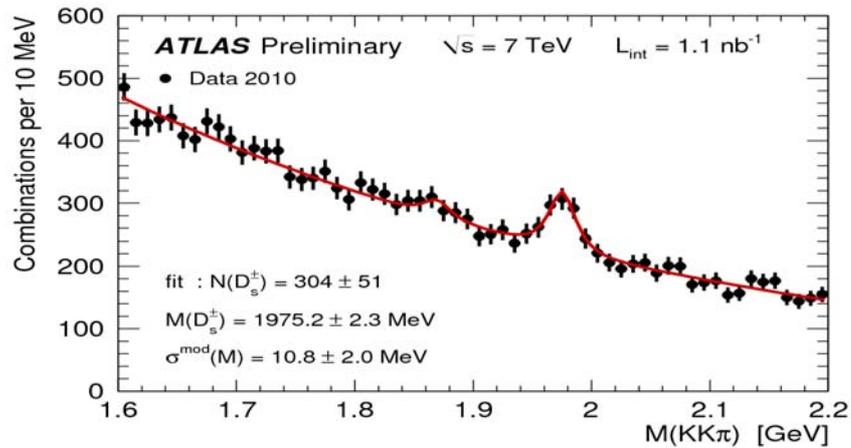


Рисунок 73 - Распределение по инвариантной массе $M(K^+ K \pi^+)$ для отобранных кандидатов в D_s^\pm мезоны.

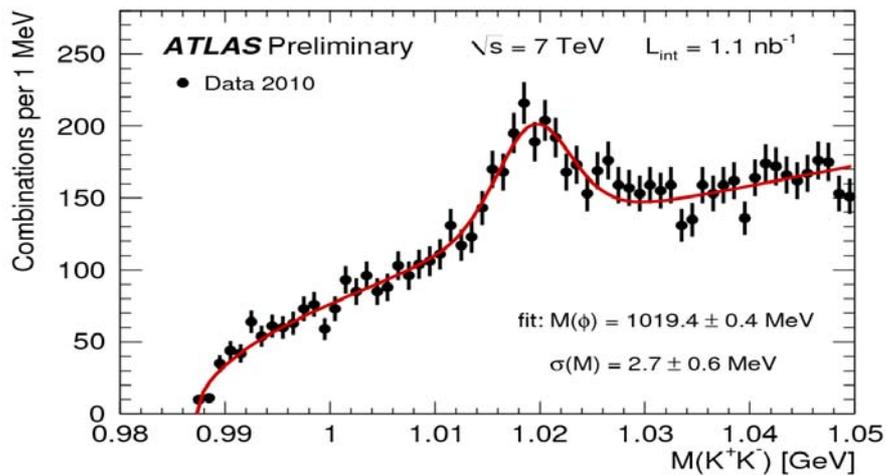


Рисунок 74 - Распределение по инвариантной массе $M(K^+ K^-)$ для кандидатов в D_s^\pm мезоны с реконструированной массой $1,93 < M(K^+ K \pi^+) < 2,01$ ГэВ.

15. Определение эффективности алгоритмов триггера для выделения распадов В-мезонов с образованием двух мюонов

15.1. Определение величины потоков событий по экспериментальным данным.

Потоки событий, порождаемые в эксперименте цепочками, использующими новый алгоритм, показаны на рисунке 75 для триггера второго уровня и на рисунке 76 для фильтра событий триггера В-физики эксперимента ATLAS.

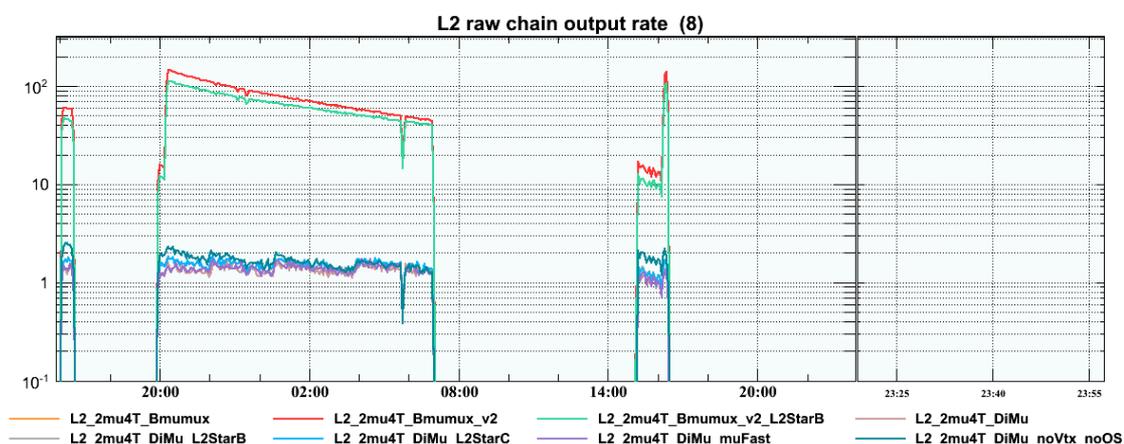


Рисунок 75 - Величины потоков событий, отбираемых триггерами второго уровня (L2) В-физики.

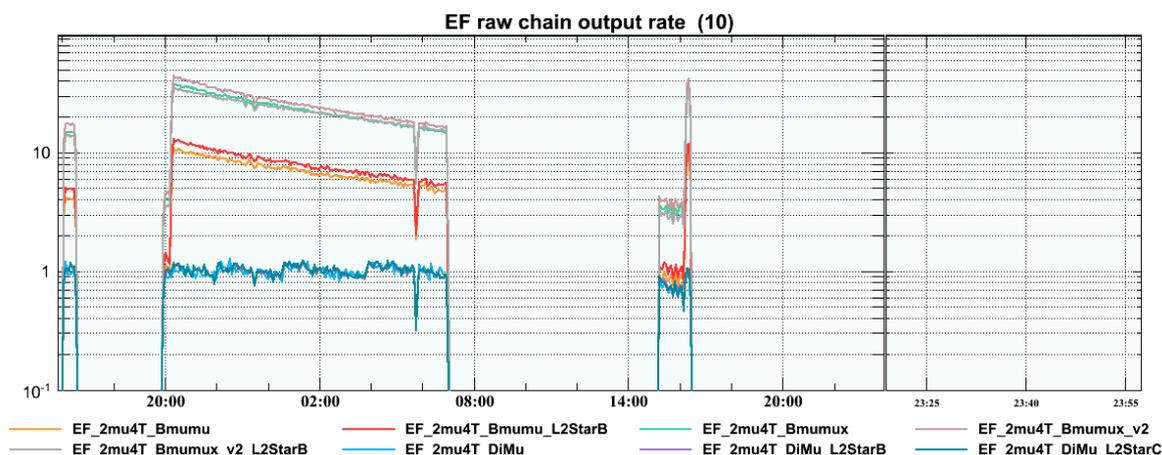


Рисунок 76 - Величины потоков событий, отбираемых триггером уровня фильтра событий (EF) В-физики.

Эти графики показывают изменяющуюся во времени величину потоков событий в течение суток 16 августа 2012 г. По вертикальной оси отложена частота появления событий в Гц. Горизонтальная ось демонстрирует время

регистрации событий. Линиями разного цвета показаны потоки событий для триггерных цепочек, использующих специальные алгоритмы. Цепочки, в именах которых содержится наименование `Vmumux_v2`, используют новый алгоритм уровня фильтра событий и модифицированный алгоритм триггера второго уровня. Старые цепочки без специализированного отбора на уровне фильтра событий имеют имена, заканчивающиеся на `Vmumux`.

Как видно из графиков, потоки на уровне фильтра событий для новых цепочек незначительно (около 10 %) превышают потоки для старых, однако по-прежнему находятся в допустимых пределах.

Кроме того, в триггерное меню дополнительно включены цепочки, использующие другой алгоритм реконструкции треков в триггере второго уровня (`SiTrack` вместо `IDSCAN`), из которых затем строятся кандидаты распадов $B \rightarrow \mu\mu X$ (имена этих цепочек заканчивается на `L2StarB`). Этот алгоритм, благодаря более точной реконструкции треков, в частности, позволяет снизить потоки событий, порождаемые этими цепочками ещё на 5÷10 %. С учётом других его преимуществ было принято решение впоследствии отказаться от использования старой реконструкции треков, полностью перейдя на новый алгоритм.

15.2. Создание наборов моделированных событий для оценки влияния скорости потоков событий и количества первичных взаимодействий при столкновении сгустков протонов и результаты их анализа

Для дальнейшего изучения эффективности нового триггерного алгоритма и других его характеристик, в частности, влияния наложения первичных событий (*pile-up*) на его работу, были подготовлены наборы данных Монте-Карло для полулептонных распадов В-мезонов, которые он призван отбирать.

На рисунках 77, 78, 79(а) показаны спектры инвариантных масс реконструированных пар мюонов из моделированных событий распадов $B^+ \rightarrow \mu\mu K^+$, $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+\pi^-)$, $B_s \rightarrow \mu\mu\phi(K^+K^-)$, соответственно.

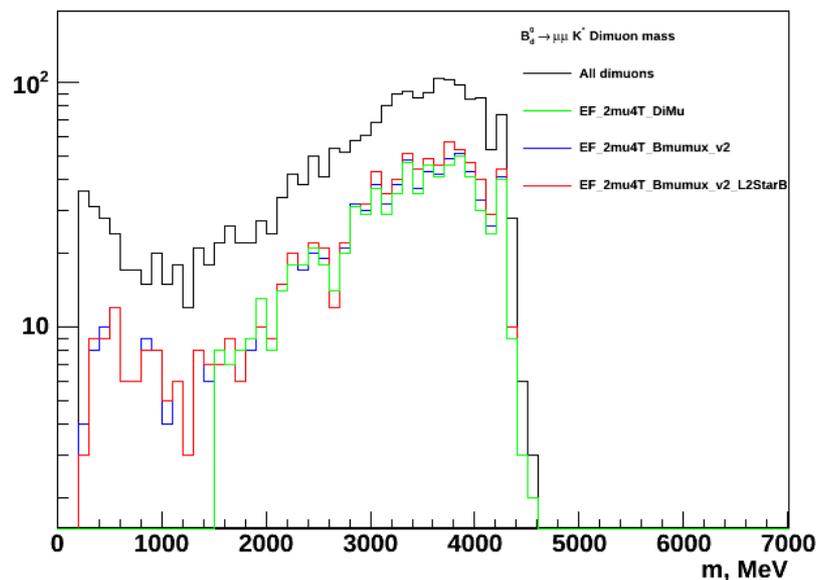


Рисунок 77а - Распределения инвариантной массы мюонной пары из распада $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+\pi^-)$ в модельных событиях. Чёрная гистограмма соответствует всем реконструированным распадам, синяя — отобранным цепочкой EF_2mu4T_Bmumux_v2, красная — отобранным цепочкой EF_2mu4T_Bmumux_v2_L2StarB.

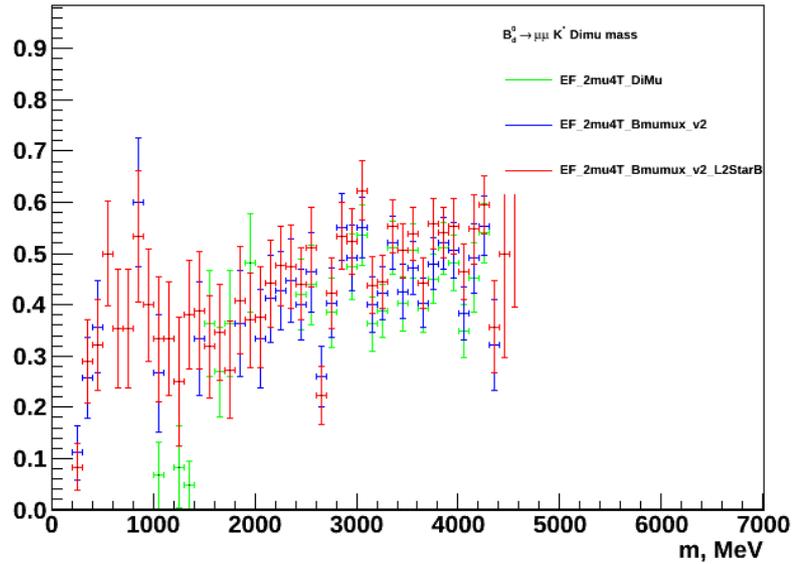


Рисунок 77б - Значения эффективности триггера в зависимости от величины инвариантной массы мюонной пары из распада $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+\pi^-)$ в моделированных событиях. Зеленые точки соответствуют отбору триггерной цепочкой EF_2mu4T_DiMu, синие – отбору цепочкой триггера EF_2mu4T_Bmumux_v2, красные — отбору цепочкой EF_2mu4T_Bmumux_v2_L2StarB.

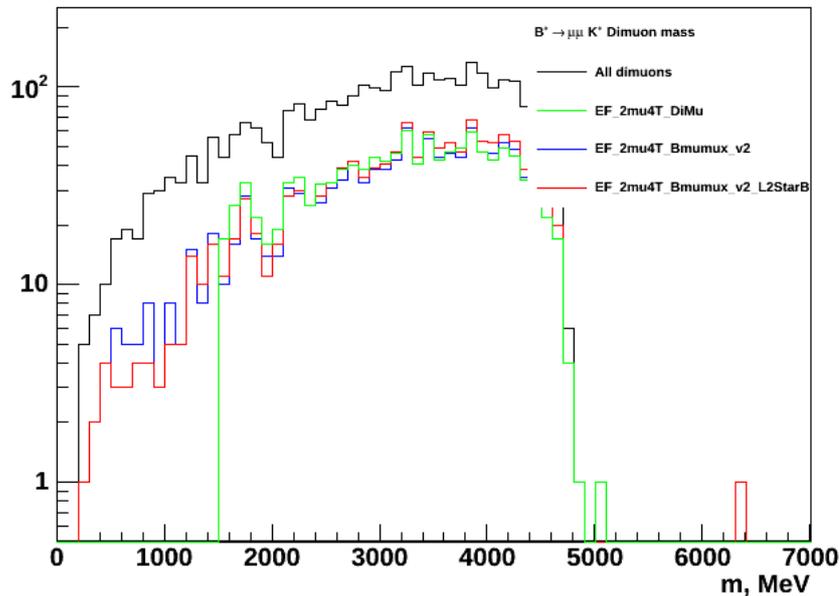


Рисунок 78а - Распределения инвариантной массы мюонной пары из распада $B^+ \rightarrow \mu\mu K^+$ в модельных событиях. Чёрная гистограмма соответствует всем реконструированным распадам, синяя - отобранным цепочкой EF_2mu4T_Bmumux_v2, красная - отобранным цепочкой EF_2mu4T_Bmumux_v2_L2StarB.

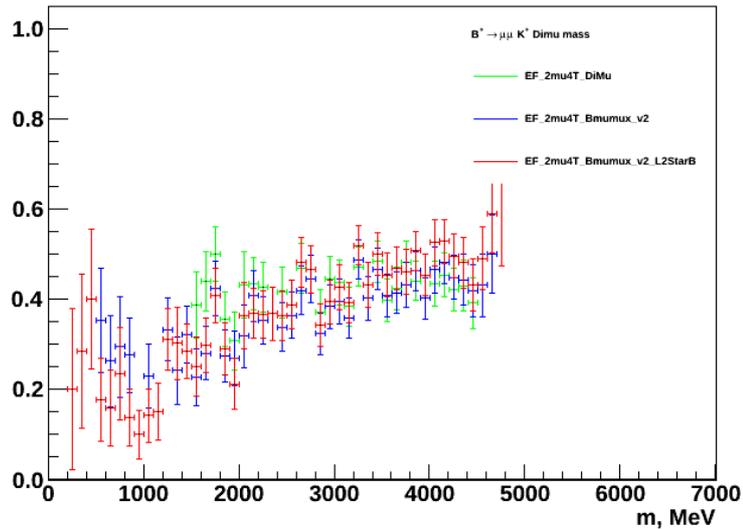


Рисунок 78б - Значения эффективности триггера в зависимости от величины инвариантной массы мюонной пары из распада $B^+ \rightarrow \mu\mu K^+$ в модельных событиях. Зеленые точки соответствуют отбору триггерной цепочкой EF_2mu4T_DiMu, синие – отбору цепочкой триггера EF_2mu4T_Bmumux_v2, красные — отобранным цепочкой EF_2mu4T_Bmumux_v2_L2StarB.

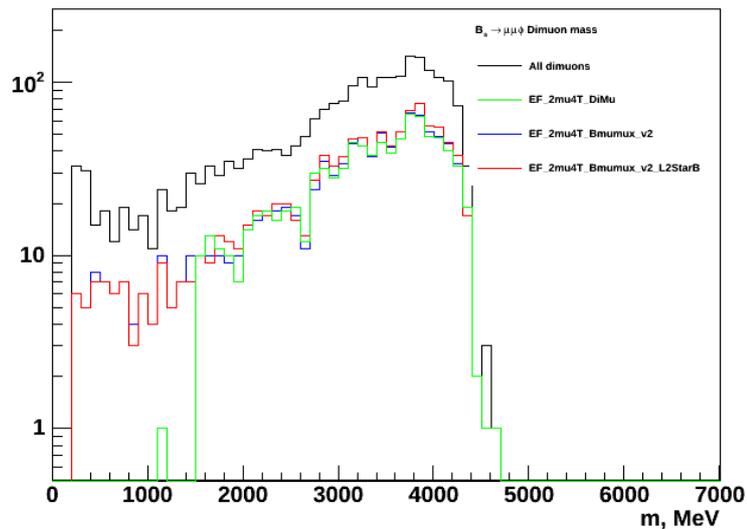


Рисунок 79а - Распределения инвариантной массы мюонной пары из распада $B_s^0 \rightarrow \mu\mu \phi$ в модельных событиях. Чёрная гистограмма соответствует всем реконструированным распадам, синяя — отобранным цепочкой EF_2mu4T_Bmumux_v2, красная — отобранным цепочкой EF_2mu4T_Bmumux_v2_L2StarB.

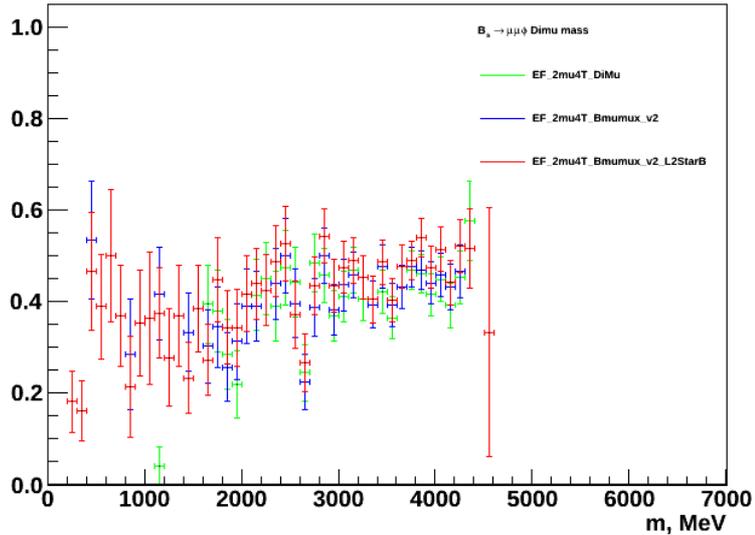


Рисунок 79б - Значения эффективности триггера в зависимости от величины инвариантной массы мюонной пары из распада $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ в модельных событиях. Зеленые точки соответствуют отбору триггерной цепочкой EF_2mu4T_DiMu, синие – отбору цепочкой триггера EF_2mu4T_Bmumux_v2, красные — отобранным цепочкой EF_2mu4T_Bmumux_v2_L2StarB.

Также показаны те же спектры, полученные на событиях, отбираемых новыми триггерами. Из рисунков следует, что при использовании новых триггеров доступной для анализа становится область малых эффективных масс пары мюонов. Известно, что эта область масс чувствительна к типу матричного элемента распада и является критичной при исследовании зарядовой асимметрии мюонов в редком распаде $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+\pi^-)$ при сравнении предсказаний Стандартной модели и некоторых типах ее расширения.

Полученные из анализа модельных событий эффективности триггеров для разных каналов показаны на рисунке 79(б). Видно, что эффективность триггера составляет 40–45 % для различных каналов распада и практически постоянна во всём диапазоне масс мюонной пары. Это отвечает требованиям, изначально предъявлявшимся к разрабатываемому алгоритму.

15.3. Разработка опции триггера для регистрации дважды и трижды тяжелых барионов

Новая энергетическая область предстоящей работы коллайдера и его высокая светимость делают актуальным поиск адронов, не наблюдавшихся до настоящего времени в экспериментах или наблюдавшихся с ограниченной статистикой. К таким адронам относятся B_c - мезоны, анализ которых был выполнен на первом этапе проекта, и Ω - барионы, в состав которых входят

два или три тяжелых кварка (c , b). Возможность успешной реконструкции барионов при наличии трех последовательных этапов распада была продемонстрирована в эксперименте ATLAS ранее при использовании триггера с минимальным отбором событий. Для поиска рассматриваемых распадов необходимо применение специального триггера из-за малой вероятности регистрируемых распадов ($\sim 10^{-4}$) таких барионов.

Была проведена начальная разработка опции триггера для регистрации дважды и трижды тяжёлых барионов. Для обнаружения дважды и трижды тяжёлых барионов Ω_{ccs} , Ω_{bcs} , Ω_{ccc} и Ω_{bcc} в было предложено использовать их каскадные распады на более лёгкие Ω -барионы с испусканием π^\pm мезонов [24], например:

$$\Omega_{ccc} \rightarrow \Omega_{ccs} + \pi^+ \rightarrow \Omega_{css} + \pi^+ + \pi^+ \rightarrow \Omega_{sss} + \pi^+ + \pi^+ + \pi^+$$

Для полной реконструкции новых состояний необходимо реконструировать Ω_{sss} и от двух до четырёх π^\pm мезонов [24]. Для регистрации Ω_{bcs} и Ω_{bcc} состояний можно также использовать известный распад $\Omega_{bss} \rightarrow \Omega_{sss} + J/\psi$ [25]. Для регистрации Ω_{sss} предполагается использовать $\Omega_{sss} \rightarrow \Lambda^0 K^-$. Реконструкция этого канала отлажена на данных сотрудничества ATLAS [26]. На рисунке 80 показано распределение по инвариантной массе $M(\Lambda^0 K)$ для отобранных кандидатов в Ω_{sss} барионы с использованием существующих алгоритмов. В этом распределение хорошо виден сигнал от Ω_{sss} бариона.

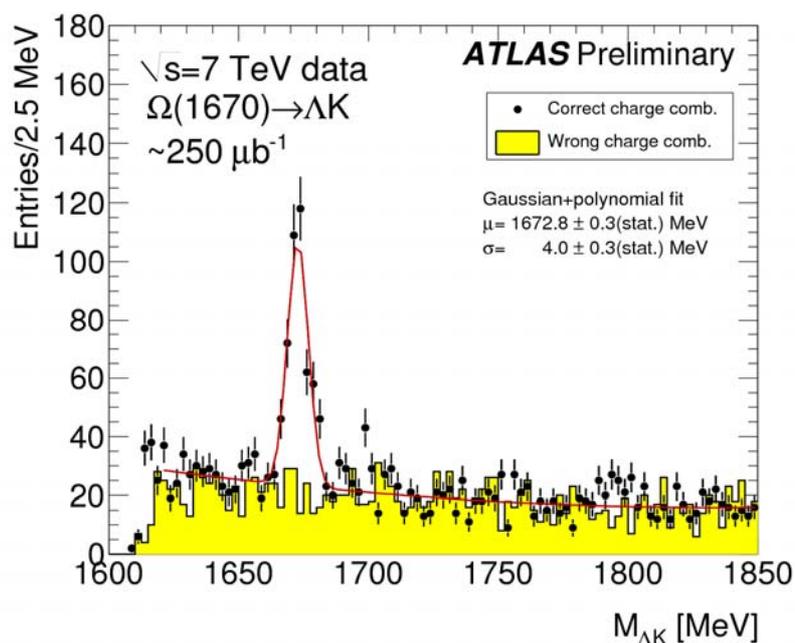


Рисунок 80 - Распределение по инвариантной массе $M(\Lambda^0 K)$ для отобранных кандидатов в Ω_{SSS} барионы.

Для разработки триггера событий с трижды тяжелыми барионами следует учесть, что эти барионы состоят либо из трёх кварков, либо трёх антикварков. Три других тяжёлых кварка в тех же событиях могут распадаться полу-лептонно, позволяя отбирать события по наличию 2-3 мюонов. Таким образом, для отбора событий на первом триггерном уровне можно использовать регистрацию 2 или 3 мюонов.

Для триггирования событий на втором (Level 2) и третьем (Event Filter) триггерном уровне следует использовать реконструкцию $J/\psi \rightarrow \mu + \mu^-$ (для Ω_{bcs} и Ω_{bcc}), или 2-3 мюонов. Для подавления величины потока событий необходимо перенести алгоритм реконструкции распада $\Omega_{\text{SSS}} \rightarrow \Lambda^0 K^-$ на третий и, возможно, второй триггерный уровни.

16. Определение эффективностей и потоков событий триггера распадов В-мезонов в условиях повышенной светимости

16.1. Анализ скорости работы алгоритма триггера $B \rightarrow \mu\mu X$ в условиях повышенной светимости с учетом потоков триггера первого уровня

Временные характеристики работы алгоритмов триггера актуальны в связи с высокой частотой регистрируемых событий [27]. На рисунках 81 и 82 показаны скорости счета полезных событий для нескольких двухмюонных триггеров высокого уровня, используемых в В-физике.

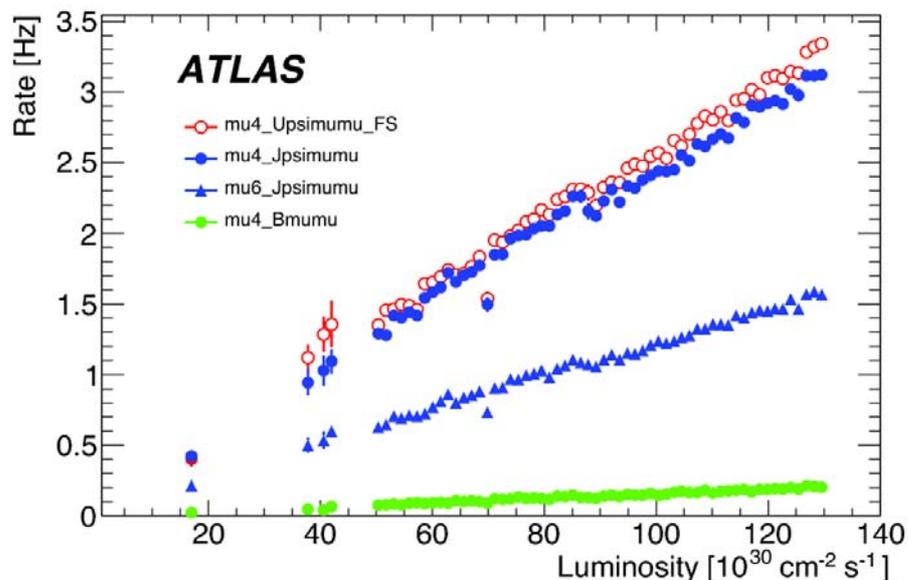


Рисунок 81 - Поток событий от нескольких триггеров В-физики с использованием одиночного RoI в зависимости от пиковой светимости БАК для pp соударений при энергии 7 ТэВ [28].

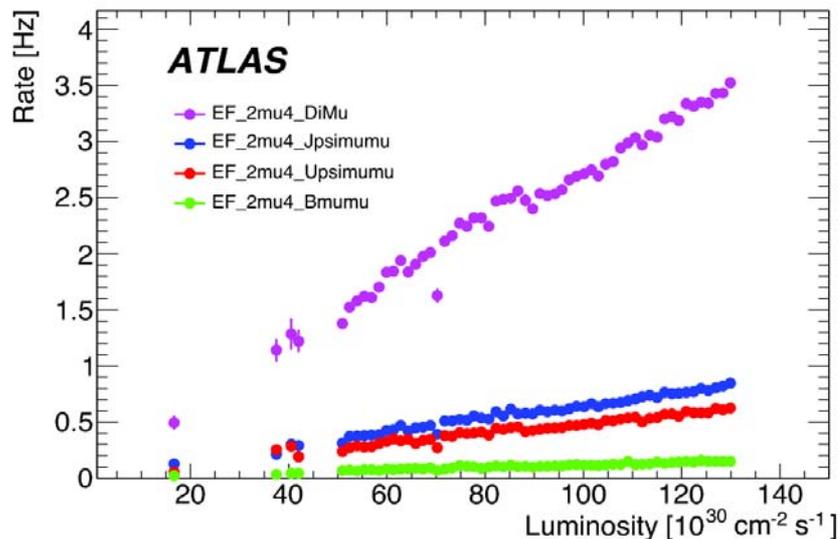


Рисунок 82 - Поток событий от нескольких триггеров В-физики с использованием топологического триггера на два мюона в зависимости от пиковой светимости коллайдера для pp соударений при энергии 7 ТэВ[28].

Из рисунков видно, что абсолютные значения выходных частот триггеров, используемых в В-физике, даже при отборе резонансного пика от J/ψ -мезонов не превышают нескольких Гц.

При увеличении порогов регистрации мюонов роль алгоритмов триггера высокого уровня возрастает. Это демонстрирует рисунок 83, где приведены скорости счета событий мюонных триггеров второго уровня и фильтра событий разных порогов по отношению к потоку триггера первого уровня для pp соударений при энергии 7 ТэВ.

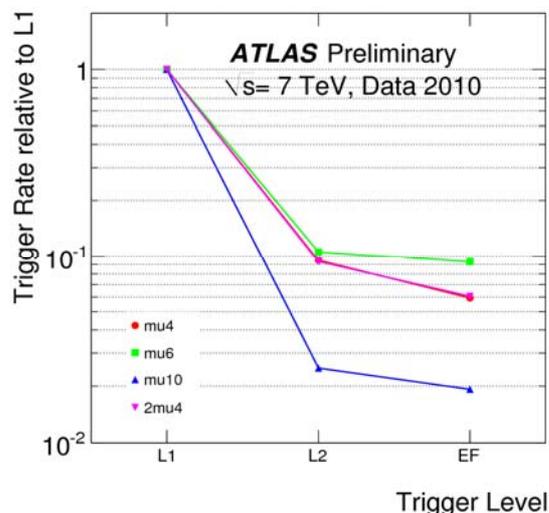


Рисунок 83 - Относительные скорости счета событий мюонного триггера с порогами 6 и 10 ГэВ и двухмюонного триггера с порогами 4 ГэВ на уровне триггера второго уровня L2 и фильтра событий EF[29].

Из рисунков видно, что абсолютные значения выходных частот триггеров, используемых в В-физике, даже при отборе резонансного пика от J/ψ -мезонов не превышают нескольких Гц.

Важной характеристикой триггера является расчетное время алгоритмов. Оно зависит от ряда параметров: компьютерных мощностей и характеристик используемого оборудования; используемых алгоритмов и свойств анализируемого объекта. В период разработки триггера В-физики [30] было показано, что времена счета алгоритмов одиночного RoI $0,75 \times 0,75$ и FullScan составляют в среднем 6,67 мс и 44,4 мс, соответственно. При этом количество треков во втором случае выше примерно в четыре раза. Для сравнения на рисунке 84 показаны расчетное время для триггеров струй, тау и недостающей энергии на уровне L2 и EF при светимости $3,1 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, стартующих с регистрации мюона.

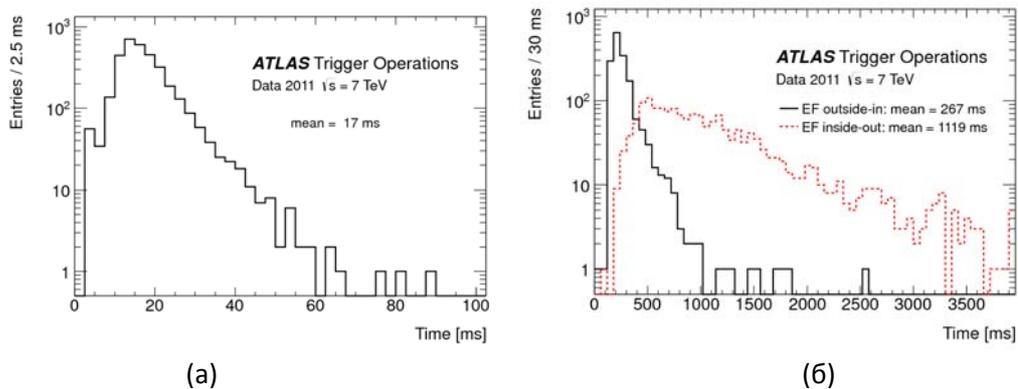


Рисунок 84 - Расчетное время алгоритмов триггера высокого уровня для одного RoI для триггера L2 (а) и EF (б). Пунктирной линией на рисунке (б) показаны результаты алгоритма, где реконструкция мюона начинается в мюонном спектрометре, сплошной – во внутреннем детекторе. В первом случае расчетное время выше в более чем 5 раз.

За время первого сеанса работы детектора расчетное время алгоритмов триггера высокого уровня было оптимизировано, в основном за счет модификации процедуры считывания информации из триггерных ячеек калориметра. Из данных на рисунке 85 видно, что полное время работы алгоритма второго уровня L2 за счет оптимизации уменьшилось в среднем с 40 мс до 30 мс. При этом разрешенное полное время для всей системы составляет 40 мс.

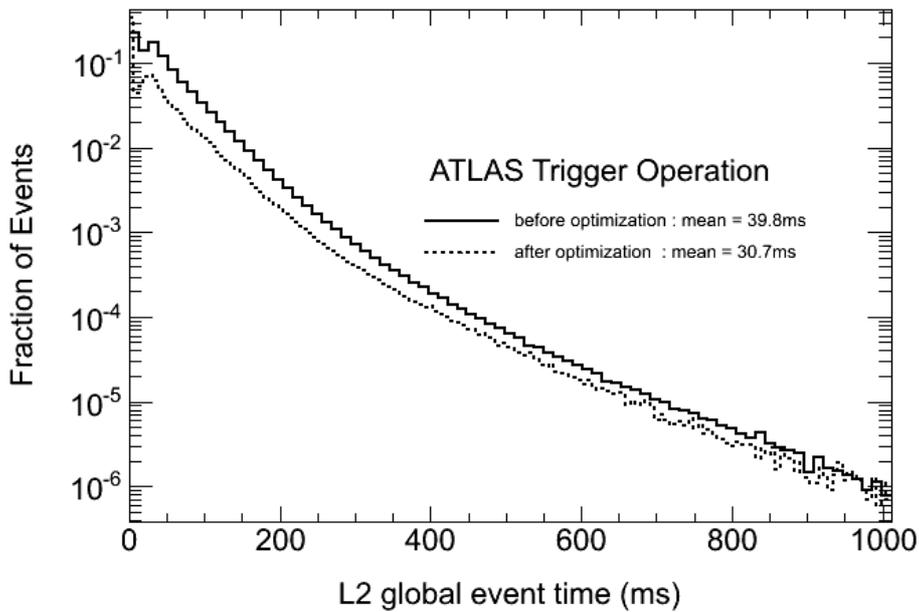


Рисунок 85 - Распределение значений полного времени счета алгоритма триггера L2 до и после модификации процедур считывания информации из ячеек калориметра.

Значительная модификация времени расчета триггера ожидается с введением алгоритмов нового быстрого трекинга FTK. Ожидаемое изменение времени работы алгоритма трекинга показаны на рисунке 86. в зависимости от количества точек на входе.

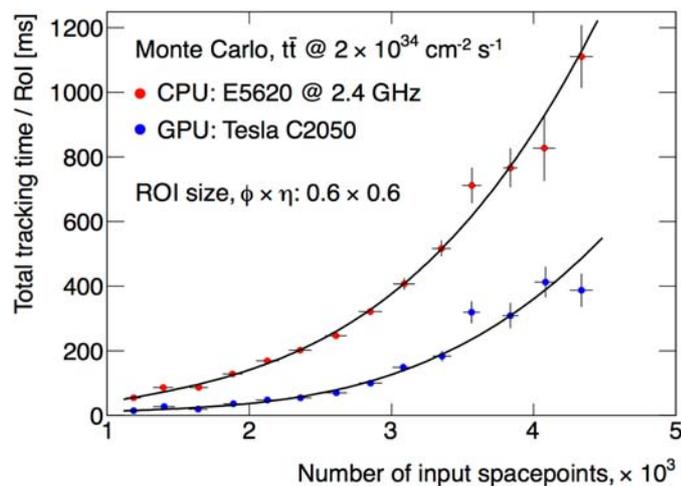


Рисунок 86 - Ожидаемое полное время расчетов треков при высокой светимости в зависимости от количества пространственных точек в RoI при использовании алгоритма FTK.

Результаты для времени счета алгоритма триггера второго уровня L2 для полулептонных каналов EF_mu4Tmu6_Vmumux_v2, разработанного в рамках данного проекта, показано на рисунке 87.

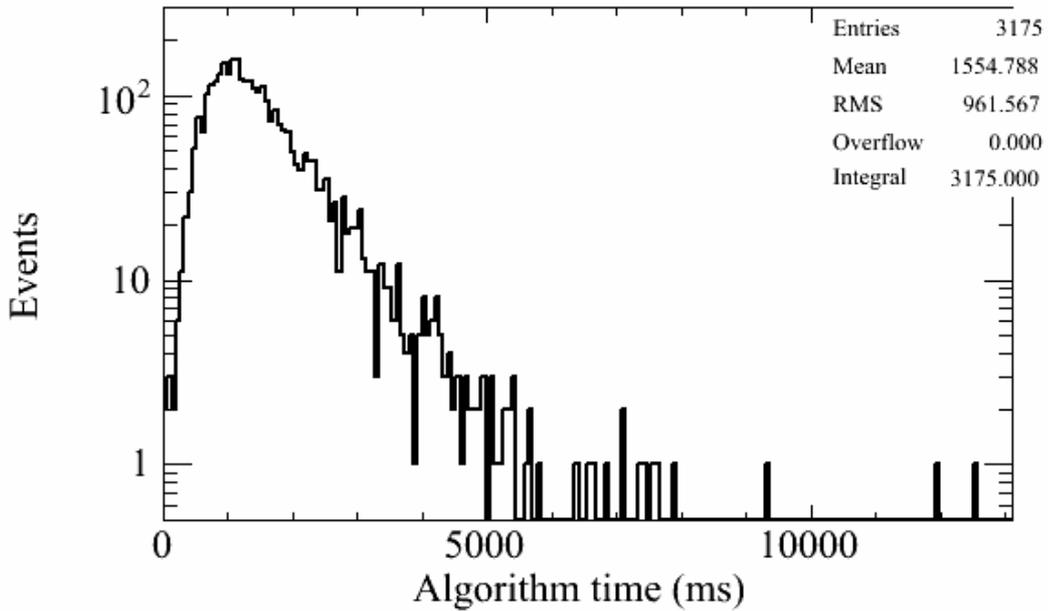


Рисунок 87 - Время счета алгоритма триггера высокого уровня (HLT) В-физики EF_mu4Tmu6_Vmtmuh_v2 с учетом всех каналов отбора для редких полулептонных распадов в последнем сеансе набора данных в конце 2012 г.

Среднее время счета алгоритма составляет около 1,5с. Относительный вклад этого алгоритма в полное время работы триггера L2 показан на рисунке 88.

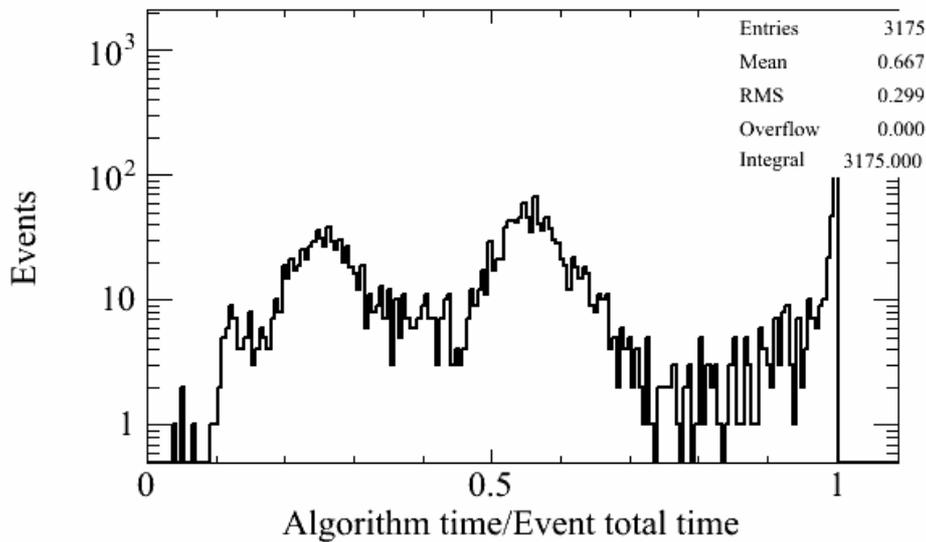


Рисунок 88 - Относительное время счета алгоритма триггера высокого уровня В-физики EF_mu4Tmu6_Vmtmuh_v2 с учетом всех каналов отбора для редких полулептонных распадов в последнем сеансе набора данных в конце 2012 г., определенное по отношению к полному времени расчета триггера HLT.

Из него следует, что присутствует заметная доля случаев, когда данный алгоритм определяет практически полное время счета, что нежелательно.

Среднее значение относительного вклада этого алгоритма триггера В-физики `VmuuX` в полное время счета триггера L2 составляет примерно 1/3 (0,667). Увеличение порога регистрации обоих мюонов в паре до 6 ГэВ, т.е. переход к использованию опции триггера `2mu6_VmuuX`, исправляет отмеченный недостаток (см. рисунок 89). При этом среднее значение относительного вклада времени счета этого триггера в полное время триггера L2 составляет только ~40%.

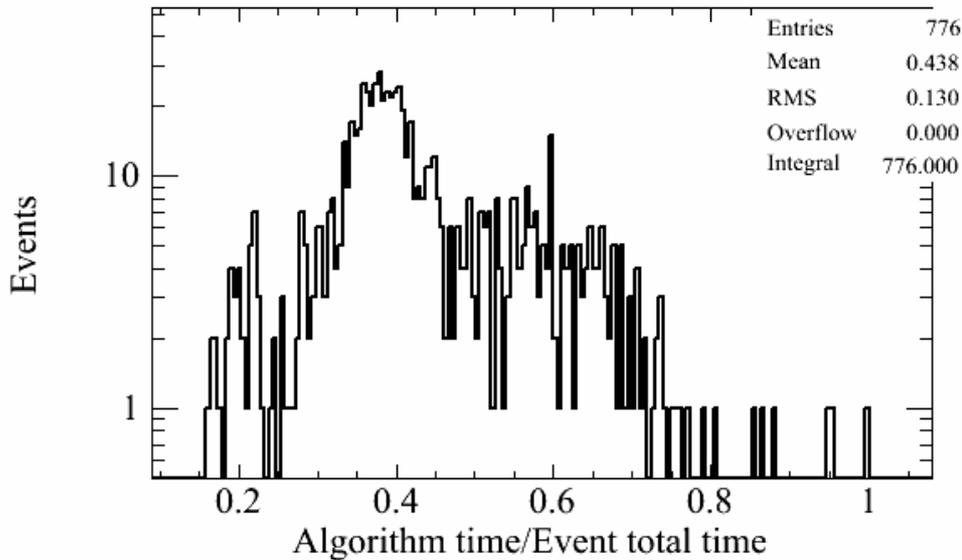


Рисунок 89 - Относительное время счета триггерного алгоритма для порогового значения поперечного импульса мюона 6 ГэВ для двух мюонов `2mu6_VmuuX`.

16.2. Модификация алгоритма триггера В-> `muuX` для работы в условиях повышенной светимости

Для дальнейшего изучения эффективности нового триггерного алгоритма и других его характеристик, в частности, влияния наложения первичных событий (*pile-up*) на его работу, были подготовлены наборы данных Монте-Карло для полулептонных распадов В-мезонов, которые он призван отбирать.

16.2.1. Новая опция триггера В-> `muuX` для отбора событий с распадами $B_c^+ \rightarrow \mu\mu D_s^{(*)+}$

Эти распады также подавлены в Стандартной Модели, т. к. могут происходить только посредством нейтральных слабых токов, меняющих аромат, и поэтому особенно чувствительны к проявлениям Новой Физики в петлевых диаграммах [30,31].

Разработанная опция алгоритма триггера высокого уровня $B \rightarrow \mu\mu X$ для отбора событий с распадами $B_c^+ \rightarrow \mu\mu D_s^{(*)+}$ (включая зарядово сопряженные распады) в целом повторяет логику работы алгоритмов отбора других распадов $B \rightarrow \mu\mu X$, описанную в разделах 14 и 15. Принципиальное различие состоит в том, что в случае рассматриваемого распада производится комбинирование пары мюонов с тремя треками из внутреннего детектора, а не с одним или двумя, как это делалось в случае распадов $B^+ \rightarrow \mu\mu K^+$, $B_s \rightarrow \mu\mu\phi(K^+K^-)$, $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+\pi^-)$ и $\Lambda_b \rightarrow \mu\mu\Lambda(p\pi^-)$. Это приводит к существенному увеличению числа возможных комбинаций и предъявляет повышенные требования к скорости работы алгоритма.

Отбор кандидатов распадов $B_c^+ \rightarrow \mu\mu D_s^{(*)+}$ в триггере второго уровня производится на основе инвариантных масс трековых комбинаций, а в фильтре событий дополнительно производится фитирование вторичных вершин распадов B_c^+ и D_s^+ мезонов. При этом пары мюонов отбираются во всём кинематически разрешённом диапазоне масс. Это позволяет отбирать как указанные полулептонные распады, так и резонансные распады с таким же конечным состоянием, идущие через промежуточные состояния чармония (J/ψ , $\psi(2S)$) в пары мюонов, которые имеют существенно большие парциальные ширины и могут наблюдаться уже по данным, набранным АТЛАС в 2012 году. Кроме того, нижнее пороговое значение инвариантной массы пяти треков установлено на уровне 1800 МэВ, что позволяет помимо прямых распадов B_c^+ в $D_s^{(*)+}$ отбирать и события с распадами вида $B_c^+ \rightarrow B_s(\rightarrow D_s^{(*)+}\mu X_1)\mu X_2$, происходящие через промежуточный B_s мезон.

Разработанный алгоритм был протестирован на специально подготовленных модельных данных для сигнального распада $B_c^+ \rightarrow \mu\mu D_s^{*+}$. Эффективность отбора сигнальных событий была найдена приемлемой и согласующейся с предварительными ожиданиями.

На рисунках 90, 91 показаны спектры инвариантных масс кандидатов D_s и B_c , реконструируемых в триггере второго уровня, в случае использования двух различных алгоритмов трекинга.

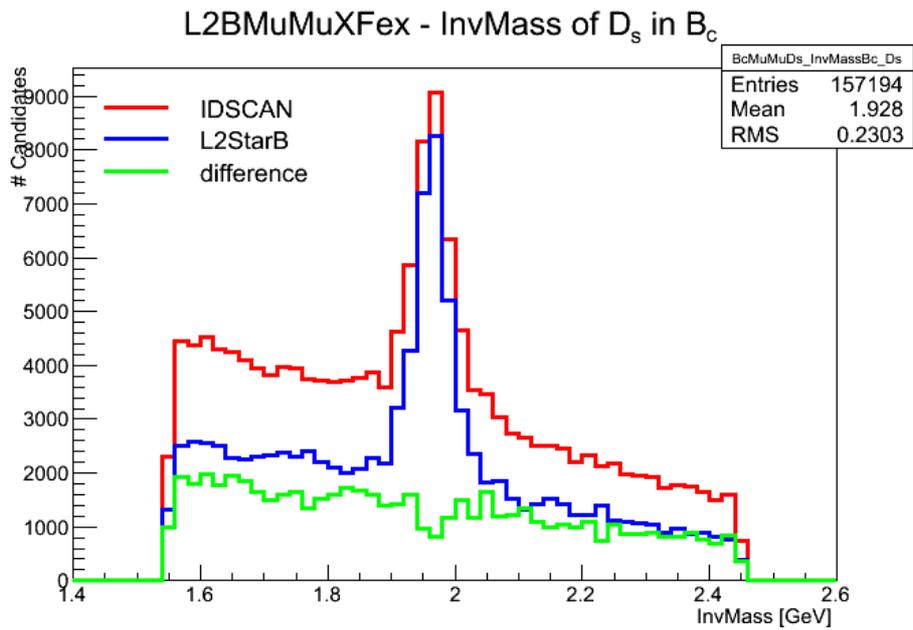


Рисунок 90 - Распределение измеряемой триггером инвариантной массы кандидата D_s при использовании различных алгоритмов трекинга в триггере второго уровня: IDSCAN (красная линия), L2StarB (синяя) и их различие.

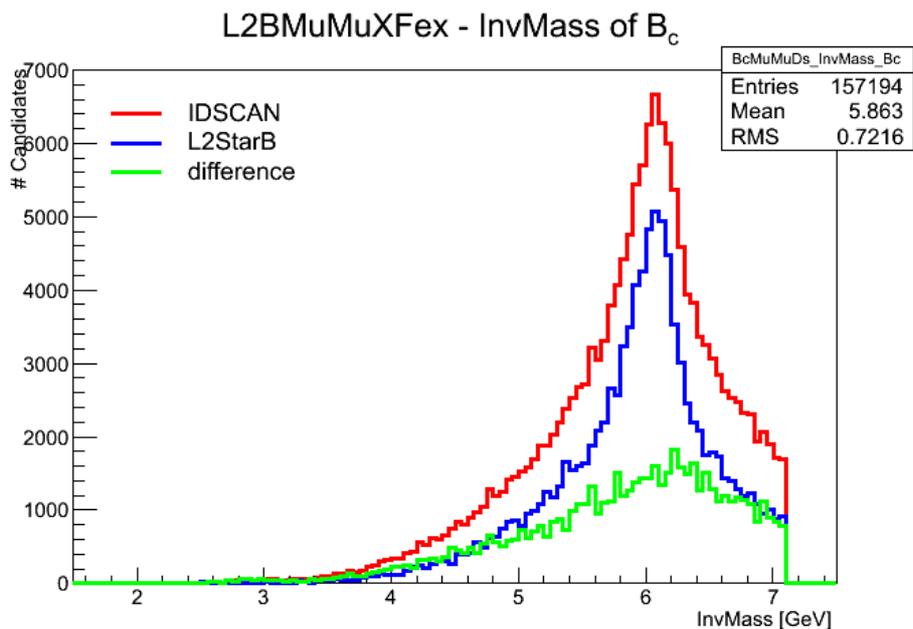


Рисунок 91 - Распределение измеряемой триггером инвариантной массы кандидата B_c при использовании различных алгоритмов трекинга в триггере второго уровня: IDSCAN (красная линия), L2StarB (синяя) и их различие.

Видно, что использование более совершенного алгоритма L2StarB позволяет существенно снизить уровень фона, не снижая эффективности отбора сигнальных событий.

Величина потоков событий на выходе триггера находилась на приемлемом уровне. Также значительная часть отбираемых им событий

удовлетворяли одновременно критериям отбора, применяемым в других ветках триггера $B \rightarrow \mu\mu X$, в результате чего итоговое увеличение потока событий оказалось незначительным.

После всех необходимых тестов разработанный триггерный алгоритм был включён в работу по отбору событий онлайн с ноября 2012 г., начиная с периода J2 работы детектора.

16.2.2. Анализ распада $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+\pi^-)$ с учётом эффективности триггера

Канал распада $B^0 \rightarrow \mu\mu K^*(K^+\pi^-)$ представляет интерес с точки зрения проверки предсказаний Стандартной Модели и поиска возможных отклонений от неё – в частности, при анализе угловых распределений продуктов распада. Для учёта влияния акцептанса установки при сравнении экспериментальных распределений с теоретическими предсказаниями в анализе использовались данные, полученные с использованием Монте-Карло моделирования. При этом необходимо тщательно учесть все особенности отбора событий системой триггера установки. Для этого сначала реконструированные события данного канала распада классифицировались согласно частоте, с которой они отбирались определённым типом триггера. В Таблице 7 представлен итеративный список триггерных 14 наиболее эффективных сигнатур (события, зарегистрированные очередным триггером, исключались из дальнейшего рассмотрения).

Таблица 7. Итеративный отбор 14 наиболее эффективных триггеров.

| Iteration | Most effective trigger | Events recorded | Events left |
|-----------|--------------------------|-----------------|-------------|
| 1 | EF_mu4Tmu6_DiMu | 445 | 1078 |
| 2 | EF_2mu4_Bmumux | 411 | 667 |
| 3 | EF_mu18_MG_medium | 212 | 455 |
| 4 | EF_mu10_Jpsimumu | 119 | 336 |
| 5 | EF_2mu4_DiMu | 71 | 265 |
| 6 | EF_mu6_Jpsimumu_tight | 69 | 196 |
| 7 | EF_2mu4T_Bmumux | 42 | 154 |
| 8 | EF_mu4mu6_DiMu | 28 | 126 |
| 9 | EF_2mu10_loose | 16 | 110 |
| 10 | EF_mu18_L1J10 | 13 | 97 |
| | EF_mu6_Jpsimumu | 10 | 87 |
| | EF_mu4_DiMu | 9 | 78 |
| | EF_mu18 | 7 | 71 |
| | EF_mu15_mu10_EFFS_medium | 10 | 61 |

Около 60% реконструированных событий распада были зарегистрированы триггерными алгоритмами EF_mu4mu6_DiMu и EF_2mu4_Bmumux, созданными для регистрации таких типов событий.

Для большинства триггерных алгоритмов (Таблица 8) во время работы установки применялся коэффициент масштабирования ($scale\ factor = X$ – для дальнейшей обработки сохранялось только одно из X событий).

Таблица 8. Коэффициенты масштабирования (отбора), применявшиеся во время работы установки (колонка 3) и для сравнения с Монте-Карло (колонка 5).

| Iteration | Most effective trigger | Events recorded | Events left |
|-----------|--------------------------|-----------------|-------------|
| 1 | EF_mu4Tmu6_DiMu | 445 | 1078 |
| 2 | EF_2mu4_Bmumux | 411 | 667 |
| 3 | EF_mu18_MG_medium | 212 | 455 |
| 4 | EF_mu10_Jpsimumu | 119 | 336 |
| 5 | EF_2mu4_DiMu | 71 | 265 |
| 6 | EF_mu6_Jpsimumu_tight | 69 | 196 |
| 7 | EF_2mu4T_Bmumux | 42 | 154 |
| 8 | EF_mu4mu6_DiMu | 28 | 126 |
| 9 | EF_2mu10_loose | 16 | 110 |
| 10 | EF_mu18_L1J10 | 13 | 97 |
| | EF_mu6_Jpsimumu | 10 | 87 |
| | EF_mu4_DiMu | 9 | 78 |
| | EF_mu18 | 7 | 71 |
| | EF_mu15_mu10_EFFS_medium | 10 | 61 |

Это было вызвано необходимостью сохранить величину потока событий в рамках возможности его обработки и сохранения системой сбора информации. Эти коэффициенты необходимо учитывать при использовании смоделированных событий. В Таблице 8 приведены значения коэффициентов масштабирования для триггеров, использованных в анализе. Значения определялись с использованием базы данных, содержащей всю информацию о параметрах установки во время её работы, включая состояние триггерной системы (сеанс 2011 года). Последняя колонка содержит значения коэффициентов отбора, которые применялись при создании выборки Монте-Карло событий, адекватно отражающей условия отбора триггером реальных событий.

На рисунке 92 показаны результаты сравнения экспериментального распределения по массе восстановленного В-мезона (точки) и результатов Монте-Карло моделирования (гистограммы).

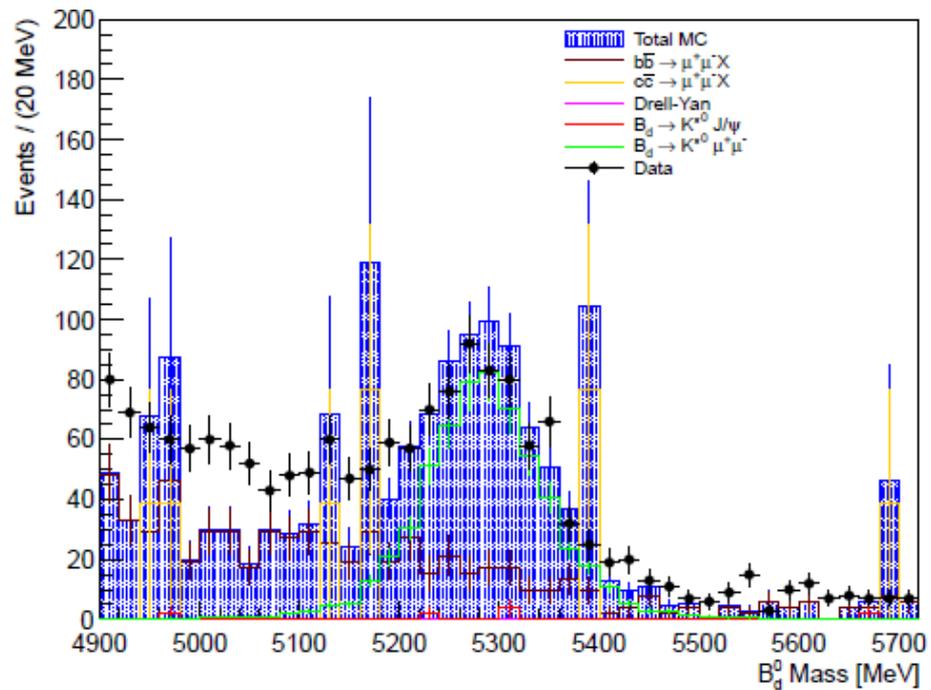


Рисунок 92 - Сравнение экспериментальных данных и результатов Монте-Карло моделирования после отбора и наложения триггерных условий.

Согласие в области сигнального пика достигается только при учёте триггерных условий. Эти условия также учитывались при определении акцептанса экспериментальной установки для определения угловых распределений продуктов распада. Результаты анализа опубликованы в работе [32].

16.2.3. Сравнительный анализ эффективности отбора событий распадов В-мезонов триггерными алгоритмами второго уровня L2_Dimu_L2starV и L2_2mu4T_Vmumu

При мониторинге данных 2012г. было замечено систематическое уменьшение измеряемого времени жизни В-мезонов, которое ранее согласовалось с мировыми значениями. В таблице 9 показана величина эффекта для триггера 2mu4(T)_Jpsimumu при сравнении результатов 2011 и 2012 гг.

Таблица 9. Измеренные времена жизни В-мезонов.

| τ_{B_d} [пс] | 2011 | 2012 |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Все триггеры | 1.511 ± 0.005 | 1.458 ± 0.007 |
| $2\mu 4(T)_{J\psi\text{mumu}}$ | 1.487 ± 0.006 | 1.383 ± 0.008 |
| $2\mu 4T(T)_{DiMu_L2StarB(SiTrack)}$ | 1.529 ± 0.015 | 1.494 ± 0.049 |

Использование нового трекового алгоритма L2starB в триггерной цепочке позволило исправить наблюдаемый систематический эффект для каналов, применяющий триггер на J/ψ-мезоны. Стояла задача проверить применимость этого трекового алгоритма и для отбора редких распадов В-мезонов. Результаты сравнения работы двух триггерных цепочек, один, использующих трековый алгоритм IDscan, входящий в цепочки триггера L2_2mu4T_Bmumu, и второй Dimu_L2starB, использующих трековый алгоритм SiTrack, показали, что второй вариант триггера может быть использован при отборе редких распадов В-мезонов. На рисунке 93 показано сравнение результатов расчетов для этих двух триггерных алгоритмов для распределений по поперечному импульсу В-мезона.

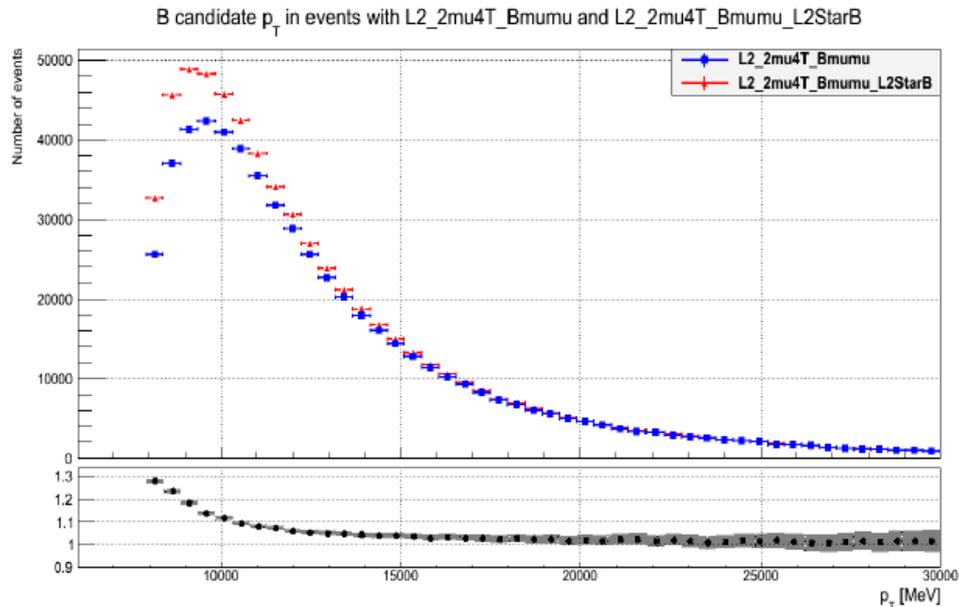


Рисунок 93 - Распределения по поперечному импульсу В-мезонов для разных трековых алгоритмов для триггеров редких распадов.

Видно, что новый трековый алгоритм триггера позволяет отобрать дополнительное количество событий, отвечающих редким распадам. Из рисунка 94 видно, что события эффективнее добавляются при относительно большом времени жизни В-мезонов.

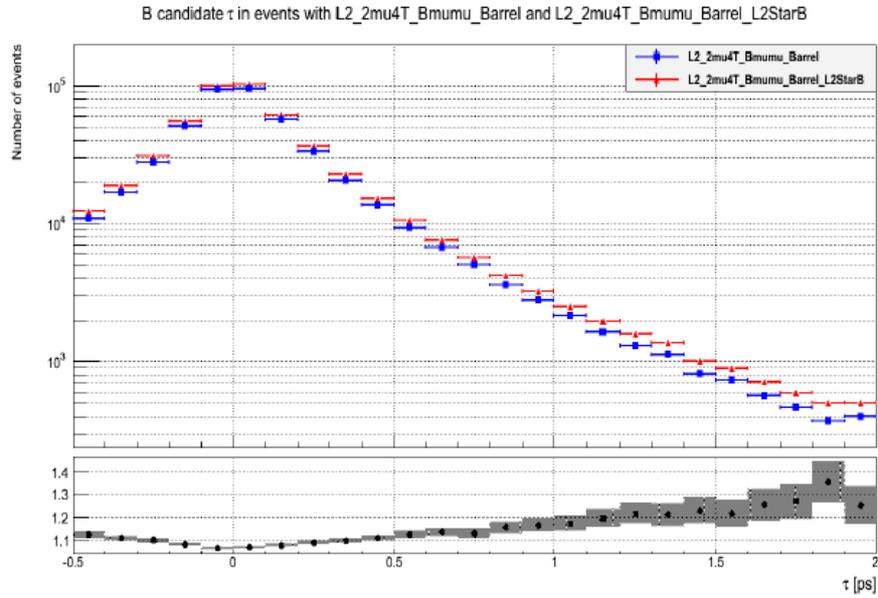


Рисунок 94 - Распределения времен жизни отобранных кандидатов в редкие распады В-мезонов.

Подробное сравнение двух триггеров для большого количества наблюдаемых представлено в работе [33].

Влияние наложения первичных событий (pile-up) на переменные, используемые в анализе по поиску редкого распада $B_s \rightarrow \mu\mu$ для второй половины данных 2011 г. исследовано в работе [34]. Показано, что в исследованном диапазоне числа первичных вершин зависимость переменной изолированности, в первую очередь зависящей от числа первичных вершин, незначительно.

16.3. Определение потоков событий и эффективности для триггера дважды и трижды тяжелых барионов путем моделирования

В рамках разработки триггера высокого уровня для регистрации дважды и трижды тяжелых барионов, проведён поиск Ξ_b и Ω_b барионов в их распадах $\Xi_{bsd} \rightarrow \Xi_{ssd} + J/\psi$ и $\Omega_{bss} \rightarrow \Omega_{sss} + J/\psi$. Для поиска были использованы данные коллаборации ATLAS, собранные в 2011-2012 гг.

На рисунке 95 показано распределение по инвариантной массе $M(\Xi^- J/\psi)$ для отобранных кандидатов. В этом распределении хорошо виден сигнал от Ξ_b^- бариона.

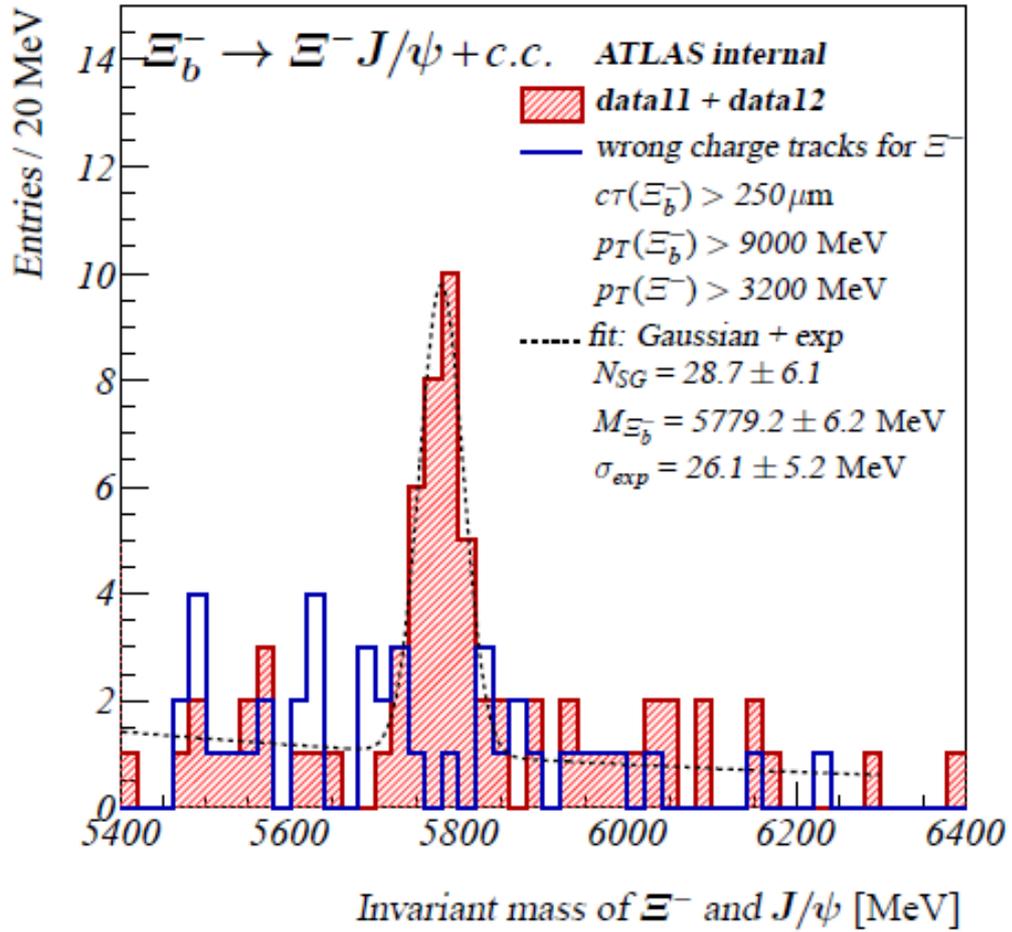


Рисунок 95 - Распределение по инвариантной массе $M(\Xi^- J/\psi)$ для отобранных кандидатов в Ξ_b^- барионы.

Использование полной статистики данных сотрудничества ATLAS, собранных в 2011-2012 г.г., должно позволить изучить свойства Ξ_b^- бариона и идентифицировать сигнал рождения Ω_b^- барионов.

Для триггерования дважды и трижды тяжёлых барионов найдено целесообразным проводить поиск Ξ^- и Ω^- барионов в триггере высокого уровня при выделении событий с 2 и 3 мюонами. Это не приведет к нежелательному увеличению потока регистрируемых событий, но позволит достичь необходимой эффективности регистрации барионов. Данные события будут использованы как для прямой реконструкции распадов $\Xi_{bsd}^- \rightarrow \Xi_{ssd}^- + J/\psi$ и $\Omega_{bss}^- \rightarrow \Omega_{sss}^- + J/\psi$, так и для поиска каскадных распадов типа $\Omega_{ccc}^- \rightarrow \Omega_{ccs}^- + \pi^+ \rightarrow \Omega_{css}^- + \pi^+ + \pi^+ \rightarrow \Omega_{sss}^- + \pi^+ + \pi^+ + \pi^+$. Описание программы исследований приведено в [24] и цитированной там литературе.

17. Тестирование алгоритма триггера высокого уровня $B \rightarrow \mu\mu X$ для повышенной светимости

17.1. Оптимизация алгоритма триггера к условиям повышенной светимости

Исследования в эксперименте ATLAS ведутся в условиях постоянного повышения светимости коллайдера. Это требует последовательной оптимизации и модификации триггеров, в том числе триггера B -физики. Подготовка к набору данных в следующем сеансе в 2015г. после длительной остановки коллайдера требует значительного обновления программного обеспечения триггера $B \rightarrow \mu\mu X$. Это обусловлено изменением структуры внутреннего детектора в связи с установкой нового дополнительного слоя пиксельных детекторов, расположенных ближе к оси пучка (IBL с радиусом 3,3 см в дополнение к B -слою с радиусом 5 см), и изменением структуры триггера путем объединения двух элементов триггера высокого уровня L2 и EF в единый уровень HLT. Важным фактором является также учет изменения порогов, или меню триггера, для удержания потоков событий на приемлемом уровне (75 кГц для триггера первого уровня и 400 Гц для триггера высокого уровня).

Введение IBL [35] во внутренний детектор и, соответственно, новой программы реконструкции, улучшит возможности эксперимента по реконструкции треков, первичных и вторичных вершин и повысит устойчивость к повышенной светимости и увеличению числа наложенных событий (pile-up). На рисунке 96 приведены разрешения параметров треков мюонов с импульсами 1, 5 и 100 ГэВ в зависимости от псевдобыстроты η для существующего дизайна внутреннего детектора и с включением IBL без учета наложения событий.

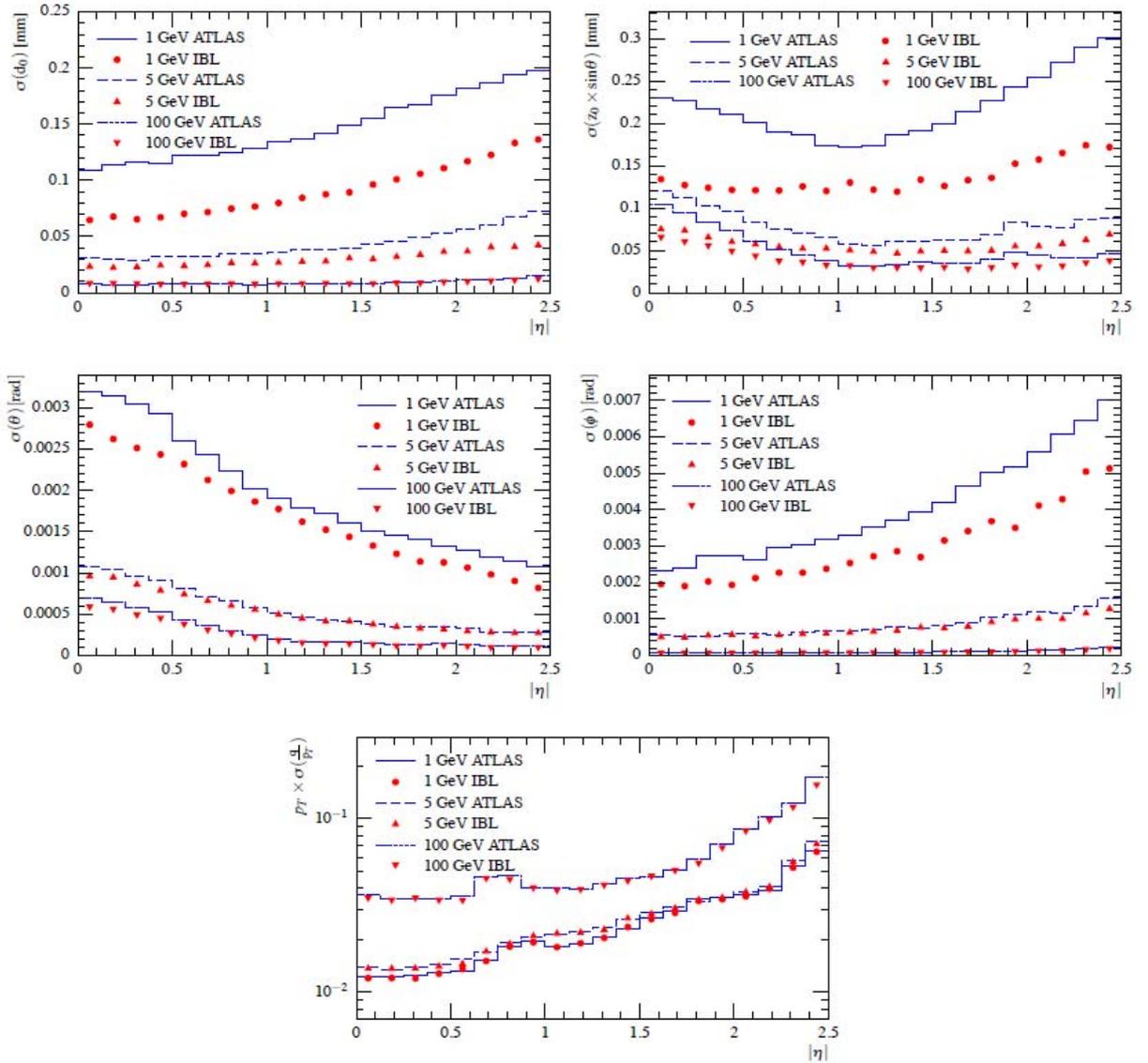


Рисунок 96 - Разрешение параметров треков одиночных мюонов с импульсами 1, 5 и 100 ГэВ в зависимости от псевдобыстроты $|\eta|$ для внутреннего детектора в первом сеансе работы ЛНС (без IBL) и с включением IBL без учета наложения событий: поперечный прицельный параметр d_0 (верхний слева), продольный прицельный параметр $z_0 \sin\theta$ (верхний справа), пространственный угол θ (средний слева), азимутальный угол ϕ (средний справа), относительная погрешность в определении кривизны трека $P_T/\sigma(q/P_T)$, где q – заряд частицы [31].

Из рисунка видно, что наибольшее улучшение параметров ожидается для точности измерения прицельных параметров треков. Это является следствием малого радиуса и большей гранулярности по продольному направлению z детекторов IBL. Изменения точности измерения кривизны невелики, так как полная длина трека практически не изменилась.

Повышение точности измерения прицельных параметров треков должно обеспечить выигрыш при реконструкции вершин и устойчивость к влиянию наложения событий при увеличении светимости.

Эти эффекты отчетливо демонстрируют рисунки 97 и 98.

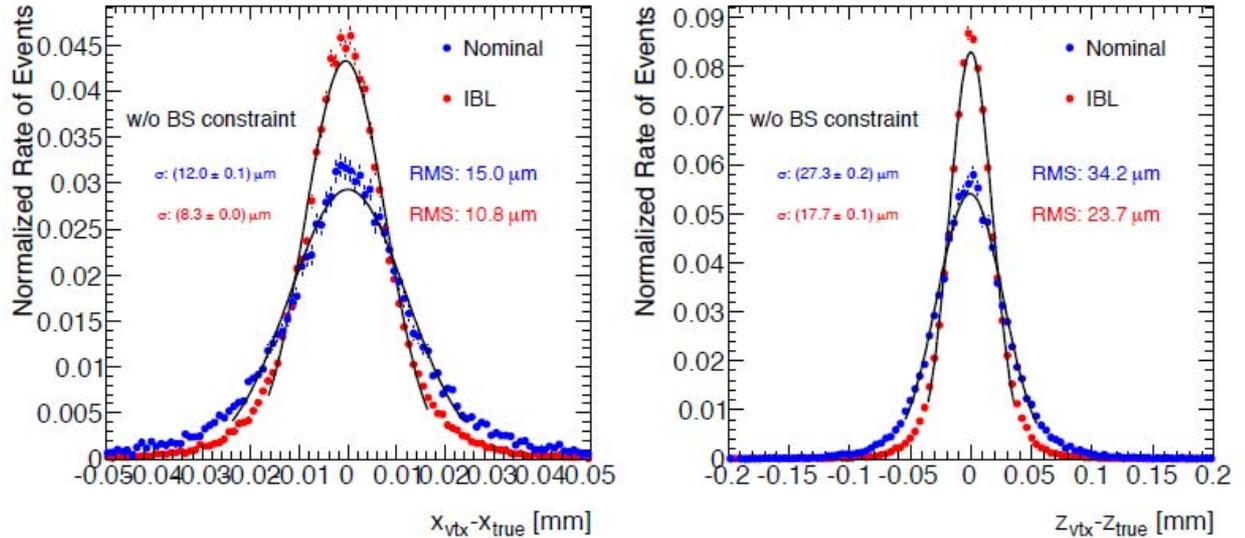


Рисунок 97 - Разрешения реконструкции координат первичных вершин по осям x и z для событий с рождением пары топ кварков без учета ограничений на область пучка и наложения событий без IBL и с включением IBL [31].

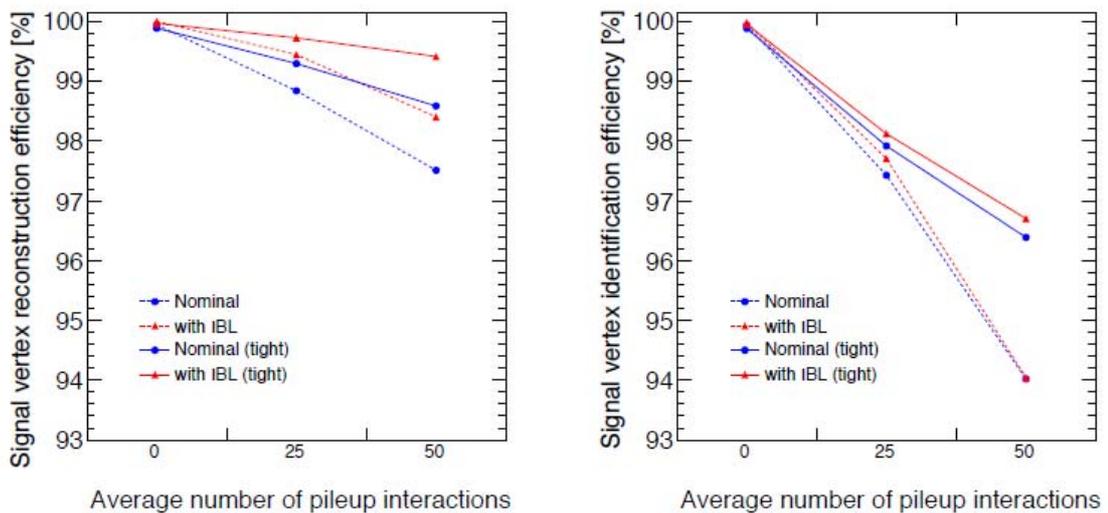


Рисунок 98 - Эффективность реконструкции первичных вершин в событиях с рождением пары топ кварков при наличии IBL и без IBL в зависимости от среднего числа наложенных событий (слева) и эффективность правильной идентификации первичной вершины рождения топ пары при использовании алгоритма ΣP_{τ}^2 (справа) [31].

На первом рисунке приведены разрешения при определении координат первичных вершин по поперечной к пучку оси x и по продольной оси z для внутреннего детектора без IBL и с включением IBL. В поперечном

направлении разрешение улучшается в 1,5 раза с 15 мкм до 11 мкм, в продольном от 34 мкм до 24 мкм. С учетом ограничений на область пучка разрешение в поперечной плоскости улучшается до 8 мкм. Это существенно повышает возможности идентификации вторичных вершин от распадов b -кварков, что важно для измерений B -физики и поиска редких распадов B -мезонов, как и для идентификации b -струй.

Реконструкция треков в условиях большого числа наложенных событий при высокой светимости должна быть устойчивой по отношению к появлению большого комбинаторного фона ложных треков. Жесткие требования к условиям реконструкции максимально снижают этот эффект, но при этом уменьшается эффективность реконструкции треков.

На рисунке 98 показано, что эффективность реконструкции первичных вершин при наличии IBL увеличивается по сравнению с существующим дизайном при увеличении числа наложенных событий. Последнее значение количества таких событий, равное 50, соответствует светимости $2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Следует отметить, что введение IBL существенно улучшает реконструкцию прицельных параметров именно для треков, используемых в B -физике, т.е. с относительно малыми поперечными импульсами. Это видно из данных на рисунке 99, где изменение разрешения в определении прицельных параметров показано в зависимости от величины поперечного импульса трека.

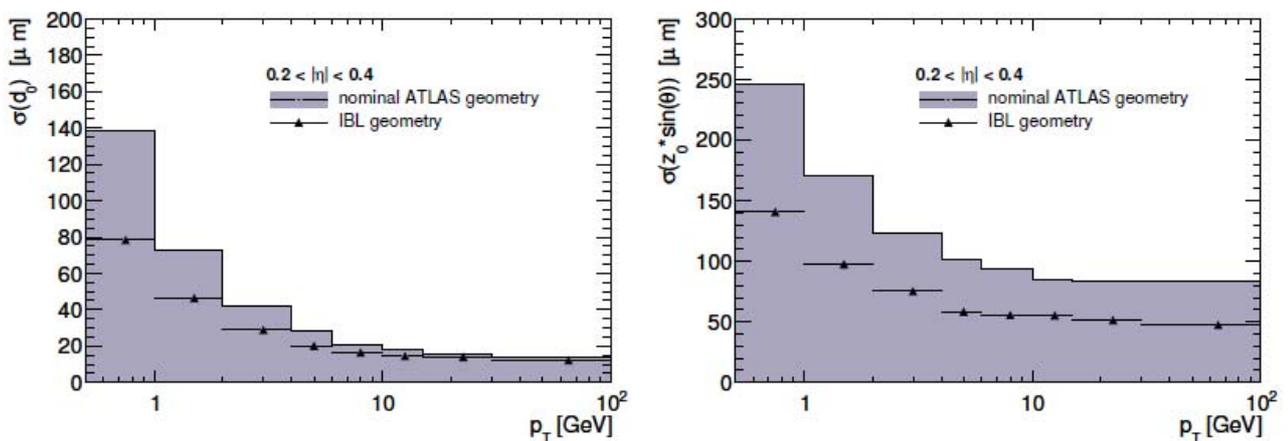


Рисунок 99 - Разрешение прицельных параметров d_0 и $z_0 \sin \theta$ в зависимости от величины поперечного импульса трека при существующем дизайне (темная гистограмма) и при наличии IBL (точки).

Расчеты выполнены для событий с рождением пары топ кварков без учета наложения событий. Можно ожидать, что изменения, связанные с IBL, слабо скажутся на разрешении по эффективной массе В-мезонов, но окажутся существенными для измерений их времени жизни. Изменения в подавлении фоновых событий при поиске редких распадов В-мезонов предстоит оценить.

Реконструкция треков в триггере происходит по другим алгоритмам, чем в оффлайн анализе, результаты которого приведены выше. Первые результаты введения IBL в алгоритмы реконструкции на уровне триггера второго уровня и фильтра событий приведены на рисунках 100 и 101 (по результатам ATLAS Week в июне 2013г.).

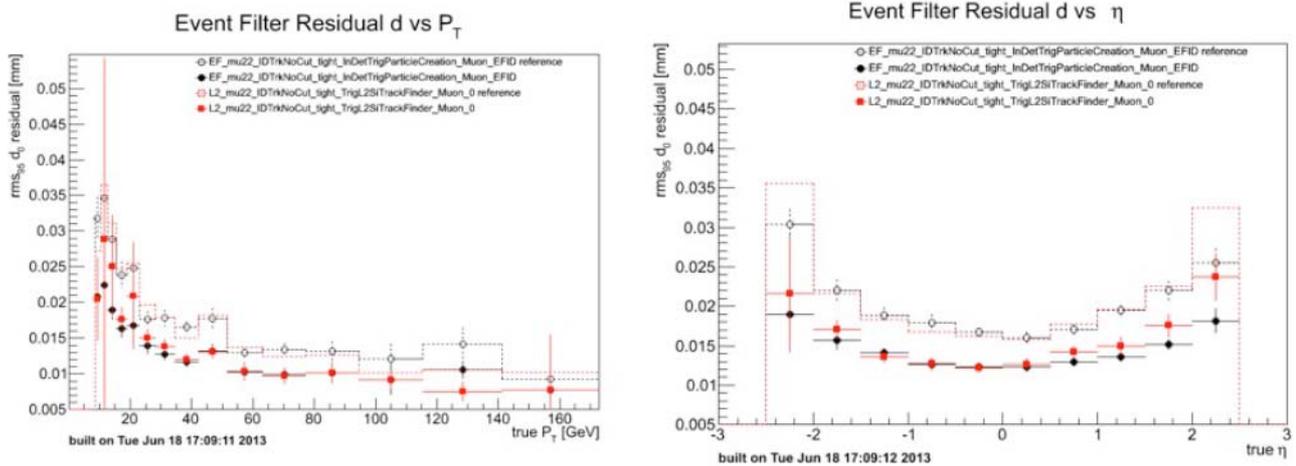


Рисунок 100 - Разрешения измерения поперечного прицельного параметра d_0 в зависимости от поперечного импульса трека (слева) и псевдобыстроты (справа) показаны для триггера L2 (красные точки) и фильтра событий EF (черные точки) в существующем дизайне детектора и при введении IBL в миллиметрах.

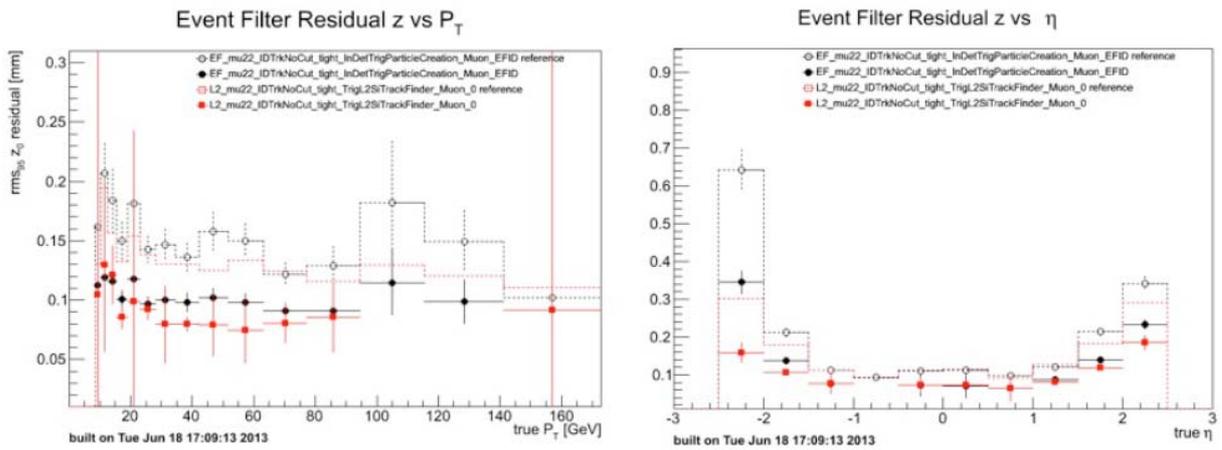


Рисунок 101 - То же, что на рисунке 100, но для продольного прицельного параметра.

Они показывают, что наблюдается существенное улучшение точности определения прицельных параметров треков и при реконструкции в триггере высокого уровня.

Модификация триггера к 2018 г. должна включить новые модули мюонной системы (New Small Wheels [32]), что повысит эффективность выделения мюонов с относительно малыми поперечными импульсами и обеспечит дальнейшее развитие топологических алгоритмов триггера.

Важнейшей модификацией триггера к сеансу 2015 г. будет служить слияние L2 и фильтра событий EF при реконструкции треков в триггере [33]. Новая схема организации программного обеспечения при реконструкции треков в триггере приведена на рисунке 102.

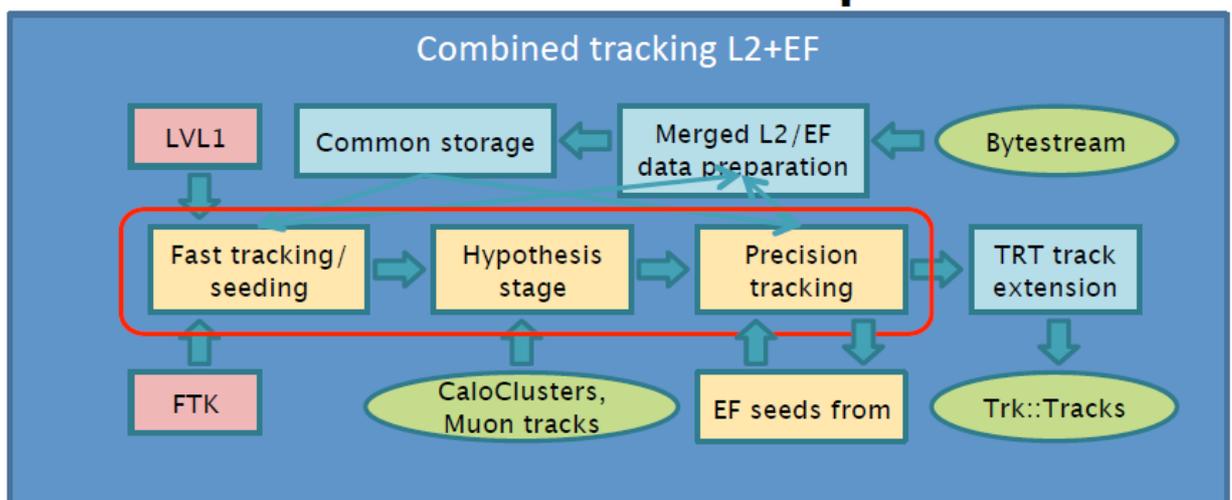


Рисунок 102 - Новый дизайн трекинга при объединении триггера L2 и фильтра событий EF.

В ней будет использоваться быстрый трекинг L2Star 2.0, прецизионный трекинг EFID. В перспективе будет использоваться также быстрый трекинг FTK для поиска треков во внутреннем детекторе. Все эти разработки программного обеспечения планируется ввести в алгоритмы триггера В-физики $B \rightarrow \mu\mu X$ до конца 2013 г.

17.2. Определение потоков событий и эффективностей триггера высокого уровня в условиях повышенной светимости

Основное меню триггера В-физики в 2015 г. будет такое же, как и в 2012 г., поскольку набор исследовательских задач сохраняется прежним. При этом будут уточняться пороги для поперечных импульсов мюонов и потоки событий для каждого из анализов, поскольку триггер высокого уровня в 2015 г. будет работать в режиме предельного использования ресурсов, подобно триггеру первого уровня. Регулирование потоков на уровне триггера высокого уровня будет осуществляться за счет повышения требований к качеству восстановления вторичных вершин, введения дополнительных порогов или отбора в центральной части установки на уровне HLT, использования топологий событий. Будет уточняться сценарий В-триггера в ходе одного цикла соударений протонных пучков. На рисунке 103 приведен пример сценария отбора событий с введением коэффициента деления частоты для триггера в начале цикла соударений.

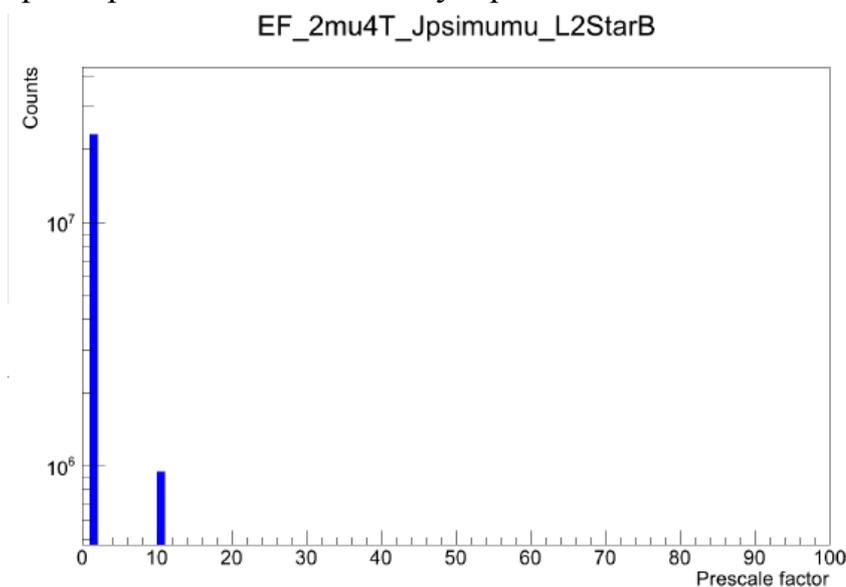


Рисунок 103 - Коэффициент деления частоты в цикле столкновений протонов для периодов H I J L для триггера EF_2mu4T_Jpsimumu.

Для работы при 13 ТэВ и светимости $2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при 25 нс промежутках между сгустками рассматриваются два сценария для потока событий на выходе HLT: 1 кГц и 500 Гц [38]. При этом нет отдельного потока для В-физики. Общий поток В-физики в настоящее время оценивается на уровне ~ 130 Гц. Стоит задача уменьшить его примерно в 2 раза. Он использует мюонный триггер первого уровня MU20 и 2MU11 (пороги 20 ГэВ для поперечного импульса одиночного мюона и 11 ГэВ для пары мюонов) с потоками около 30 и 1,6 кГц, соответственно, а также 3MU6 с очень малым потоком событий. При введении топологического отбора будут использоваться триггеры с более низкими порогами для пар мюонов. В таблице 10 приведены ожидаемые потоки событий для 2015г., отнесенные к 13 ТэВ, но с эффективностями, соответствующими работе при 8 ТэВ и светимости $5 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (данные R&P Week, 1 августа 2013г., [39]).

Таблица 10. Ожидаемые потоки событий HLT для В-физики в 2015 г. для двух мюонного триггера в Гц.

B-Physics HLT

| L1 | HLT | HLT rate [Hz] |
|--|----------------------------------|-----------------------------------|
| 2MU6_TOPO | (2mu6) | (481) |
| | 2mu6_Bmumu | 10 |
| | 2mu6_Bmumux_v2 | 48 |
| | 2mu6_Jpsimumu | 63 |
| | 2mu6_Upsimumu | 14 |
| | Total | 110 (considering overlaps) |
| 2MU11 | (2mu11) | (55) |
| | 2mu11_Bmumu | 1.1 |
| | 2mu11_Bmumux_v2 | 5.5 |
| | 2mu11_Jpsimumu | 7.2 |
| | 2mu11_Upsimumu | 1.7 |
| Total | 13 (considering overlaps) | |
| 3MU6 | (3mu6) | 4.6 |
| | 3mu6_DiMu/Tau/Jpsi | 2.3 |
| Supporting triggers (each 1Hz rate): 2muX_DiMu, 2muX_DiMu_noVtx_noOS, muX_Trk_Jpsi_loose, 2muX_Jpsimumu_IDTrkNoCut | | |

Суммарный поток в таблице 10 составляет 125 Гц и должен быть сокращен вдвое к концу 2014г., возможно и за счет повышения порогов триггеров.

18. Работы по жидкоаргоновому калориметру

В этом разделе изложены некоторые детали работ по исследованию модулей жидкоаргоновых (LiAr) калориметров на ускорителе У-70 ФГБУ ГНЦ ИФВЭ. Описание конструкции и характеристики существующего LiAr калориметра можно найти в работе [1]. Общий вид экспериментального модуля, в сборе с крышкой криостата, схематически показан на рисунке 104.

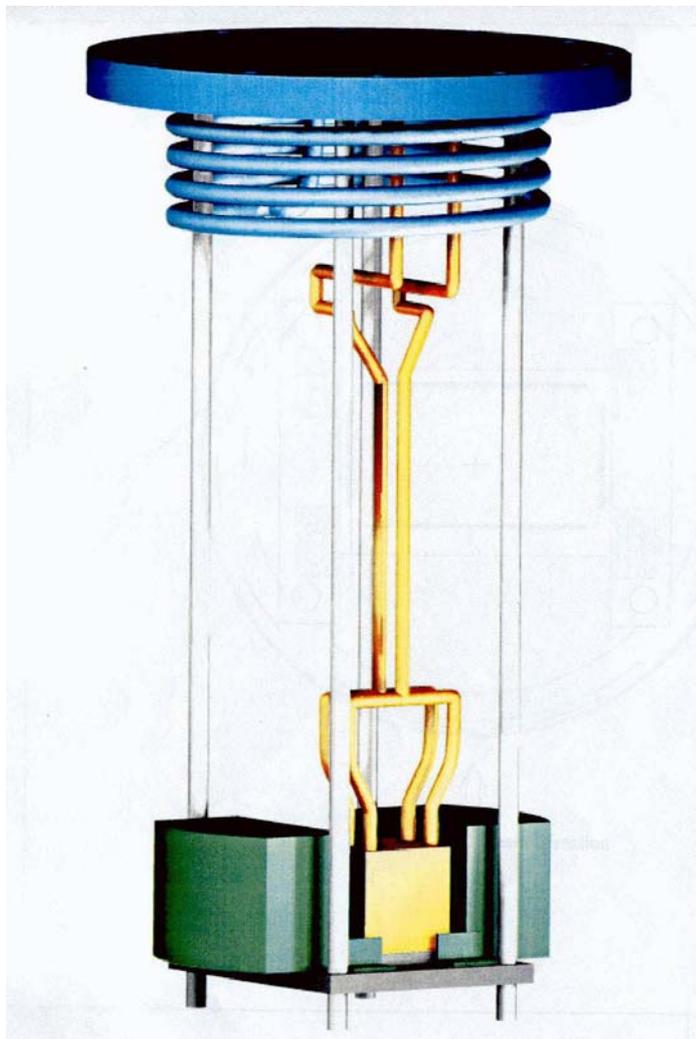


Рисунок 104 – Макет модуля жидкоаргонового калориметра, присоединённый к крышке криостата

18.1. Установка на канале 23 ускорителя У-70

Установка для исследования экспериментальных модулей жидкоаргоновых калориметров предназначена для работы с пучком протонов с интенсивностью от 10^6 до 10^{12} протонов/с. Интенсивность, соответствующая светимости LHC $10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, для модулей FCAL, ЕМЕС и НЕС равна $6,7 \cdot 10^9$, $8,9 \cdot 10^8$ и $4,8 \cdot 10^8$ протонов/с соответственно.

В состав установки входят следующие системы:

- 3 криостата с модулями жидкоаргоновых калориметров;
- система мониторинга интенсивности и положения протонного пучка;
- газопо-криогенная система, поддерживающая давление насыщенных паров над аргоном $1,5 \pm 0,2$ атм;
- система сбора данных;
- система измерения чистоты и температуры жидкого аргона;
- система высоковольтного питания, обеспечивающая измерение напряжения на электродах модулей жидкоаргоновых калориметров с точностью 3%.

Общий вид установки и схемы коммуникаций даны в приложении В. Инструкция по работе с криогеникой приведена в приложении Д.

18.2. Экспериментальные модули

При измерениях использовались модули торцевого электромагнитного (ЕМЕС), адронного (НЕС) и переднего (FCAL) калориметров. Структура модулей жидкоаргоновых калориметров (толщины поглотителей и электродов, величина зазора) и материалы, использованные при их изготовлении, соответствуют таковым, используемым в установке АТЛАС. Внешне все исследовавшиеся модули похожи друг на друга.

Эскизы представлены в приложении Г.

18.3. Методика исследования характеристик модулей

В ходе экспериментов измерялась форма сигналов с модулей жидкоаргоновых калориметров при различной интенсивности протонного пучка и различных напряжениях на электродах.

Интенсивность пучка варьировалась от 10^6 до 10^{12} протонов/с с шагом изменения в ~ 3 раза. Напряжение на электродах калориметров менялось от 50 до 2000 В, в зависимости от типа модулей калориметров. Сигналы с модулей калориметров регистрировались АЦП, идентичными используемыми в установке АТЛАС (частота дискретизации – 12,5 нс).

Для контроля параметров установки (высокого напряжения, температуры и чистоты жидкого аргона) и сбора данных с модулей жидкоаргоновых калориметров использовалось программное обеспечение, которое применяется в эксперименте АТЛАС.

18.3.1. Средства очистки и измерения чистоты аргона

Аргон с чистотой ~ 1 ppm из баллонов перед ожижением подвергался дополнительной очистке при помощи устройства Monotorr PF3C3R1.

Измерение чистоты аргона проводилось двумя способами: в жидкой фазе при помощи измерения сигнала от частиц из моноэнергетических радиоактивных распадов ^{241}Am и ^{207}Bi , и в газообразной фазе при помощи газоанализатора Illinois Instruments Model 912.

Результаты измерения обоими способами соответствовали друг другу с точностью 20%. Чистота аргона в криостатах при проведении экспериментов лежала в пределах 150-300 ppb.

18.3.2. Параметры пучка

Так как в ходе эксперимента интенсивность пучка меняется в очень широких пределах – от 10^6 до 10^{12} протонов/с, установка была оснащена детекторами, позволяющими мониторировать интенсивность (с точностью не хуже 10%) и положение пучка в этом диапазоне интенсивностей.

Таковыми устройствами являлись:

- 6 сцинтилляционных счётчиков (при интенсивности до 10^7 протонов/с);
- сцинтилляционный годоскоп H (положение и интенсивность пучка до $5 \cdot 10^7$ протонов/с);
- ионизационная камера IC (интенсивность $2 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^9$ протонов/с);
- камера вторичной эмиссии SEC (положение пучка и интенсивность более $5 \cdot 10^9$ протонов/с);
- черенковский счётчик СН (во всём диапазоне интенсивностей).

Так как интенсивность выведенного пучка сильно неравномерна во времени, а пространственный заряд в зазорах калориметров зависит от предыстории интенсивности (с характерным временем ~ 10 мс), необходим детектор, позволяющий измерять мгновенное значение интенсивности пучка с хорошим временным разрешением – менее 1 мс. В качестве такого прибора использовался черенковский счётчик, заполненный воздухом при атмосферном давлении. Он позволяет измерять интенсивность даже в отдельном сгустке частиц [40] (частота следования сгустков частиц в ускорителе У-70 составляет 6 МГц).

Абсолютная калибровка всех детекторов, измеряющих интенсивность, осуществлялась по измерению активации алюминиевой фольги за

длительный промежуток времени. Активация фольги измеряется по реакции $^{27}\text{Al}(p,3p3n)^{22}\text{Na}$, $^{22}\text{Na} \rightarrow \gamma$ (1275 кэВ), сечение которой равно $10,6 \pm 1,1$ мб.

Для точного измерения поперечного размера пучка протонов использовалась также дозиметрическая плёнка Gafchromic EBТ-2. Результаты этих измерений согласуются с другими, полученными при помощи сцинтилляционных годоскопов и камер вторичной эмиссии, и составляют 10 ± 1 мм.

19. Патентные исследования

Работы по модернизации установки АТЛАС, введенной в эксплуатацию несколько лет назад и, соответственно, создававшейся еще раньше, направлены на улучшение детекторов, принципы работы которых были разработаны очень давно (во временной шкале стремительного технического и технологического прогресса последних десятилетий).

Кроме того, работы по новым детекторам обычно принято публиковать в научной периодической печати, а не патентовать. Так, например, поступил Гейгер, опубликовавший в 1908 году описание своего счётчика (Proc. R. Soc. Lond. A (London) **81** (546) 141-161). Кто мог знать тогда, что в будущем, благодаря известным авариям в ядерной энергетике, счётчик станет широко используемым бытовым прибором.

В итоге поиска, проведённого на первом этапе контракта, были найдены работы теоретического характера, описывающие проблему поиска и регистрации ионизирующих частиц, но работ прикладного характера, защищенных патентами, близких исследуемым темам не обнаружено (см. Отчёт о патентных исследованиях в составе документации по первому этапу). На последующих этапах также не было выявлено патентных ограничений на работы по модернизации АТЛАС'а.

Все оборудование в рамках данного контракта разрабатывается в малотиражных сериях, для научных исследований, более того, для конкретной задачи - использования в установке АТЛАС. Другое использование не предусматривается и патентование не предполагается.

В связи с уникальностью установки АТЛАС компоненты для её модернизации коммерческим потенциалом не обладают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сотрудничестве с зарубежными партнёрами из институтов, участвующих в эксперименте АТЛАС, на четвёртом этапе контракта успешно выполнены следующие работы:

- Создан стенд и проведены испытания экспериментальных образцов FAST OR триггера; проведены испытания экспериментальных образцов основных компонент FAST OR триггера.
- Выполнены испытания облучательной установки и эталонных образцов по разработанной программе и методикам исследовательских испытаний. Выполнен анализ результатов испытаний.
- Проведено облучение и измерение характерных параметров тестируемых образцов.
- Выполнен второй HV тест перспективных материалов.
- Проведено тестирование прототипов микроканальных детекторов.
- Разработаны рекомендации по использованию результатов НИР для массового изготовления аппаратуры для исследований при повышенной светимости протон-протонных столкновений на установке АТЛАС.
- Подготовлены материалы для заявки на патент «Разработка детекторов с повышенной радиационной стойкостью».

Кроме того, с преобладающим участием иностранных партнеров выполнены следующие работы:

- Разработаны стенды испытаний детектирующих элементов трековых детекторов, выбранных для комплектации новых «малых колес» мюонного спектрометра АТЛАС.
- Разработан и опубликован технический проект новых «малых колес» установки АТЛАС.
- Разработана методика исследования электроники и материалов на облучательной установке, осуществлён выбор образцов для исследования.
- Проведено испытание прототипа триггера высокого уровня.

Работы выполнены в соответствии с техническим заданием и календарным планом контракта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 ATLAS. Detector And Physics Performance. Technical Design Report. CERN/LHCC/99-14, CERN/LHCC/99-15.
- 2 ATLAS Letter of Intend, Phase-I Upgrade, CERN-LHCC-2011-012, LHCC-I-020, December, 2011.
- 3 M.Mangano, The super-LHC, Contemp. Phys. 51 (2010) 211-231.
- 4 F.Gianotti, M.Mangano, T.Virdee et al., Physics potential and experimental challenges of the LHC luminosity upgrade, Eur. Phys. J. C39 (2005) 293-333.
- 5 V.V. Golikov et al., Large scale samples irradiation facility at the IBR-2 reactor. Nucl.Instrum.Meth.A411:330-336,1998; J.Ban et al., Radiation hardness tests of GaAs amplifiers operated in liquid argon in the ATLAS calorimeter. Nucl.Instrum.Meth.A594:389-394,2008.
- 6 Доклады на совещании, ATLAS LAr Week, June 2013 (Madrid).
- 7 <http://www.rogerscorp.com/documents/1850/acm/RO4400-Series-Prepreg-Data-Sheet-RO4450B-and-RO4450F-Prepregs.pdf>
- 8 <http://www.arlon-med.com/84N.pdf>
- 9 J. Dubbert et al.: Precision Drift-Tube Chambers for the ATLAS Muon Spectrometer at Super-LHC, NSS 2008. IEEE, p. 3233
- 10 RD51 Development of Micro-Pattern Gas Detectors Technologies, <http://rd51-public.web.cern.ch/RD51-Public/Welcome.html>
- 11 Instruments and Experimental Techniques, Vol. 38, No.5, Part 1 (1995), p.p.587-592.
- 12 Nuclear Physics B, 44 (1995) p.p.206-212
- 13 R.Fakhroutdinov Drift tubes with field shaping, ATLAS MUON Upgrade Workshop,CERN, <https://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confID=87676>
- 14 Letter of Intent for the Upgrade of the ATLAS Experiment – Muons System., ATLAS collaboration, October 21, 2011.
- 15 Borisov A.A. et al Wiring of tubes for full-scale BIL chamber prototype, ATLAS Note, ATL-MUON-97-143, CERN, 1997
- 16 Bezuglii V.D., Nagornaya L.L., Molecular Electronic Criteria for Selection of Radiation-Hard Scintillators, Nucl. Energy.1965,V19, p 490.
- 17 Бреховских В.В., Гладышев В.А., Васильченко В.Г. и др.,

- Исследование радиационной стойкости сцинтилляционных пластин и спектросмещающих волокон, ПТЭ 1992 № 2 С 95.
- 18 Васильченко В.Г., А.С. Соловьёв, Новые композиционные сцинтилляторы (в статических и динамических состояниях), ПТЭ, 1998, № 4, С 46.
 - 19 Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Основные положения. Экспериментальная техника и методы. М.: Наука, 1985. С. 95.
 - 20 Васильченко В.Г., Лапшин В.Г., Пересыпкин А.И., Новые результаты исследований радиационной стойкости пластических сцинтилляторов, ПТЭ, 1995, №5, С 85.
 - 21 Belyanchenko S.A. Britvich G.I. Glukhovskii B.M. et al, Radiation Hardness of Photomultipliers, Instrum. And Experim.. Techniques.1997. V 40. No 5. P. 615.
 - 22 The ATLAS Collaboration. The New Small Wheel Technical Design Report. CERN-LHCC-2013-xxx (в печати), см. также: ATL-COM-MUON-2013-013, <https://cds.cern.ch/record/1552351>
 - 23 L.Kurchaninov. “Mini-FCAL options”. Report at the ATLAS LAr meeting, December, 2012.
 - 24 Y.Chen, S.Wu, “Production of Triply Heavy Baryons at LHC”, JHEP 1108 (2011) 144, Erratum-ibid. 1109 (2011) 089.
 - 25 J. Beringer et al. (Particle Data Group), J. Phys. D**86**, 010001 (2012).
 - 26 ATLAS coll., “Observation of Ξ , Ω baryons and $K^*(890)$ meson production at $\sqrt{s}=7$ TeV”, ATLAS-CONF-2010-032, 2010.
 - 27 ATLAS coll., “Performance of the ATLAS Trigger System in 2010”, Eur.Phys.J.C72 (2012) 1849.
 - 28 “Performance of the ATLAS Muon Trigger in p-p collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, ATLAS-CONF-2010-095.
 - 29 ATLAS collaboration, “Expected performance of the ATLAS experiment”, CERN-OPEN-2008-020.
 - 30 I.Ahmed et al., “Analysis of $B_c \rightarrow D^*_s l^+ \Gamma$ in the Standard Model Beyond Third Generation”, arXiv: 1107.5694.
 - 31 A.Ahmed et al., “Comparative study of $B_c \rightarrow D^*_s l^+ \Gamma$ Decay in Standard Model and Supersymmetric Models”, arXiv: 1108.1058.
 - 32 ATLAS coll., «Angular analysis of $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ with the ATLAS Experiment», ATLAS-CONF-2013-038, 2013.
 - 33 С.Ю.Лобанов, Дипломная работа, МГУ, Москва, 2012г.

- 34 А.С.Маевский, Дипломная работа, МГУ, Москва, 2012г.
- 35 Insertable B-layer, ATLAS TDR 19, CERN/LHCC 2010-013.
- 36 ATLAS Letter of Intend Phase-I Upgrade, CERN-LHCC-2011-012, Dec. 2011.
- 37 J.Masik, ID Trigger LS1 activities, Talk 19.06.2013 ATLAS Week.
- 38 K.Karakostas, Talk 14.08.2013 at Rare B-decay subgroup meeting.
- 39 P.Reznicek, J.W.Walder, Talk for B-trigger group at B-physics meeting at P&P ATLAS Week, 1 Aug.2013.
- 40 S.P. Denisov, et al. Cherenkov counter for bunch intensity measurement., Journal of Instrumentation 5: P10012, 2010.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УТВЕРЖДАЮ



О.Л.Федин

Зав. лабораторией

кандидат физ.-мат. наук,

« 20 » августа 2013 г.

АКТ

создания стенда для испытаний экспериментальных образцов
компонентов FAST OR триггера.

Мы, нижеподписавшиеся:

старший научный сотрудник Головцов Виктор Леонтьевич,

старший научный сотрудник Уваров Лев Николаевич,

старший научный сотрудник Яцюра Валерий Иванович

настоящим удостоверяем завершение работ по созданию стенда для испытаний
экспериментальных образцов FAST OR триггера.

Конструкция и технические характеристики стенда удовлетворяют
требованиям, определяемым характером и объёмом испытаний
экспериментальных образцов FAST OR триггера.



Головцов В.Л.



Уваров Л.Н.



Яцюра В.И.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий»
(ФГБУ ГНЦ ИФВЭ)

Утверждаю:

Главный инженер



_____ А.А. Брагин

» _____ 2013 г.

РАЗОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ
«ПРОИЗВОДСТВО ПРЕЦИЗИОННЫХ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК
МАЛОГО (15 мм) ДИАМЕТРА»

СОГЛАСОВАНО:

Заместитель директора по
инновационной деятельности и
общим вопросам

Солдатов А.П.

Начальник отделения
экспериментальной физики

Зайцев А.М.

Начальник отдела охраны труда и
промышленной безопасности

Козлов Г.В.

Главный механик

Исайкин В.Н.

Главный энергетик

Хамин С.В.

Главный метролог

Сорокин Б.В.

Начальник ОНТИ

Михайлин В.Н.

Срок действия до 01.09.2014 г.

| СОДЕРЖАНИЕ | | стр. |
|-------------------|---|------|
| 1. | Общая часть | 145 |
| 2. | Порядок внесения изменений и дополнений в технологический регламент | 145 |
| 3. | Контроль за соблюдением технологического регламента | 146 |
| 4. | Общая характеристика подразделения. Назначение технологического процесса. | 147 |
| 5. | Характеристика исходного сырья, полуфабрикатов, готовой продукции и вспомогательных материалов. | 148 |
| 6. | Описание технологической схемы процесса. | 148 |
| 7. | Нормы технологического режима и метрологическое обеспечение | 149 |
| 8. | Контроль технологического процесса | 152 |
| 9. | Основные правила пуска и остановки производственного процесса при нормальных условиях | 152 |
| 10. | Возможные неполадки технологического процесса, их причины и способы устранения. | 153 |
| 11. | Основные правила безопасного ведения технологического процесса | 153 |
| 12. | Возможные аварийные ситуации и правила остановки производственного подразделения | 154 |
| 13. | Отходы производства, сточные воды и выбросы в атмосферу | 154 |
| 14. | Перечень инструкций и нормативно-технической документации обязательных для данного объекта | 156 |
| 15. | Технологическая карта | 157 |
| 16. | Маршрутный лист | 162 |
| 17. | Планировка помещений сектора больших трековых детекторов | 164 |
| 18. | Перечень оборудования, установленного в помещениях сектора больших трековых детекторов | 165 |
| 19. | Эскиз прецизионной дрейфовой трубки малого (15 мм) диаметра | 167 |
| 20. | Фото прецизионной дрейфовой трубки малого (15 мм) диаметра в сборе и ее комплектующих элементов | 168 |

1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1. Данный разовый технологический регламент является документом, относящимся к производству прецизионных дрейфовых трубок малого (15мм) диаметра, которыми, в соответствии с программой модернизации детектора АТЛАС, будут укомплектованы дополнительные мюонные камеры в области опорных структур этого детектора.

1.2. Технологический регламент является основным документом, определяющим режимы и порядок проведения операций технологического процесса, обеспечивающим выполнение требований конструкторской документации.

1.3. Безусловное соблюдение всех требований технологического регламента обязательно, так как обеспечивает получение готовой продукции требуемого качества, рациональное и экономичное ведение производственного технологического процесса, сохранность оборудования, безопасные условия труда и защиту окружающей природной среды.

1.4. Приведенный технологический регламент является разовым - на выпуск планируемого объема разовой партии продукции в составе комплекса научно-исследовательских работ.

1.5. Срок действия разового технологического регламента один год.

2. ПОРЯДОК ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ И ДОПОЛНЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

2.1. При необходимости внесения изменений или дополнений в действующий технологический регламент необходимо представить пояснительную записку с описанием и обоснованием необходимости внесения этого изменения или дополнения и со ссылкой на основании каких документов они вносятся (протокол технического совета учреждения, предписание служб государственного надзора, рацпредложение и т.п.);

2.2. Оформление изменений или дополнений к технологическому регламенту, их согласование и утверждение производится в том же порядке, что и самих регламентов. Срок действия изменения или дополнения - до истечения срока действия всего регламента в целом.

2.3. Изменения в технологический регламент вносятся:

2.3.1. при изменении параметров сигнализации и блокировок аппаратов и трубопроводов в пределах допустимых (расчетных параметров);

2.3.2. при изменении государственных или отраслевых стандартов, технических условий на сырье, и вспомогательные материалы, готовые продукты или полуфабрикаты и т.п.;

2.3.3. при необходимости дополнительного контроля сточных вод и выбросов в атмосферу, устанавливаемого по требованиям службы санитарного надзора;

2.3.4. при корректировке перечня обязательных инструкций и нормативно-технической документации в связи с переизданием или их изменением или требованиями органов государственного надзора. Эти изменения и дополнения вносятся в регламент при очередной его переработке.

2.4. Подлинник изменения хранится с подлинником регламента, а копии с него вместе с копиями регламентов,

2.5. При очередной переработке все ранее утвержденные изменения и дополнения должны быть внесены в технологический регламент.

3. КТРОЛЬ ЗА СОБЛЮДЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА

3.1. Руководители работ, операторы и другие работники подразделения обязаны вести технологический процесс в строгом соответствии с утвержденным технологическим регламентом.

3.2. Технологический персонал должен записывать показатели технологического режима в маршрутные листы не реже чем каждые 2 часа. Показатели технологического режима получаемые автоматизированным способом должны архивироваться в конце смены.

Объем фиксируемых в маршрутных листах параметров должен быть не менее объема, предусматриваемого нормами технологического режима регламента.

3.3. Руководители работ обязаны ежедневно просматривать технологические журналы, маршрутные листы, картограммы контрольно-измерительных приборов и давать письменные указания по устранению выявленных за истекшие сутки отклонений от регламента.

3.4. Периодический контроль над соблюдением технологического режима осуществляется работниками отделов главных специалистов согласно утвержденным главным инженером учреждения графикам.

3.5. Систематический контроль над соблюдением технологического регламента возлагается на отдел научно-технической информации учреждения.

3.6. На рабочих местах должны быть вывешены следующие выписки из технологического регламента:

Нормы технологического режима (технологическая карта);

3.7. В составе технологического регламента разрабатываются технологические карты, инструкции по эксплуатации, другие документы.

3.8. Технологические карты пересматриваются и утверждаются главным инженером предприятия не реже 1 раза в 2 года.

4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ.

НАЗНАЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.

4.1. Полное наименование производственного подразделения:

Сектор больших трековых детекторов отделения экспериментальной физики.

Назначение подразделения:

разработка трековых детекторов нового типа для экспериментальных установок, применяемых в физике высоких энергий и других отраслях науки и техники.

Год ввода в действие -2001.

4.1.2. Общий состав производственного подразделения:

Научные сотрудники – 4

Инженеры -6

Рабочие - 6

Количество описываемых в регламенте технологических потоков - 1.

4.1.3. Наименование организации, разработавшей технологический процесс – ФГБУ ГНЦ ИФВЭ.

5. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНОГО СЫРЬЯ, ПОЛУФАБРИКАТОВ, ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Таблица 1. Перечень используемых компонентов и материалов.

| № пп | Наименование | Материал | Нормативный документ |
|---------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------|
| 1 | Труба Ø 15 x 0,4 мм | алюминий | Сертификат качества |
| 2 | Оконечный элемент | покан (пластик) | Паспорт партии |
| 3 | Диэлектрическая втулка | покан | Паспорт партии |
| 4 | Проволока позолоченная Ø 50 мкм | вольфрам | Сертификат качества |
| 5 | Сигнальный колпачок | латунь | Паспорт партии |
| 6 | Центральный пин (штырь) | латунь | Паспорт партии |
| 7 | Сигнальный пин | латунь | Паспорт партии |
| 8 | Заземляющий пин | Латунь (в ПВХ изоляции) | Паспорт партии |
| 9 | Алюминиевое кольцо | | Паспорт партии |
| 10 | Прокладка Ø 10 x 2 | резина | Сертификат качества |
| 11 | Прокладка Ø 5 x 1.5 | резина | Сертификат качества |
| 12 | Твистер (позиционирующий элемент) | латунь | Паспорт партии |
| 13 | Стоппер | покан | Паспорт партии |
| 14 | Кримпируемый капилляр | медь | Паспорт партии |
| 15 | Шайба | латунь | Сертификат качества |
| 16 | Газовый соединитель | покан | Паспорт партии |

| | | | |
|----|-----------------------|--------------------------|----------------------|
| 17 | ПАВ | Кальцинированная сода | ГОСТ 5100-85 |
| 18 | Спирт этиловый | ректифицированный | ГОСТ 18300-87 |
| 19 | Азот газообразный | | Производство ИФВЭ |
| 20 | Гелий А газообразный | | ГОСТ 20461-75 |
| 21 | Вода дистиллированная | | Производство ИФВЭ |
| 22 | тампон | вата | Аптечная упаковка |

6. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОЦЕССА СБОРКИ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК МАЛОГО (15 мм) ДИАМЕТРА

Порядок сборки дрейфовых трубок.

Стадия 1- Комплектация.

Комплектуется сменный запас деталей и материалов в соответствии со спецификацией сборочного чертежа. Сменный запас деталей и материалов укладывается в транспортную тару. Оформляется маршрутная карта на сменную серию изделия. Выдается исполнителям технологическая карта.

Стадия 2 - Входной контроль.

Проводится проверка на соответствие требованиям чертежей и технологической карты параметров комплектующих и материалов. Обнаруженные бракованные детали заменяются годными после прохождения контроля. Бракованные детали помещаются в изолятор брака.

Стадия 3- Очистка деталей и комплектующих.

Проводится очистка деталей и комплектующих в ультразвуковой ванне с применением ПАВ. Для очистки внутренней поверхности применяется тампон смоченный этиловым спиртом. Тампон продавливается по внутренней поверхности пневмотолкателем.

Стадия 4- Сушка

Детали (кроме алюминиевых корпусов трубок) сушатся в сушильном шкафу при температуре 39 градусов С.

Стадия 5- Подготовка стапеля сборки дрейфовых трубок.

Опоры-фиксаторы стапеля сборки дрейфовых трубок, оборудованные механическими обжимными устройствами, предназначенные для фиксации корпуса дрейфовой трубки во время сборки и механического обжима трубой торцевых элементов через установленные на них резиновые прокладки, выставляются по шаблону на расстоянии друг от друга, соответствующем заданной длине собираемых дрейфовых трубок.

Стадия 6- Сборка на стапеле.

Корпус (труба) дрейфовой трубки фиксируется внутри опор-фиксаторов стапеля сборки дрейфовых трубок. Два торцевых элемента закрепляются внутри вспомогательных опор-держателей сборочного стапеля. Через трубу с помощью вакуумной вытяжки пропускается (сматывается с катушки) золоченая вольфрам-рениевая проволока диаметром 50 мкм. Один конец проволоки пропускается последовательно через торцевой элемент и кримпируемый медный капилляр с внешним диаметром 1,2 мм, длиной 20 мм. Кримпируемый медный капилляр с пропущенной через него проволокой вставляется в центральный пин торцевого элемента. Выпущенный конец проволоки должен быть длиной 2-3 см. С помощью пневмозажима проволока кримпится (обжимается) в медном капилляре. Торцевой элемент снимается с опоры-держателя и вставляется в трубу.

На другом конце трубы проволока отрезается так, чтобы свободный конец был длиной 50 см. Этот конец проволоки пропускается последовательно через второй торцевой элемент и кримпируемый медный капилляр. Кримпируемый медный капилляр с пропущенной через него проволокой вставляется в центральный пин торцевого элемента. Торцевой элемент снимается с опоры-держателя и вставляется в трубу.

Свободный конец проволоки прикрепляется к натяжителю проволоки. Включается натяжитель с динамометром, который в автоматическом режиме натягивает проволоку до 450 граммов («преднатяжение») и через 15 сек. снижает натяжение до 350 граммов. С помощью пневмозажима проволока кримпится в медном капилляре. Отрезается лишний кусок проволоки, чтобы оставшаяся часть выступала из капилляра на длину 5мм.

Поочередно на обоих концах приводятся в действие механические обжимные устройства, которые обжимают корпус (трубу) на торцевых элементах через резиновые прокладки.

Выполняется контрольный замер натяжения проволоки по резонансной частоте с помощью резонансного частотомера, входящего в состав сборочного стапеля. Измеренное значение заносится в паспорт изделия.

Трубка снимается со стапеля, укладывается в транспортную тару.

Стадия 7 - Испытания на герметичность.

Испытания проводятся на стенде пневмовакuumных испытаний с помощью гелиевого течеискателя в соответствии с утвержденной инструкцией. Негодные трубки помещаются в изолятор брака. Данные заносятся в паспорт изделия.

Стадия 8- Высоковольтные испытания.

Измерение вольт-амперной характеристики в соответствии с установленной процедурой и утвержденной инструкцией. Негодные трубки помещаются в изолятор брака. Данные заносятся в паспорт изделия.

Стадия 9 – Окончательная сборка на монтажном столе.

С обеих концов на трубку надевается газовый соединитель. На сигнальный колпачок надевается резиновая прокладка диаметром 5x1.5мм. Сигнальный колпачок пропускается через газовый соединитель и через шайбу и резиновую прокладку диаметром 10x2мм накручивается на центральный пин.

Трубка снимается с монтажного стола и укладывается в транспортную тару.

Стадия 10 - Проверка электрических соединений и контроль параметров.

Измерение сопротивлений и резонансной частоты и занесение в паспорт изделия.

Стадия 11 – Оформление Протокола испытаний и Паспорта изделия.

Стадия 12 – маркировка готовых изделий.

На внешнюю поверхность трубки наклеивается этикетка.

На этикетке нанесена следующая информация:

- 1- Товарный знак ФГБУ ГНЦ ИФВЭ
- 2- Наименование изделия – «Прецизионная дрейфовая трубка»
- 3- Номер изделия в базе данных паспортов дрейфовых трубок
- 4- Дата выпуска в формате ДД-ММ-ГГГГ

После оформления протоколов испытаний и паспорта на изделие (или партию изделий) проводится анализ выявленных негодных изделий, помещенных в «изолятор брака». По результатам анализа негодных изделий принимаются и реализуются корректирующие мероприятия по исправлению несоответствий конструкторской документации. **Негодные изделия утилизируются с предварительным разрушением в целях невозможности их дальнейшего использования.**

7. НОРМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Таблица 2. Нормы технологического режима.

| Номер стадии процесса | Наименование прибора | Единица измерения | Требуемый класс точности измерительных приборов | Допускаемые пределы технологических параметров | | Примечание |
|-----------------------|--|-------------------|---|--|-------------------------|------------|
| | | | | Расчетное | Рабочее технологическое | |
| 1 | Термогигрометр | °С | ± 5,0% | 22 50 | 20-24 40-60 | Измерение |
| 1 | Счетчик частиц в воздухе HANDILAZ MINI | 1/м ³ | ± 1% | от минус 30 до 100 °С, | От минус 10 до 5 °С | Измерение |
| 2 | Микрометр 0-25 мм | мм | | | | Измерение |
| 2 | Индикатор микрометрический | 0,01 мм | | 0,1 | 0,08-0,12 | Измерение |
| 2 | Щупы калиброванные | | 0,1-0,5 мм | 0,1-0,5 мм | 0,1-0,5 мм | Измерение |
| 2 | Мультиметр UNI TREND UT30C | МОм | ± 5,0% | | 950-1050 | Измерение |
| 2 | С-метр Mastech MY6013A | пф | ± 5,0% | 680 | 650-700 | Измерение |
| 2 | Микрометр 0-50 мм | мм | | | | Измерение |
| 2 | Шаблон-пробка | мм | +0,5 мм | Ø15 | Пр-НЕПр | Измерение |
| 2 | Шаблон-стержень № 1 | мм | +0,5 мм | 40 | 40,5 | Измерение |
| 3 | Термометр для воды KL9806 | °С | ± 5,0% | 25 | 25 | Измерение |
| 4 | Термогигрометр КТ-905 | °С | ± 5,0% | 22 | 22-24 | Измерение |
| 5 | Шаблон-стержень № 2 | мм | +0,5 мм | 800 | 800,5 | Измерение |
| 6 | Шаблон-разрезная шайба | мм | +0,5 мм | 14 | 14,5 | Измерение |
| 6 | Динамометр | г | ± 10,0% | 350 | 450 | Измерение |
| 6 | Манометрическая станция | МПа | 3 | 0-20 | 17 | Измерение |
| 6 | Течеискатель ASM-310 | | | | Гелиевая течь | Сравнение |
| 6 | Измеритель частоты | Гц | ± 5,0% | | | Измерение |

8. КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

8.1. Аналитический контроль производства по всем стадиям технологического процесса не проводится. Вредных выбросов в атмосферу, сточных вод, воздушной среды в помещениях во время технологического процесса не происходит. В обрабатываемых материалах не содержатся агрессивные компоненты, вызывающие коррозию металла.

8.2. Контроль технологического процесса с помощью систем сигнализации и блокировок не проводится.

8.3. Контроль технологического процесса проводится контрольным инструментом, указанным в технологической карте на соответствие требований конструкторской документации.

9. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ПУСКА И ОСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

9.1. К работе допускается обученный и проинструктированный по охране труда, электробезопасности и технологическим инструкциям персонал, прошедший периодический медицинский осмотр по вредным факторам производства и не имеющий противопоказаний и отводов по медицинским показателям.

9.2. Персонал, приступающий к работе впервые проходит стажировку на рабочем месте под руководством опытного работника в течении 10 рабочих смен.

9.3. Работающие на стадии испытаний со стендом пневмоиспытаний проходят обучение и сдают квалификационные экзамены на знание «правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением».

9.4. Начинать работы следует при условии выполнения норм освещенности рабочих мест, кратности приточно-вытяжной вентиляции и температуры воздуха в рабочих помещениях.

9.5. Остановка работ выполняется с учетом требований по закрытию помещений на длительный период или праздники, в порядке, установленном Указанием Главного инженера учреждения.

10. ВОЗМОЖНЫЕ НЕПОЛАДКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА, ИХ ПРИЧИНЫ И СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ.

Таблица 3. Возможные неполадки технологического процесса их причины и способы устранения.

| Возможные неполадки | причины возникновения неполадок | способы устранения неполадок |
|---------------------------------------|---------------------------------|---|
| Отключение электроснабжения здания 19 | Подсадка напряжения в сети | Отключить аппаратуру и приборы. Сообщить об отключении дежурному ГПП зд. 10 тел. 133-50 |
| Пожар или угроза возникновения пожара | | Отключить аппаратуру и приборы. Сообщить об отключении дежурному СПЧ-7 тел. 01 |

11. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОГО ВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

11.1. Выполнение требований инструкций по охране труда и промышленной безопасности.

11.2. Выполнение требований инструкции по пожарной безопасности.

11.3. Выполнение требований межотраслевых правил по охране труда при эксплуатации электроустановок.

11.4. Выполнение требований «правил по безопасному устройству и эксплуатации сосудов, работающих под давлением».

11.5. Выполнение требований правил внутреннего трудового распорядка для работников ГНЦ ИФВЭ.

11.6. Классификация производственных и вспомогательных помещений.

Таблица 5. Классификация производственных и вспомогательных помещений по их взрывной и пожарной опасности.

| Наименование зданий, помещений | Категория зданий и помещений по взрывопожарной и пожарной опасности | Класс взрывоопасной или пожароопасной зоны по ПУЭ | |
|--|---|---|--|
| Здание 19 | | | |
| Пом. 101, 102, 104, 105, 115, 116, 117, 118А, 118 | П-П А | Г | АПС, оповещение о пожаре, запасные выходы на улицу |
| Пом. 103, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 114А. | П-П А | В-4 | АПС, оповещение о пожаре, запасные выходы на улицу |

11.7. Система защиты от молний выполнена по кровле здания стальной полосой 40 x 5 мм² с заземлением в очаге заземления с западной стороны здания 19. Защита от статического электричества – заземление металлических ручек дверей в помещения на контур защитного заземления, заземление корпусов электрооборудования, металлических стеллажей.

11. 8. Кратность воздухообмена общей приточно-вытяжной вентиляции соответствует санитарным нормам, шум (60 дБА) и освещенность (200 лк) на рабочих местах соответствуют санитарным нормам.

11.9. Спецодежда, обувь и средства индивидуальной защиты, необходимые для работающих выдаются в соответствии с нормами по утвержденному перечню .

11.10. Имеющиеся средства пожаротушения:

кран пожарного водопровода в помещении №107;

огнетушители ОУ-5 в помещениях – 10 шт.

12. ВОЗМОЖНЫЕ АВАРИЙНЫЕ СИТУАЦИИ И ПРАВИЛА ОСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ

Основные возможные виды аварийных ситуаций:

12.1. Отключение электроэнергии,

12.2. Пожар на установке или угроза его возникновения;

Действия персонала по устранению аварийной ситуации в случае угрозы или возникновения пожара проводятся в соответствии с п.10 настоящего технологического регламента и инструкции по взаимодействию с подразделениями и руководством СПЧ-7.

13. ОТХОДЫ ПРОИЗВОДСТВА, СТОЧНЫЕ ВОДЫ И ВЫБРОСЫ В АТМОСФЕРУ

Таблица 6. Твердые и жидкие отходы.

| Наименование отхода | Количество кг/ сутки | Периодичность образования | Куда складывается, транспорт | Метод и место захоронения, утилизации или обезвреживания | Примечания |
|--------------------------------------|----------------------|--|--------------------------------|--|------------|
| ТБО | 10 | Вывоз по мере наполнения не реже 1 раза в неделю | Контейнер, мусоровоз | Полигон ТБО | |
| Обрезки металлических трубок | 1 | | Контейнер для металла цветного | Склад металлолома | |
| Вода с следами кальцинированной соды | 25 | 1 раз в сутки | | Хоз-фекальная канализация | |

Таблица 7. Сточные воды.

| Наименование стоков. | Количество образования сточных вод м ³ /смену | Метод утилизации или обезвреживания | Периодичность сброса | Куда сбрасывается | Установленная норма содержания загрязнений | Примечание |
|---|--|-------------------------------------|----------------------|---------------------|--|------------|
| Вода со следами ПАВ (кальцинированная сода) | 0,05 | канализация | 1раз/сутки | Канализация бытовая | Не нормируется | |

Таблица 8. Выбросы в атмосферу.

| Наименование сбросов. | Количество образования выбросов по видам м ³ /час | Метод утилизации или обезвреживания выброса | Периодичность выбросов | Установленная норма содержания загрязнений в выбросах | Примечание |
|-----------------------|--|---|------------------------|---|--------------------------|
| Азот газ | 0,05 | Сброс в атмосферу | 10 раз в смену | | 1.5 м выше конька кровли |
| Гелий газ | 0,005 | | 10 раз в смену | | 1.5 м выше конька |

Таблица 9. Спецификация технологического оборудования.

| Номер помещения по схеме | наименование оборудования | Кол., штук | техническая характеристика | Примечание |
|--------------------------|--|------------|--|--|
| 101 | Стеллажи, измерительный инструмент, сушильный шкаф, ультразвуковая ванна | 3 | Исполнение УХЛЗ Влагозащищенное | Металлическая тара |
| 113 | Стапель, манометрическая станция, оснастка | 1 | Шкаф с 40 л баллонами азот и гелий | На улице, подача по трубопроводу Ø 10 мм |
| 112А | Пост вакуумный течеискания | 1 | Вакуумный насос, течеискатель, вакуумметры | Газовая смесь азот+гелий (90+10%) |
| 102 | Стенд высоковольтного электроиспытания | 1 | Испытательное напряжение 2,5 кВ | Сетчатое ограждение |

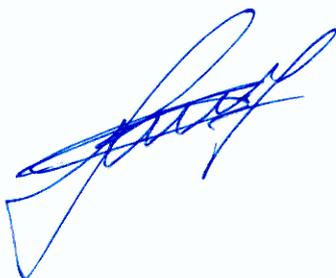
Таблица 10. Движение комплектующих и материалов в процессе сборки прецизионных дрейфовых трубок с полеформирующими электродами.

| Номер помещения по схеме | наименование стадии технологического процесса | Примечание |
|--------------------------|---|------------|
| 101 | Комплектация, входной контроль, мойка, сушка | |
| 113 | Сборка на стапеле | |
| 112А | Испытания на плотность и герметичность | |
| 112 | Испытания высоковольтные, проверка электрических соединений и контроль параметров | |
| 102 | Складирование, упаковка | |

14. ПЕРЕЧЕНЬ ИНСТРУКЦИЙ И НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ, ОБЯЗАТЕЛЬНЫХ ДЛЯ ДАННОГО ОБЪЕКТА

Перечень обязательных инструкций и нормативно-технической документации для сектора больших трековых детекторов отделения экспериментальной физики установлен в соответствии с требованием правил охраны труда, промышленной и радиационной безопасности, электробезопасности, согласован с отделом охраны труда и промышленной безопасности и утвержден главным инженером учреждения.

Разработал:



Р.М. Фахрутдинов

УТВЕРЖДАЮ
 Главный инженер
 _____ А.А. Брагин
 « ____ » _____ 2012 г.

16. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

Изготовление прецизионной дрейфовой трубки малого (15мм) диаметра

Сменная партия 10 штук.

| № п/п | Содержание операции | Инструмент, приспособ- ления | Технические условия | Контроль параметров | Контрольный инструмент |
|----------|--|------------------------------------|---|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Комплектация на партию 10 шт. Трубка Ф 15 х 0,4 мм L= 1000 мм -10 шт. Оконечный элемент с центральным пинном -20 шт. Заземляющий штырь – 20 шт. Проволока Ф 50 мкм вольфрам-рениевая позолоченная – 1 катушка (500 м) Кримпируемый капилляр -20 шт. Прокладки круглые резиновые - 40 шт. Твистер -20 шт. Стоппер – 20 шт. | Стеллаж: Коробки: | +22С ± 2 ⁰ С 100 000 Класс по FS 209, 8 Класс по ISO 14644-1 | Температура Запыленность Относительная влажность 40-60% | Термогигрометр КТ-905 счетчик частиц в воздухе HANDILAZ MINI |

| | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|

| | | | | | |
|-----------------|---|--|-----------------------------|--|--|
| | <p>Сигнальный пин - 20 шт. Алюминиевое кольцо – 20 шт. Шайба – 20 шт. Газовый соединитель – 20 шт.</p> | | | | |
| <p>2</p> | <p>Входной контроль</p> | | <p>+22С± 2⁰С</p> | <p>Трубка: Отклонения по длине Отклонение цилиндричности Отклонение прямолинейности Проверка толщины</p> | <p>Шаблон –пробка +микрометр Индикатор микрометрический Гранитный калиброванные щупы Микрометр 0-25 мм</p> <p>Микрометр 0-50 мм Индикатор микрометрический Шаблон – стержень №1; Калиброванные щупы</p> |

| | | | | | | |
|----------|---|-------------------------------------|--|--|---|--|
| | | | | | Проволока, оконечные элементы | Микрометр 0-25 мм Лупа настольная с подсветкой |
| 3 | Очистка деталей и комплектующих | Ванна для очистки ультразвуком, ПАВ | Вода 25 ⁰ С, 15 мин. Вода дистиллированная 25 ⁰ С 15 мин. Этиловый спирт, 15 мин | | | Термометр для воды. Мерник для ПАВ. Уровень воды по метке. |
| 4 | Сушка | Камера сушильная | Воздух 39С, 25 мин | | | Термогигрометр. |
| 5 | Подготовка ступели сборки дрейфовых трубок | Ступель для сборки | +22С±2 ⁰ С | | Расстояние между опорами-фиксаторами с механическими обжимными устройствами | Шаблон – стержень №2 |
| 6 | Сборка на ступеле | Ступель для сборки | +22С±2 ⁰ С | | | |
| | 1. Установка на ступель трубки и закрепление | Тампон, спирт, пневмотолкатель | | | Визуальный контроль | |
| | 2. Очистка внутренней поверхности трубки | Пневмотолкатель | | | | Эндоскоп с лампой |
| | 3. Протяжка сигнальной проволоки | Вакуумная вытяжка | | | Визуальный контроль | |

| | | | | | |
|----------|--|-----------------------------------|------------------------|--|--|
| | 4. Кримпирование проволоки в капиллярной трубке 1-го торцевого элемента | пневмозажим | | Контроль толщины капилляра в месте кримпа | Микрометр |
| | 5. Натяг и закрепление сигнальной проволоки в капиллярной трубке 2-го торцевого элемента | Натяжитель проволоки, пневмозажим | | Усилие преднатяжения - 450г, натяжения – 350г. Контроль толщины капилляра в месте кримпа | Микрометр |
| | 6. Опрессовка 1-го торцевого элемента | Механическое обжимное устройство | | Диаметр трубы в месте обжима | Шаблон-разрезная шайба |
| | 7. Опрессовка 2-го торцевого элемента | Механическое обжимное устройство | | Диаметр трубы в месте обжима | Шаблон-разрезная шайба |
| | 8. Контрольный замер натяжения проволоки по резонансной частоте | Частотомер | | Резонансная частота | Резонансный частотомер |
| | 9. Снятие со стапеля трубки | | | | |
| 7 | Испытания на герметичность | Стенд пневмовакуумных испытаний | +22С± 2 ⁰ С | Давление Р _и =0,15 МПа сухой азот Точка росы – 45 ⁰ С Газовая смесь: Сухой азот -90% Гелий Б -10% Нагревание - 1х10 ⁻⁶ Па л/с | Манометрическая станция Течеискатель ASM-310 |

| | | | | | |
|-----------|--|--------------------------------|--|---|--|
| 8 | Высоковольтные испытания | Стенд высоковольтных испытаний | | Uи = 2,5 кВ измерение вольт-амперной характеристики | Персональный компьютер, КАМАК-модуль, программа контроля |
| 9 | Проверка электрических соединений и контроль параметров | | | Измерение сопротивлений и резонансной частоты | Мультиметр, постоянный магнит, Измеритель частоты |
| 10 | Протокол испытаний | | | | |
| 11 | Паспорт | | | | |

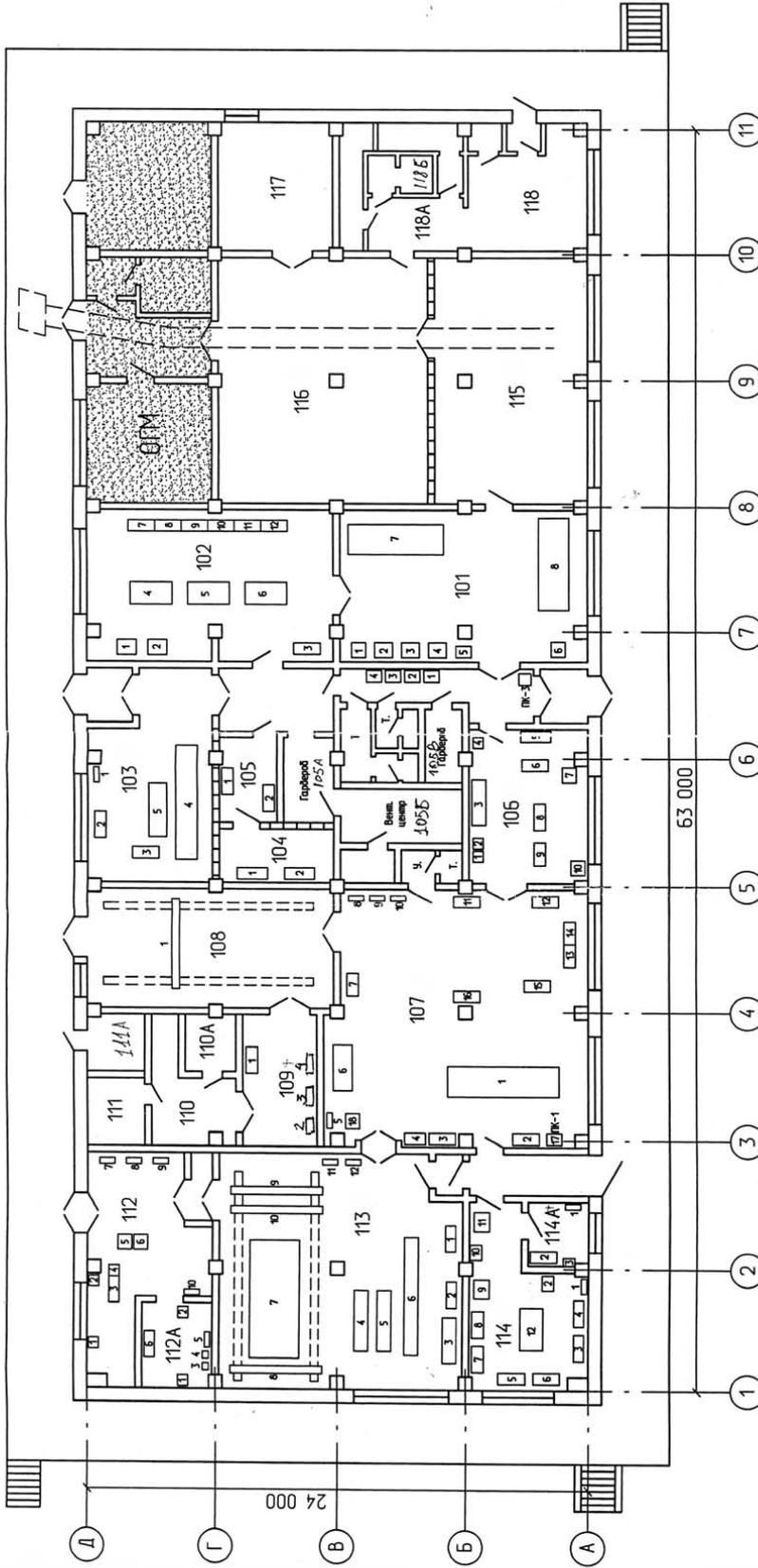
17. МАРШРУТНЫЙ ЛИСТ
Изготовление дрейфовой трубки малого (15мм) диаметра
Сменная партия 10 штук.

| Дата | Номер партии | Номер изделия | | | | |
|--|--------------|---------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|------------|
| | | | | | | |
| Наименование операции по технологической карте | | | Исполнитель Ф.И.О. | Отметка о выполнении | Отметка контролера | Примечание |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1.Комплектация | | | | | | |
| 2. Входной контроль | | | | | | |
| 3.Очистка деталей и комплектующих | | | | | | |
| 4. Сушка | | | | | | |
| 5. Подготовка ступени сборки дрейфовых трубок | | | | | | |
| 6. Сборка на ступе | | | | | | |
| 6.1.Установка на ступель трубки и закрепление | | | | | | |

| | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| 6.2. Очистка внутренней поверхности трубки | | | | | |
| 6.3. Протяжка сигнальной проволоки | | | | | |
| 6.4. Кримпирование проволоки в капиллярной трубке 1-го торцевого элемента | | | | | |
| 6.5. Натяг и закрепление сигнальной проволоки в капиллярной трубке 2-го торцевого элемента | | | | | |
| 6.6. Опрессовка 1-го торцевого элемента | | | | | |
| 6.7. Опрессовка 2-го торцевого элемента | | | | | |
| 6.8. Контрольный замер натяжения проволоки по резонансной частоте | | | | | |
| 6.9. Снятие со стапеля трубки | | | | | |
| Испытания | | | | | |
| 7. Испытания на герметичность | | | | | |
| 8. Высоковольтные испытания | | | | | |
| 9. Проверка электрических соединений и контроль параметров | | | | | |
| 10. Протокол испытаний | | | | | |
| 11. Отметка о принятии изделия | | | | | |

Руководитель работ _____

План размещения оборудования участка проводочных детекторов в зд. 19.



Согласовано:

Начальник ООТ _____

Машин

/ Т.М. Лямина./

Начальник ПЧ-7 _____

Авдеев

/ В.Н.Кострюков./

Главный врач ЦГСЭН _____

[Signature]

/ С.А. Вылегжанин./

Координатор участка, С.Н.С. _____

[Signature]

/ Р.М. Фахрутдинов./

25.12.01

"Цитверждаю"

2 Л. Инженер ЦФВЭ

[Signature] Б.А. Серебряков

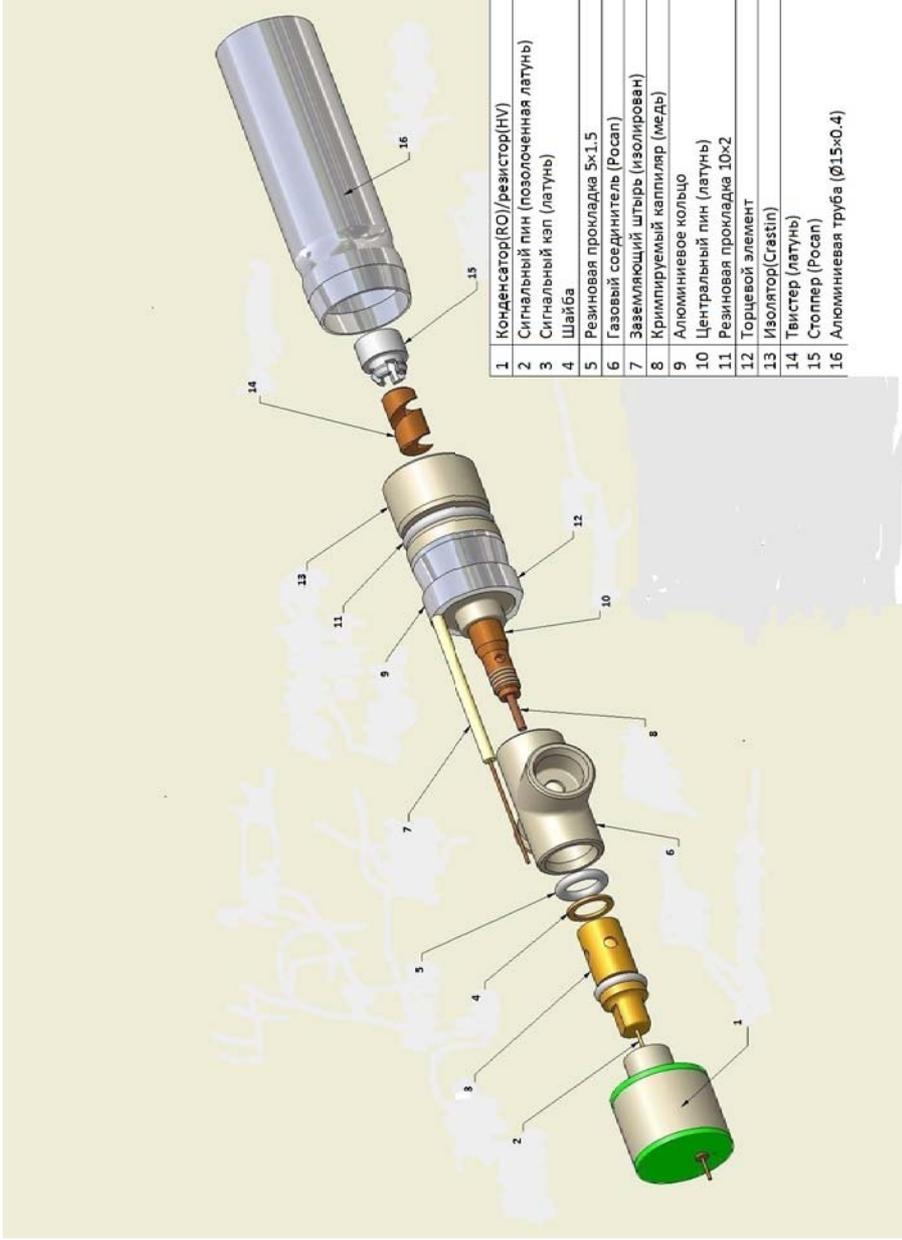
25.12.01.

18. Перечень оборудования, установленного в помещениях сектора больших трековых детекторов

| № помещения | № п/п | Наименование оборудования |
|-------------|--------------|---|
| 101 | 1 | Вытяжной шкаф |
| | 2,3,4 | Столы монтажные |
| | 5,6 | Шкафы сушильные |
| | 7,8 | Стеллажи для мюонных камер |
| 102 | 1,2 | Станки сверлильные |
| | 3 | Стеллаж |
| | 4,5,6 | Столы монтажные |
| | 7-12 | Столы слесарные |
| 103 | 1 | Щит электрический РЩ-3 |
| | 2,3,4,5 | Столы монтажные |
| 104 | 1,2 | Стеллажи |
| 105 | 1,2 | Стеллажи |
| 106 | 1,2,4 | Шкафы металлические |
| | 3,5 | Стеллажи |
| | 6,8,9 | Столы письменные |
| | 7 | Стойка «Вишня» |
| | 10 | Шкаф книжный |
| 107 | 1 | Стол сборочный чугунный |
| | 2,3,11,12,16 | Стеллажи |
| | 4 | Шкаф вытяжной |
| | 5,8,8,10 | Щиты лабораторные электрические |
| | 6,18 | Течеискатели гелиевые ТИ1-14 |
| | 7,13,14,15 | Столы юстировочные |
| | 17 | Пожарный кран № 1 |
| 108 | 1 | Кран однобалочный |
| 109 | 1,2,3,4 | Стеллаж, сверлильный станок, заточной ст. |
| 110-111 | | Вентиляционный центр |
| 112 | 1,2 | Кондиционеры БК-2000 |
| | 3 | Стол письменный |
| | 4 | Шкаф металлический |
| | 5,6 | Стойки «Вишня» |

| | | |
|--|------|---------------------|
| | 7,8 | Шкафы электрические |
| | 9,10 | Щиты электрические |

| № помещения | № п/п | Наименование оборудования |
|-------------|-------|---|
| 112А | 1,2 | Ресиверы |
| | 3,4 | Насосы вакуумные 2НВР-5ДМ |
| | 5 | Щит электрический ЩА-6 |
| | 6 | Стол рабочий |
| 113 | 1 | Кондиционер Hitachi |
| | 2 | Кондиционер КТ-2 |
| | 3,4,5 | Стеллажи |
| | 6 | Сборочный стапель дрейфовых трубок |
| | 7 | Гранитный стол для сборки мюонных камер |
| | 8,9 | Электрические тали |
| | 10 | Кран однобалочный |
| | 11,12 | Щиты электрические |
| 114 | 1 | Щит электрический лабораторный ЩЛ-6 |
| | 2 | Станок сверлильный |
| | 3 | Стол слесарный |
| | 4 | Стол радиомонтажный |
| | 5,6,8 | Столы письменные |
| | 7 | Микроскоп УИМ-23 |
| | 9,11 | Шкафы металлические |
| | 10 | Раковина умывальная |
| | 12 | Стол рабочий |
| 114А | 1 | Щит электрический лабораторный ЩЛ-6 |
| | 2 | Стол письменный |
| | 3 | Шкаф книжный |
| 115-118 | | Складские помещения со стеллажами |

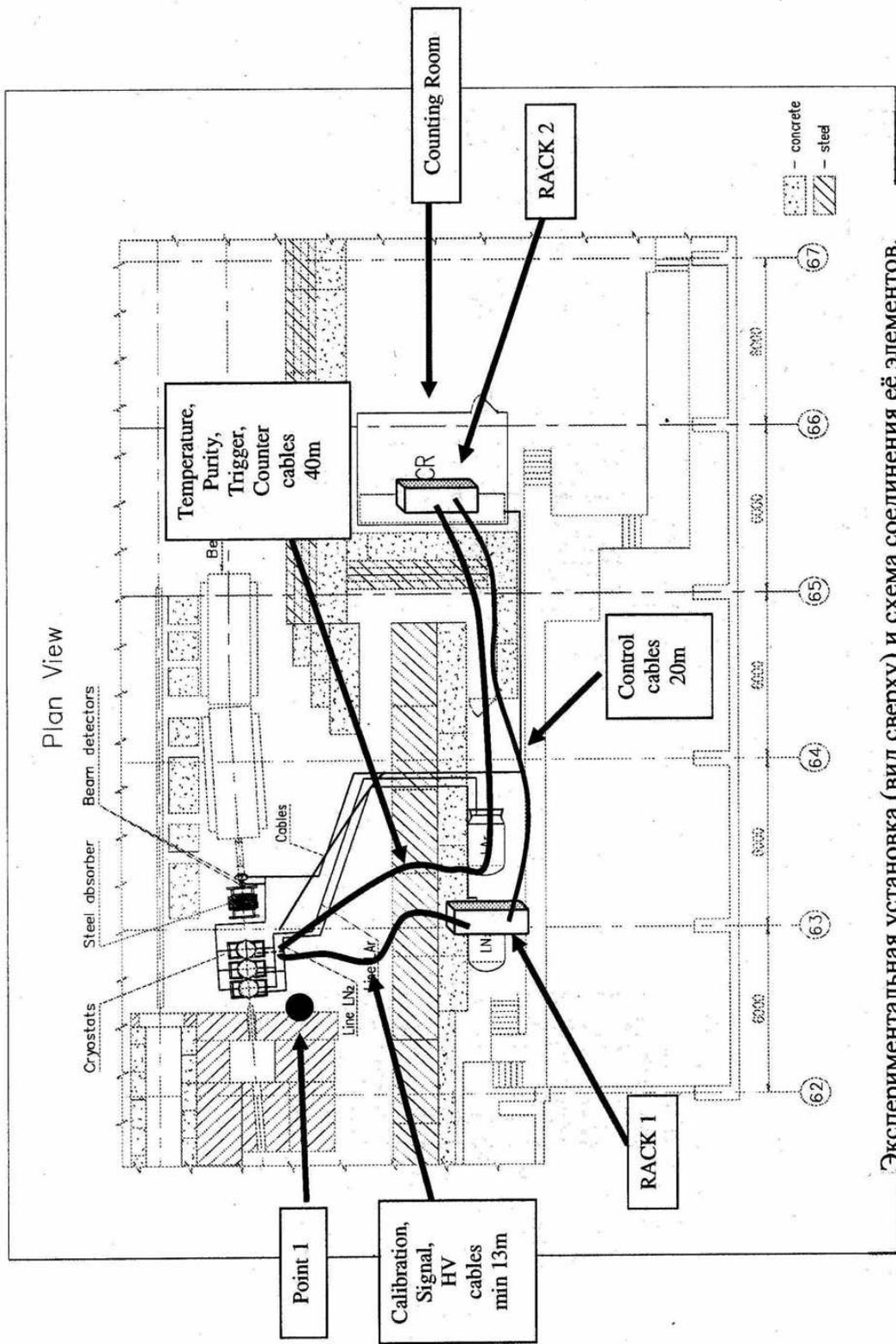


Эскиз прецизионной дрейфовой трубки малого (15 мм) диаметра

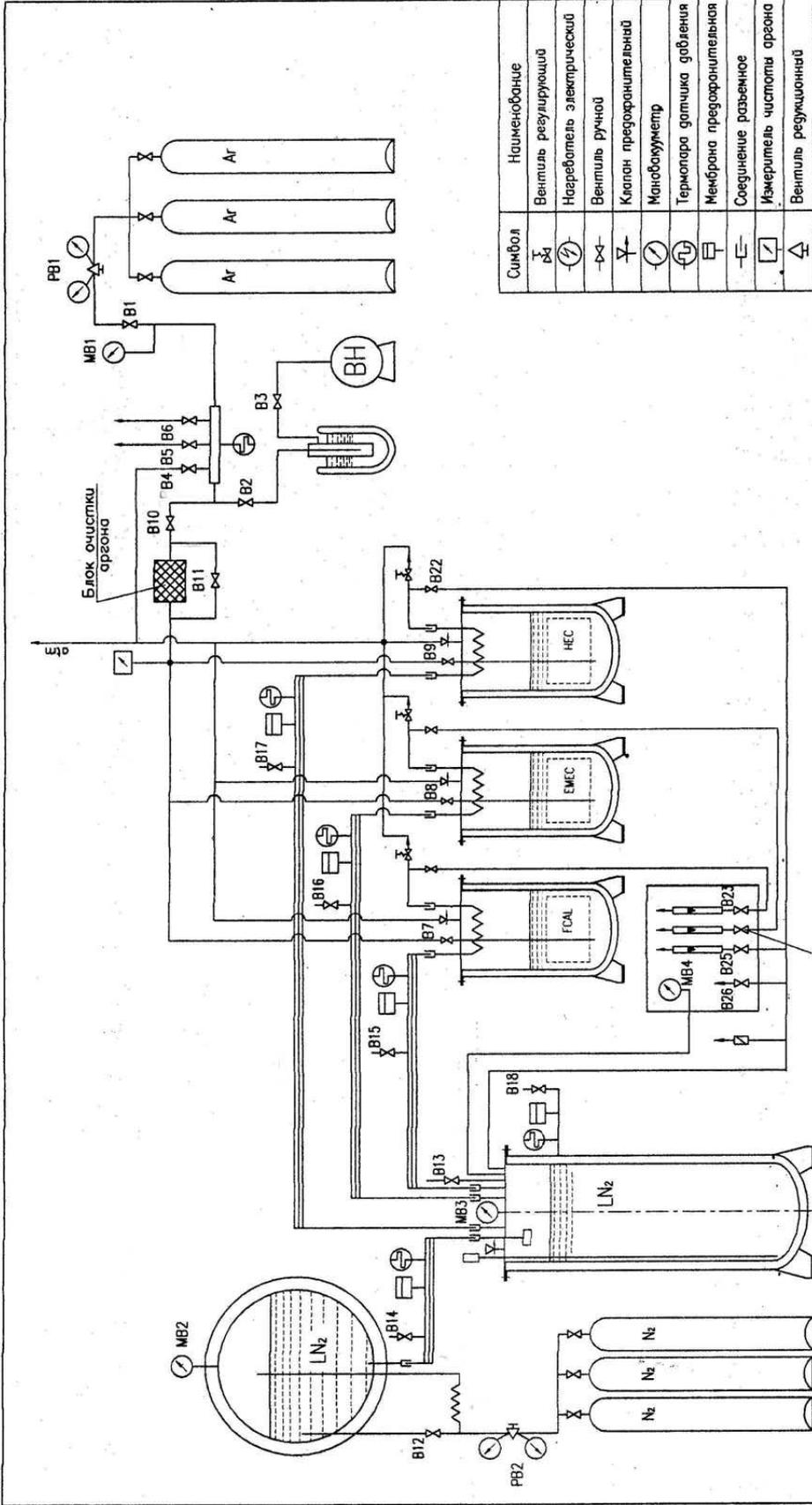


Фотография прецизионной дрейфовой трубки малого (15 мм) диаметра в собранном виде и ее отдельных компонент

Общий вид установки «АТЛАС-КАНАЛ 23», использовавшейся в ИФВЭ для исследования характеристик жидкоаргоновых калориметров, и схема коммуникаций установки



Экспериментальная установка (вид сверху) и схема соединения её элементов.



| Символ | Наименование |
|--------|----------------------------|
| | Вентиль регулирующий |
| | Нагреватель электрический |
| | Вентиль ручной |
| | Клапан предохранительный |
| | Мановаккуметр |
| | Термометр датчика давления |
| | Мембрана предохранительная |
| | Соединение разъемное |
| | Измеритель чистоты аргона |
| | Вентиль вакуумный |

| | | | | | | |
|------|----------------|-----------|----------|--------------------|-------|---------|
| Изм. | Листы N докум. | Полн. | Дата | Лист | Масса | Масштаб |
| | Разраб. | Малаев | 2016 | 1 | | 1:1 |
| | Плещач | Филиппкин | 16.10.06 | Лист | | |
| | | | | Лист | | |
| | | | | ГНЦ РФ ИФВЭ ОНФ | | |

Согласовано:
 Начальник ОНФ *С.П. Денисов*

Эскизы экспериментальных модулей жидкоаргонового калориметра и использованного окружающего оборудования

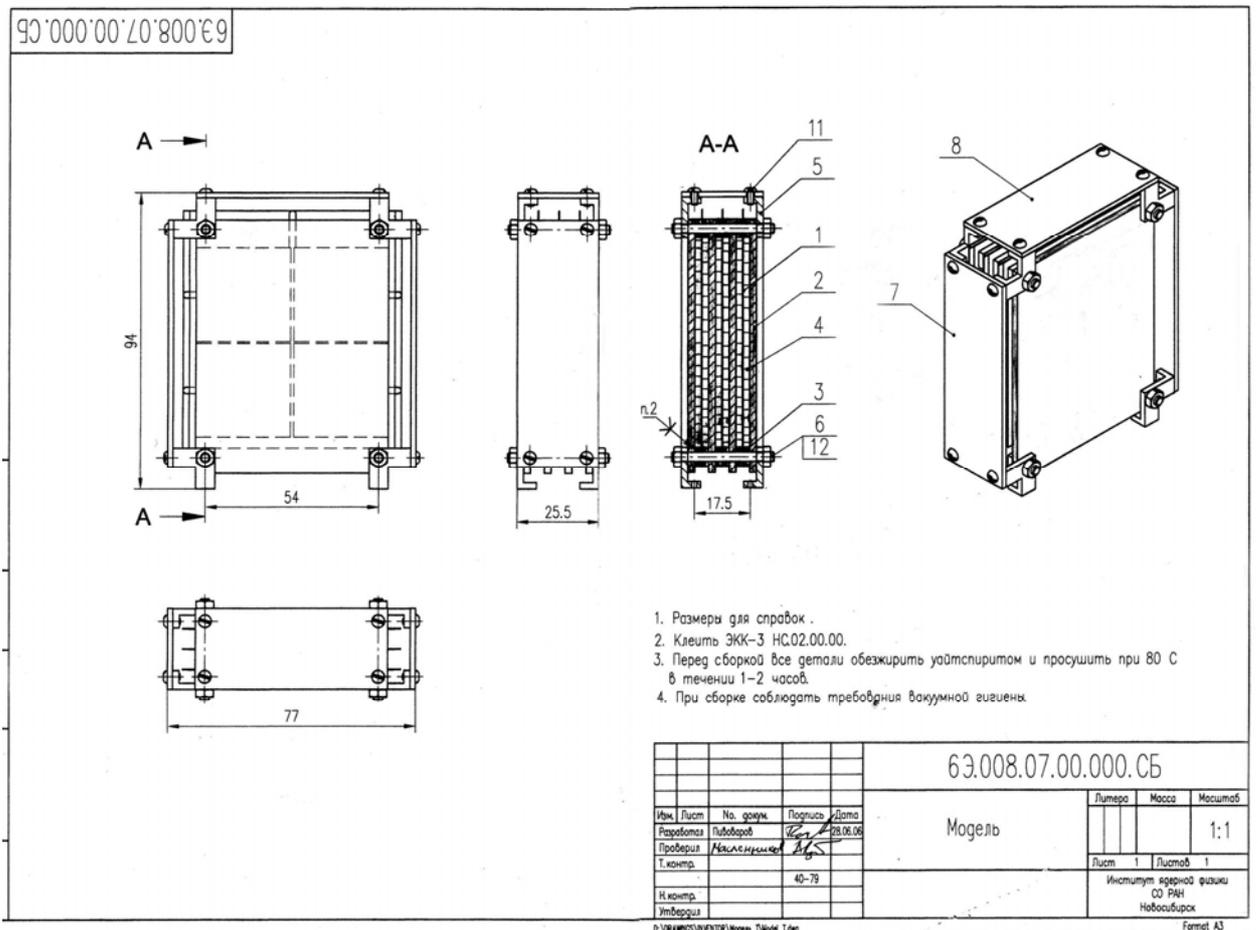


Рисунок Г1 - эскиз типичного экспериментального модуля LiAg калориметра.

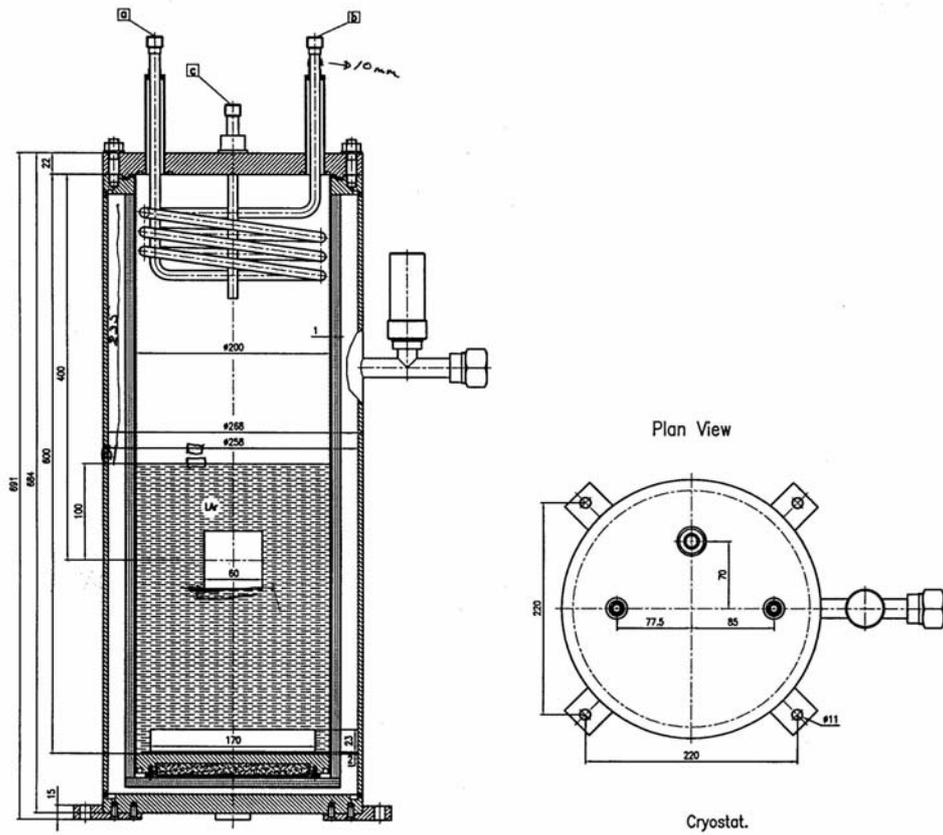


Рисунок Г2 – Положение модуля внутри криостата.

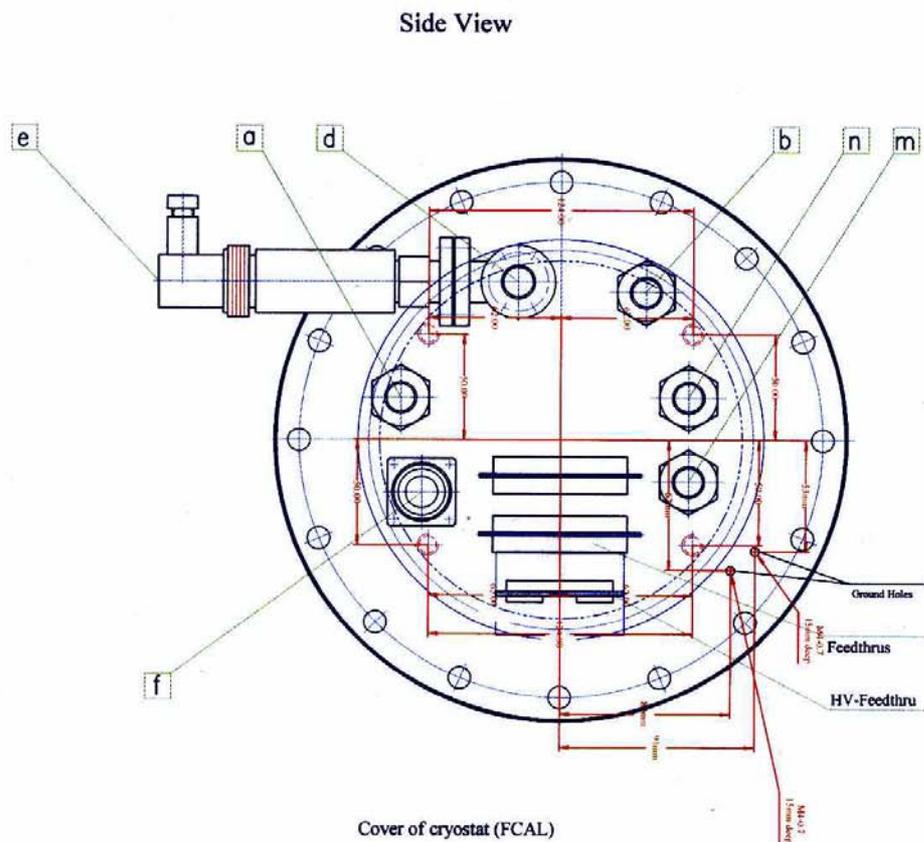
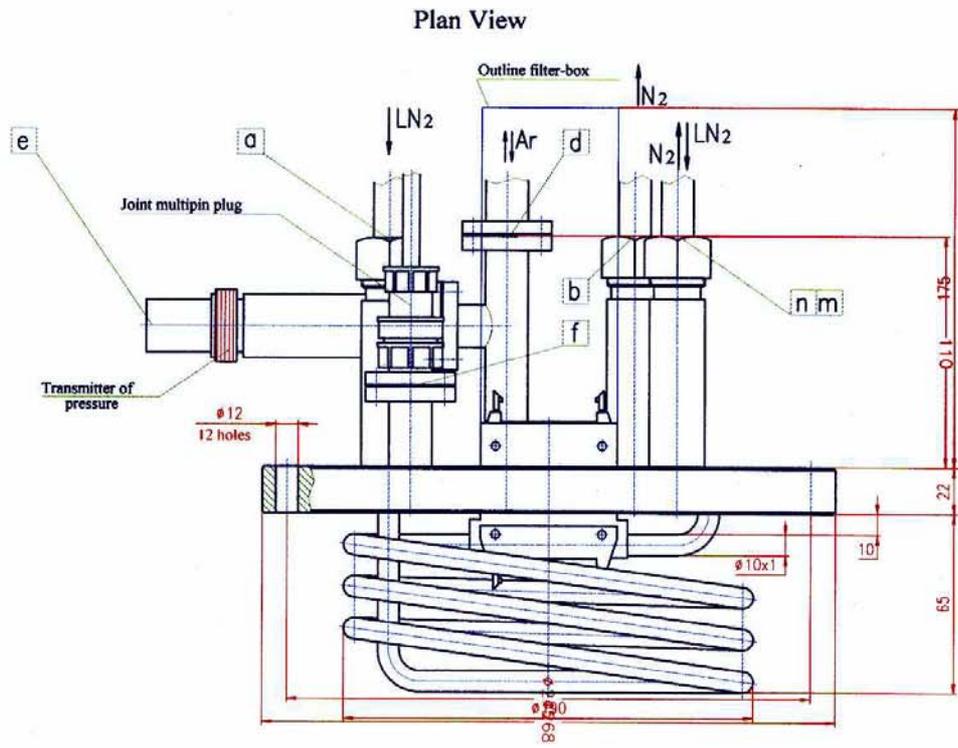


Рисунок Г3 – Общий вид крышки криостата и разъемов коммуникаций

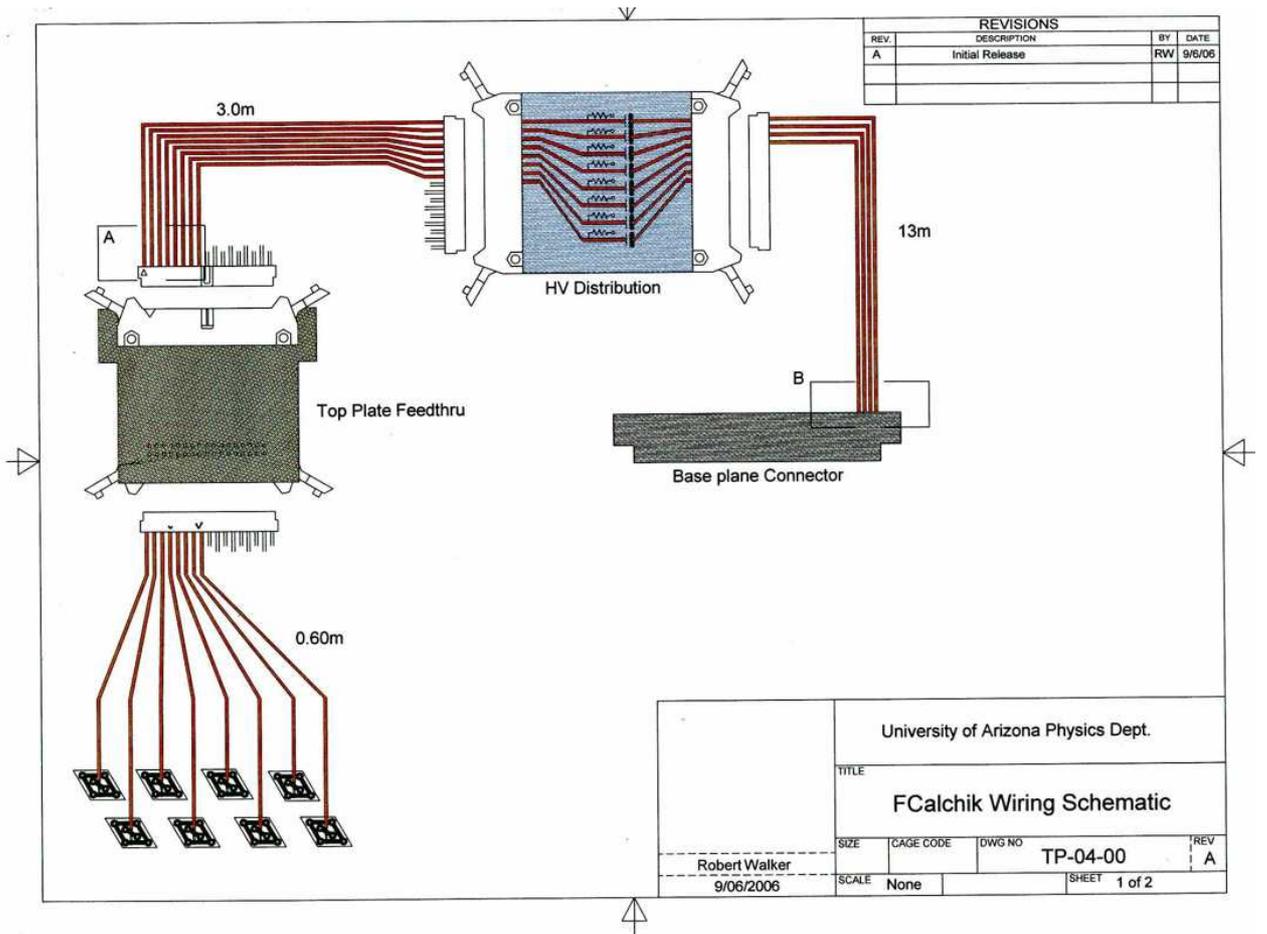


Рисунок Г4 – Схема подключения электрических коммуникаций модуля

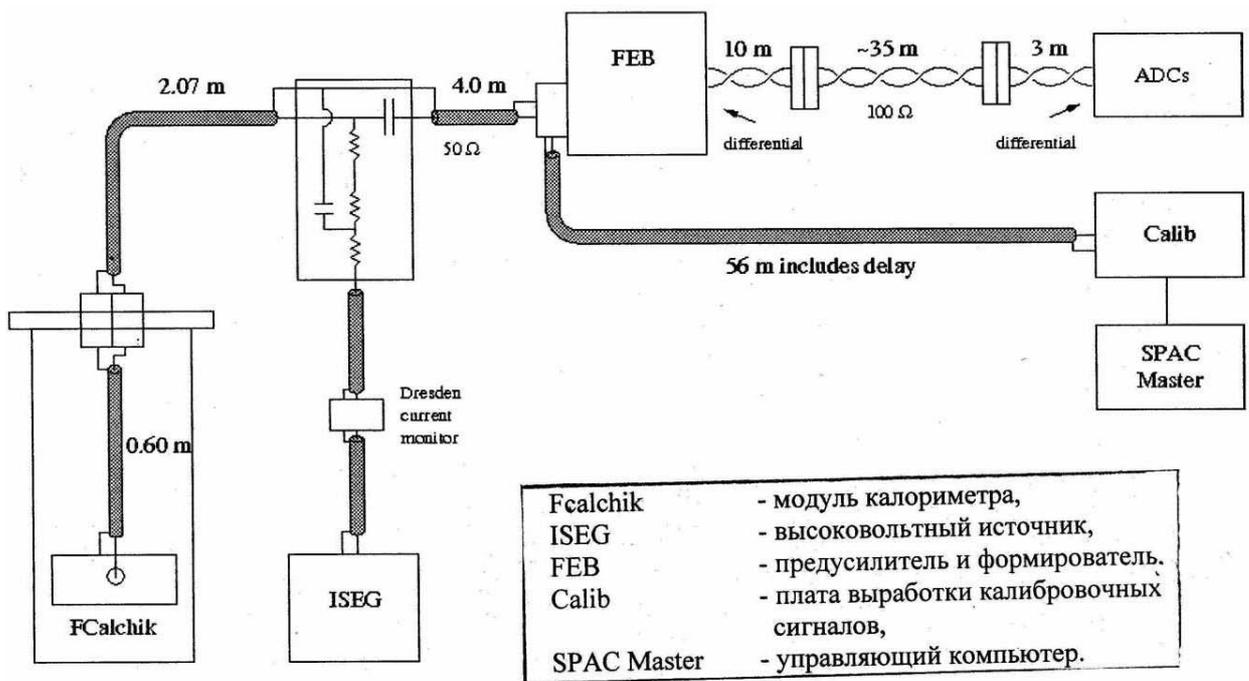


Рисунок Г5 – Блок схема канала регистрации данных для модуля жидкоаргонового калориметра.

Инструкция по эксплуатации газовой-криогенной системы установки «КМН (АТЛАС)»

1. Общие положения.

1.1. Состав оборудования.

- Рампа с 40-литровыми баллонами с аргоном высокой чистоты (< 2 ppm по O₂) в количестве 5 шт.
- Газовый пульт с очистителем аргона PF3C3R1 MONO TORR и устройством звуковой сигнализации.
 - Газовый пульт управления азотной части.
 - Танк с жидким азотом.
 - Криостаты с электромагнитными клапанами (HEC, EMEC, FCAL в 23 канале) – 3 шт.
 - Промежуточный сосуд с жидким азотом (в 23 канале).
 - Вакуумный насос Pascal с измерителем вакуума 375 CONVECTRON.
 - Регуляторы «Метакон» для стабилизации давления аргона в криостатах (в домике 93).
 - Измерители чистоты аргона Illinois Instruments Model 912 и Simac DS2500.
 - Измерение температуры и уровня аргона в криостатах (на ПК в домике 93).

1.2. Органы управления и измерения на газовом пульте.

Манометры и мановакуумметры:

M1 (150 атм) – давление в рампе;

FCAL – давление в криостате;

EMEC – давление в криостате;

HEC – давление в криостате;

MB1 – давление в пульте;

MB4 – давление в промежуточном сосуде;

Вентили:

PB1, PB1A – редукторы с манометрами, понижающие давление аргона;

V1 – аргон в криостаты (без очистки);

V2 – вакуумирование криостатов;

V2A – измерение чистоты аргона в баллонах;

V3A, V4A – входной и выходной вентили очистки;

V4 – сброс аргона в атмосферу;

V5 – анализ чистоты аргона;

V5A – аргон после очистки в коллектор пульта;

V6 – аргон в криостаты после очистки;

V7 – аргон в FCAL;

V8 – аргон в EMEC;

V9 – аргон в HEC;

V10 – для подсоединения сосудов Маринеля;

V11 – к измерителю чистоты Illinois Instruments Model 912;

V12 – к измерителю чистоты Simac DS2500;

V26 – сброс газообразного азота из промежуточного сосуда;

Ротаметры с регуляторами:

V1A – регулятор расхода аргона;

V23 – регулятор расхода азота в FCAL;

V24 – регулятор расхода азота в EMEC;

V25 – регулятор расхода азота в HEC.

На азотном танке:
Манометр;
Указатель жидкости (уровня).
Вентили:
Выдача;
Жидкость в испаритель;
Газосброс.

1.3. Режимы работы системы.

Система может работать в одном из трех режимов для каждого криостата – ожижение аргона, стабилизация давления в криостате (основной) и выпаривание аргона из криостатов.

Во всех режимах работает звуковая сигнализация, срабатывающая при выходе давления в любом криостате за пределы вилки (обычно минимальное давление выставляется около 0,3 атм, а максимальное – около 0,7 атм).

1.4. Измерение количества сжиженного аргона.

При отборе 40 л (при нормальных условиях) газообразного аргона из баллона давление в нем уменьшается на 1 атм. При ожижении объем аргона уменьшается примерно в 600 раз. Следовательно, количество сжиженного аргона можно измерять в атмосферах переданного аргона из баллона в криостат. Например, чтобы получить 1 л жидкого аргона, надо отобрать 600 л газообразного аргона, т.е., чтобы давление в баллоне уменьшилось на $600 / 40 = 15$ атм.

2. Перед началом работы.

2.1. Закрывать редукторы, все вентили на газовых пультах и на криостатах.

2.2. Включить и проверить звуковую сигнализацию замыканием контактов на мановакуумметрах.

2.3. За два часа до начала процесса ожижения включить очиститель аргона PF3C3R1 MONO TORR, при этом должен загореться красный светодиод Power. Включать очиститель можно только после промывки пульта и заполнения очистителя аргоном, при промывке пульта и заполнении аргоном вентили В3А, В4А и В5А должны быть открыты.

2.4. Перед началом процесса ожижения проверить уровень жидкого азота в промежуточном сосуде визуалью через окно в нем (должен быть примерно от 60 до 80%) и по указателю (70 – 90 единиц).

2.5. Включить регуляторы в домике 93 «Метакон», установить на регуляторах НЕС и ЕМЕС значение параметра Н, а на регуляторе FCAL L 2.2 – 2.3.

3. Промывка газового пульта газообразным аргоном.

3.1. Подключить шланг вакуумного насоса к вентилю В2 и включить насос.

3.2. Открыть РВ1 и установить редуктором давление на низкой ступени $P = 3 \div 5$ атм.

3.3. Открыть вентиль насоса и вентиль В2, откачать пульт до вакуума 20 – 30 мТорр.

3.4. На рампе открыть вентиль одного из баллонов, открыть вентиль В1. Редуктором РВ1А установить давление аргона в пульте 0,4 – 0,6 атм. Закрывать редуктор РВ1А.

3.5. Повторить пункты 3.3 и 3.4 еще два раза. Оставить пульт под давлением 0,4 атм.

4. Промывка криостатов газообразным аргоном.

4.1. На рампе открыть вентиль одного из баллонов, открыть вентиль В1. Открыть РВ1 и установить редуктором давление на низкой ступени $P = 3 \div 5$ атм, редуктором РВ1А установить давление аргона в пульте 0,4 – 0,6 атм.

4.2. Подключить шланг вакуумного насоса к нижнему вентилю соответствующего криостата и включить его, открыть вентиль насоса и нижний вентиль криостата (верхний вентиль должен быть открыт, а вентиль В7 – В9, соответствующий выбранному криостату, например, В7, должен быть закрыт), откачать криостат до вакуума 20 – 30 мТорр.

4.3. Закрыть нижний вентиль криостата, открыть В7 и заполнить криостат аргоном до $P_{изб} = 0 - 0,1$ атм. Закрыть В7.

4.4. Повторить пункты 4.2 и 4.3 еще два раза. Оставить криостат под давлением 0,4 атм.

4.5. Промыть аналогично остальные криостаты (пункты 4.2 – 4.4).

4.6. Закрыть вентиль В1.

4.7. **Категорически запрещается откачивать и промывать захлаженный криостат!**

Система готова для ожижения аргона.

5. **Ожижение аргона.**

5.1. Открыть вентили В3А, В4А, В5А, В6. Включить измеритель чистоты Illinois Instruments Model 912. Включить обогреватель верхнего фланца криостата.

5.2. Записать номер баллона, время и давление в баллоне (рампе) в оперативный журнал. Записывать также время и давление через каждые 10 атм.

5.3. Когда давление в баллоне уменьшится до 5 атм, закрыть вентиль пустого баллона, открыть вентиль другого и вести дальнейшие записи по пункту 5.2.

5.4. Открыть соответствующие вентиль В7 – В9, например, В7 и включить регулятор «Метакон», установить значение параметра (см. пункт 2.5) 1,6 атм абс.

5.5. Открыть вентиль В1А, редуктором РВ1А поддерживать давление в пульте 0,4 атм. Можно дополнительно для увеличения потока газообразного аргона через ротаметр до уровня 5,6 л/мин увеличить расход жидкого азота, открыв соответствующий вентиль В23 – В25, например, В23.

5.6. Примерно через 1 час криостат охладится до температуры жидкого аргона и начнется собственно процесс ожижения. В этот момент давление в криостате резко упадет (увеличится поток аргона). Нельзя допустить уменьшение давления в криостате ниже 0,3 атм. Поток газообразного аргона через ротаметр в этом режиме установить на уровне 5,6 л/мин.

5.7. После того, как в криостате будет 2 л жидкого аргона (израсходовано 30 атм аргона), необходимо проверить чистоту аргона в криостате. Для этого необходимо закрыть вентиль В6 и соответствующий вентили В23 – В25 и открыть В5, В11, выходной вентиль измерителя чистоты Illinois Instruments Model 912, после этого входной. Установить указатель ротаметра измерителя чистоты в середине шкалы. После того, как показания измерителя чистоты стабилизируются, записать эти показания в оперативный журнал.

5.8. Продолжить процесс ожижения, для чего выполнить действия пункта 5.7 в обратном порядке.

5.9. В процессе ожижения контролировать температуру трех датчиков в криостате, по мере подъема уровня жидкого аргона записывать в оперативный журнал моменты времени, когда жидкий аргон поднимается до соответствующего датчика.

5.10. После того, как уровень жидкого аргона достигнет верхнего датчика, необходимо ожижить еще 15 – 20 атм.

5.11. Проверить чистоту аргона в заполненном криостате в соответствии с пунктами 5.7 и 5.8.

5.12. Перейти в режим стабилизации давления, для чего требуется закрыть соответствующие вентили В23 – В25, а также В7 – В9.

5.13. Аналогично заполняются жидким аргоном остальные криостаты.

5.14. Если опорожнены все 5 баллонов в рампе, а криостат еще не заполнен, необходимо закрыть вентиль последнего баллона, закрыть редукторы РВ1 и РВ1А и перевести заполняемый криостат в режим стабилизации давления в соответствии с пунктом 5.12. Затем отсоединить

баллоны от рамп, снять их и на их место поставить полные баллоны. Промыть газовый пульт в соответствии с пунктом 3 и продолжить ожигение в соответствии с пунктами 5.2, 5.4 – 5.11.

6. Аварийные и опасные режимы.

6.1. Причинами опасных и аварийных режимов могут быть: начало процесса ожигения (пункт 5.6.), отказ электромагнитного клапана на криостате и другие.

6.2. Если давление падает и приближается к минимальной уставке мановакуумметра, необходимо либо увеличить расход аргона вентилем В1А (если он ниже 5 – 6 л/мин), либо увеличить давление в пульте редуктором низкого уровня РВ1А, либо уменьшить расход жидкого азота соответствующим вентилем В23 – В25, либо увеличить уставку соответствующего «Метакона» (если она ниже, чем 1,6 атм абс.). В крайнем случае открыть вентили В5А и В6 и добавить аргона из пульта.

6.3. Если давление увеличивается и приближается к максимальной уставке мановакуумметра, необходимо увеличить расход жидкого азота соответствующим вентилем В23 – В25. В крайнем случае можно сбросить аргон в атмосферу, открыв вентили В6 и В4.

6.4. Если в режиме стабилизации давления отказал электромагнитный клапан на криостате (что видно по непрерывно горящему светодиоду на «Метаконе»), необходимо поддерживать давление регулировкой соответствующего вентиля В23 – В25. Сообщить о случившемся руководителю и главному инженеру установки. Во время захода в канал постучать по залипшему клапану.

7. Режим стабилизации давления в криостатах.

7.1. Выключить очиститель аргона PF3C3R1 MONO TORR. Закрыть все вентили на пульте, в том числе В3А и В4А, а также В23 – В25.

7.2. В этом режиме необходимо следить за давлением в криостатах по мановакуумметрам и показаниям «Метакон», а также за значениями температуры по трем датчикам каждого криостата.

8. Работа с жидким азотом.

8.1. Давление в промежуточном сосуде показывает манометр МВ4. Оно должно быть в пределах 0,4 – 0,6 атм. Регулируется давление вращением «стабилизатора давления». Можно также сбросить давление, открыв вентиль В26.

8.2. Уровень азота в промежуточном сосуде поддерживать в пределах 30 до 80% (видно через окно в нем) и по указателю (0 – 80 единиц).

8.3. Чтобы долить жидкий азот в промежуточный сосуд, надо открыть на танке вентиль «Выдача», а вентилем «Жидкость в испаритель» поднять давление в танке до 0,8 – 1,0 атм.

8.4. Когда промежуточный сосуд заполнится до 80% (80 единиц), закрыть вентили «Выдача» и «Жидкость в испаритель».

8.5. Если давление в танке превысит 1 атм, нужно сбросить давление до величины 0,4 атм, открыв вентиль «Газосброс».

9. Окончание работы

9.1. После снятия пучка по требованиям радиационной безопасности необходимо не менее двух суток выдержать режим стабилизации давления, чтобы распались короткоживущие изотопы.

9.2. По истечении срока выдержки закрыть вентили всех баллонов, редукторы РВ1 и РВ1А, выключить звуковую сигнализацию, открыть вентили В7 – В9, В4 и В26. Аргон будет испаряться за счет внешних теплопритоков примерно в течение суток.

9.3. Для страховки снять маховички с вентилей В7 – В9.

9.4. Выключить блок с регуляторами «Метакон».

9.5. **Категорически** запрещается выпаривать аргон из криостатов с помощью нагревателей.

И.О. руководителя эксперимента

А.В.Козелов

Гл. инженер
установки «КМН (АТЛАС)»

А.В.Левин