

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

№ госрегистрации 114111740013

Инв. № 4/0005

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

д-р физ.-мат. наук, академик

 С.В. Иванов

30.06.2016 г.



ОТЧЕТ
О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАЗРАБОТКАХ

Разработка и изготовление экспериментальных образцов компонентов
усовершенствованных детекторных устройств супердетектора АТЛАС,
экспериментальное исследование их характеристик, разработка рекомендаций по
монтажу и эксплуатации компонентов усовершенствованных детекторных устройств в
составе супердетектора АТЛАС

по теме:

СОЗДАНИЕ СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ
КОМПОНЕНТОВ СУПЕРДЕТЕКТОРА НОВЫХ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ АТЛАС
БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА ЦЕРН ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ РОЖДЕНИЯ И РАСПАДА ЧАСТИЦ

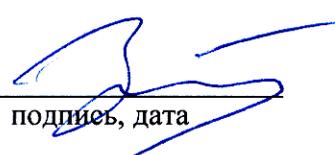
(промежуточный)

Этап 4

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям
развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»

Соглашение о предоставлении субсидии с Минобрнауки России
от 20.10.2014 № 14.610.21.0005 с дополнительными соглашениями № 1 от 25.05.2015 г. и
№2 от 4.12.2015 г.

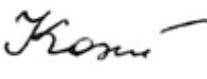
Руководитель ПНИЭР,
Зам. директора института,
д-р физ.-мат. наук, профессор

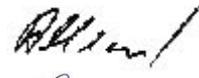
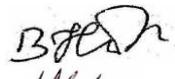
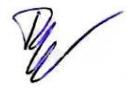

подпись, дата

А.М.Зайцев

Протвино, 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

<p>Зам. директора института, д-р физ.- мат. наук, профессор Вед. научн. сотрудник канд. физ.-мат. наук, ст научн. сотрудник Начальник лаборатории, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник.</p>		<p>А.М. Зайцев ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>весь отчёт</p>
<p>Вед. научн. сотрудник канд. физ.-мат. наук, ст научн. сотрудник Начальник лаборатории, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник.</p>		<p>А.Б.Фенюк ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>весь отчёт</p>
<p>Ст. научн. сотрудник.</p>		<p>О.Л.Федин ФГБУ ПИЯФ</p>	<p>подраздел 1.1, приложения 1 и 2</p>
<p>Инж.-конструктор</p>		<p>В.П.Малеев ФГБУ ПИЯФ</p>	<p>подраздел 1.1, приложение 1 и 2</p>
<p>Вед. инженер Начальник сектора, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>А.Т.Сулейманов ФГБУ ПИЯФ</p>	<p>подраздел 1.1 приложение 1 и 2</p>
<p>Вед. научн. сотрудник канд. физ.-мат. наук, ст научн. сотрудник</p>		<p>С.К.Патричев ФГБУ ПИЯФ</p>	<p>подраздел 1.1</p>
<p>Вед. научн. сотрудник канд. физ.-мат. наук, ст научн. сотрудник</p>		<p>А.П.Чеплаков ОИЯИ</p>	<p>подраздел 1.2</p>
<p>Ст. инженер</p>		<p>Г.А.Шелков ОИЯИ</p>	<p>подразделы 1.2, 1.4 подразделы 1.2, 1.3, 1.4, приложение 3</p>
<p>Зам.нач.отдела, м.н.с. Начальник лаборатории, д-р физ.- мат. наук, профессор, академик РАН Вед. научн. сотрудник канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>А.Л.Гонгадзе ОИЯИ</p>	<p>раздел 7</p>
<p>Руководитель группы канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>Е.А. Ладыгин ОИЯИ</p>	<p>раздел 7</p>
<p>Вед. научн. сотрудник канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>С.П.Денисов ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>раздел 4,</p>
<p>Руководитель группы канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>А.В.Козелов ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>раздел 4</p>
<p>Ст. преподаватель Начальник сектора, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>А.С.Романюк НИЯУ МИФИ</p>	<p>подраздел 1.5</p>
<p>Вед. научн. сотрудник, д-р физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>С.Ю.Смирнов НИЯУ МИФИ</p>	<p>подраздел 1.5</p>
<p>Вед. научн. сотрудник, д-р физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>Р.М.Фахрутдинов ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>раздел 3, приложение 4</p>
<p>Мл. научн. сотрудник</p>		<p>А.С.Кожин ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>раздел 3, приложение 4</p>
		<p>И.С.Плотников ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>раздел 3</p>

Гл. научн. сотрудник Д-р физ.-мат наук, профессор		В.И.Рыкалин ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	раздел 5
Ст. научн. сотрудник канд. физ.-мат. наук.		А.Н.Карюхин ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	раздел 5
Глав. Научн. сотрудник, д-р физ.-мат наук, профессор		В.А.Сенько ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	раздел 6
Ст. научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук.		Е.А.Старченко ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	раздел 6
Нач. сектора, канд. физ.-мат. наук.		А.Г.Мягков ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	подраздел 8.3
Научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук.		О.В.Соловьянов ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	раздел 6
Ст. научн. сотрудник канд. физ.-мат. наук.		В.И.Николаенко ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	раздел 6
Научный сотрудник		А.А.Солодков ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	раздел 6
Вед. научн. сотрудник, д-р физ.-мат. наук, профессор		Л.Н.Смирнова МГУ	подраздел 8.5
Ст. научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук.		С.Ю.Сивоклоков МГУ	подраздел 8.5
Мл. научн.сотрудник		С.М.Турчихин МГУ	подраздел 8.5
Нач. сектора, канд. физ.-мат. наук.		А.В.Багуля ФГБУ ФИАН	раздел 8.2
Вед. научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник.		В.О.Тихомиров ФГБУ ФИАН	подраздел 8.4
Зам. директора института, д-р физ.- мат. наук, профессор		Ю.А.Тихонов БИЯФ СО РАН	подраздел 8.1
Ст. научн. сотрудник		А.Л.Масленников БИЯФ СО РАН	подраздел 8.1, приложение 5
Ст. научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук.		И.И.Цукерман ФГБУ ИТЭФ	подраздел 8.6
Нормоконтролёр		Е.Е.Савина ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	весь отчёт

РЕФЕРАТ

Отчет 109 стр., 83 рис., 6 таблиц, 11 источников и 5 приложений.

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ЦЕРН, 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, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, БОЗОН ХИГГСА

Объектом ПНИЭР являются детекторы установки АТЛАС на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРНе, компоненты детекторов и программное обеспечение для организации триггеров, сбора и обработки данных детекторов 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 выполнялись совместно сотрудниками российских и зарубежных институтов - участников сотрудничества АТЛАС. Ниже приведен перечень выполненных работ третьего этапа проекта, представленных в отчёте.

Выполнены следующие работы по камерам для новых малых колёс АТЛАС:

- сборка и испытания лабораторных образцов тонкозачерненных камер (ТЗК);
- изготовление лабораторных образцов микроячеистых камер (МИК);
- отработка технологии сборки квадруплетов на основе МИК;
- отработка технологии интеграции квадруплетов МИК с ТЗК;
- изготовление рентгеновских сканнеров (РС) и проведение пуско-наладочных работ.

Разработаны программы и методики проведения испытаний экспериментальных образцов, проводимых на этапе.

Изготовлены экспериментальные образцы мюонных камер ДТМ с проведением испытаний на герметичность и высоковольтную стабильность.

Разработана рабочая документация на варианты прототипа миникалориметра АТЛАС

Проведено облучение образцов сцинтиллятора для горячих зон в различных радиационных полях.

Выполнена проверка работы электронных модулей ЦКСК, включённых в общую систему сбора информации адронного калориметра.

Для модулей новой электроники ЖАК разработаны предварительные формирователи электронных сигналов ЖАК и схема подключения цифрового управляющего триггерного модуля к каналу считывания торцевого калориметра.

Выполнены следующие работы по модернизации специального программного обеспечения (СПО):

- разработка программного обеспечения для прецизионного «офф-лайн» детектирования спорадических шумовых всплесков в каналах ЖАК;
- тестирование рабочей версии СПО для РС на реальных образцах РС, заключительная проверка методики управления РС, систем сбора и хранения информации, анализа и мониторинга данных;
- оптимизация алгоритмов идентификации электронов в условиях возросшей загрузки трекового детектора переходного излучения (ТДПИ);
- анализ возможностей оптимизации алгоритмов трекинга во внутреннем детекторе с учетом данных, полученных на БАК после длительной остановки;
- разработка алгоритмов отбора событий распада дважды тяжелых (B_c) мезонов и тяжелых барионов;
- модернизация алгоритма поиска тяжёлого бозона Хиггса в СПО по результатам моделирования.

СОДЕРЖАНИЕ

	Определения, обозначения и сокращения	8
	Введение	9
	Основная часть	11
1	ПНИЭР по камерам новых малых колёс.....	11
1.1	Сборка и испытания лабораторных образцов ТЗК.....	11
1.2	Изготовление лабораторных образцов МИК.....	18
1.3	Отработка технологии сборки квадруплетов на основе МИК	23
1.4	Отработка технологии интеграции квадруплетов МИК с ТЗК	27
1.5	Изготовление РС и проведение пуско-наладочных работ	32
2	Разработка программ и методик проведения испытаний экспериментальных образцов, проводимых на этапе.....	38
3	Изготовление экспериментальных образцов мюонных камер ДТМ с проведением испытаний на герметичность и высоковольтную стабильность ..	39
4	Разработка рабочей документации на варианты прототипа миникалориметра и согласование её с другими участниками работ по миникалориметру и с Сотрудничеством АТЛАС	44
5	Облучение образцов сцинтиллятора для горячих зон в различных радиационных полях	46
6	Проверка работы электронных модулей ЦКСК, включённых в общую систему сбора информации адронного калориметра	52
7	Разработка модулей новой электроники ЖАК. Разработка предварительных формирователей электронных сигналов ЖАК и схем подключения цифрового управляющего триггерного модуля к каналу считывания торцевого калориметра	57
8	Работы по модернизации специального программного обеспечения	61
8.1	Разработка программного обеспечения для прецизионного «офф-лайн» детектирования спорадических шумовых всплесков в каналах ЖАК.....	61
8.2	Тестирование рабочей версии СПО для РС на реальных РС, заключительная проверка методики управления РС, систем сбора и хранения информации, анализа и мониторинга данных	65
8.3	Оптимизация алгоритмов идентификации электронов в условиях возросшей загрузки ТДПИ	70
8.4	Анализ возможностей оптимизации алгоритмов трекинга во внутреннем детекторе с учетом данных, полученных на БАК после длительной остановки	55
8.5	Разработка алгоритмов отбора событий распада дважды тяжелых (B_c) мезонов и тяжелых барионов	84
8.6	Модернизация алгоритма поиска ТБХ в СПО по результатам моделирования	95

Заключение	99
Список использованных источников	101
Приложение 1. Акт изготовления лабораторных образцов ТЗК.	102
Приложение 2. Протокол испытаний лабораторных образцов ТЗК	103
Приложение 3. Акт изготовления лабораторных образцов МИК.....	105
Приложение 4. Протокол испытаний лабораторных образцов мюонных камер ДТМ	106
Приложение 5. Базовое и расширенное руководство по использованию ПО для прецизионного «офф-лайн» детектирования спорадических шумовых всплесков в каналах ЖАК.....	108

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о ПНИЭР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

АТЛАС	A Toroidal LHC Apparatus – Тороидальный детектор на БАК
Адроны	(от др.-греч. ἄδρῶν «крупный», «массивный») – термин предложен советским физиком Л. Б. Окунем в 1962 году, для класса элементарных частиц, подверженных сильному взаимодействию.
Коллайдер	(от англ. collide – сталкиваться) – ускоритель встречных пучков, предназначенный для изучения продуктов соударений частиц
Светимость	параметр ускорителя, характеризующий количество первичных взаимодействий частиц из встречных пучков, в единицу времени.
Эмиттанс	(англ. emittance) – численная характеристика ускоренного пучка заряженных частиц, равная объёму фазового пространства (в общем случае – шестимерного), занимаемого этим пучком.
Стандартная модель	теория в физике элементарных частиц, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие элементарных частиц.
Бозон Хиггса	фундаментальная частица, ответственная за наличие масс у себя самой и других фундаментальных частиц
Триггер	процедура для выделения из потока информации о взаимодействиях, 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.
Калориметр	прибор для измерения энергии частиц.
ЦКСК	цезиевая калибровка сцинтилляционного калориметра
ТДПИ	трековый детектор переходного излучения
HLT	(high level trigger) триггер высокого уровня
ЖАК	жидкоаргоновый калориметр
КХД	квантовая хромодинамика – теория сильных взаимодействий.
АТСА	Advanced Telecommunications Computing Architecture – стандарт телекоммуникационного оборудования.
АЦП	аналого-цифровой преобразователь.
ЦАП	цифро-аналоговый преобразователь
ВОЛП	волоконно-оптическая линия передачи данных.
ПЛИС	программируемая логическая интегральная схема.
ATHENA	программная среда (набор библиотек), ориентированная на задачи эксперимента АТЛАС.

ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения ПНИЭР, выполняемых в рамках федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», являются Соглашение о предоставлении субсидии от 20 октября 2014 г. № 14.610.21.0005, а также Дополнение №1 от 25.05.2015 и Дополнение №2 от 4.12.2015 г.

Тема ПНИЭР - «Создание сверхбыстродействующих радиационно-стойких компонентов супердетектора новых тяжелых частиц АТЛАС Большого адронного коллайдера ЦЕРН для экспериментальных исследований рождения и распада частиц».

К работам по указанной теме в качестве соисполнителей были привлечены: ФГБУ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера РАН, ФГБУ Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Объединённый институт ядерных исследований, «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына), ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» и ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт Теоретической и Экспериментальной Физики».

Работы по модернизации установки АТЛАС начаты давно, практически сразу после ввода в эксплуатацию и, в зависимости от конкретных детекторов, находятся на различных стадиях выполнения. Планирование работ по модернизации детекторов ведётся так, чтобы монтажные работы на установке могли быть осуществлены в сроки, предусмотренные графиками работ при плановых остановках ускорителя. Поэтому название подотчётного этапа – «Разработка и изготовление экспериментальных образцов компонентов усовершенствованных детекторных устройств супердетектора АТЛАС, экспериментальное исследование их характеристик, разработка рекомендаций по монтажу и эксплуатации компонентов усовершенствованных детекторных устройств в составе супердетектора АТЛАС» не вполне отражает весь спектр выполнявшихся работ, а лишь определяет общее их направление.

Работы по модернизации АТЛАС российскими группами велись ранее в рамках государственного контракта от «14» марта 2012 г. № 11.519.11.6029 по теме «Разработка аппаратуры для исследований фундаментальных взаимодействий при повышенной светимости протон-протонных столкновений в международном проекте АТЛАС» и текущие работы являются их продолжением.

Уровень актуальности и новизны ПНИЭР определяется прежде всего следующим.

Большой адронный коллайдер (БАК), расположенный в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН), есть и останется в течение долгого времени ускорителем, который обеспечивает самую высокую энергию протон-протонных столкновений, что обеспечивает новизну и актуальность получаемых с его помощью экспериментальных результатов. Участие российских физиков в модернизации установки АТЛАС и в экспериментах на ней позволит сохранить позиции России в авангарде экспериментальной физики элементарных частиц.

Обоснованием необходимости проведения ПНИЭР является готовность российских физиков сохранить эти позиции, продолжая использовать уникальные экспериментальные возможности, предоставляемые БАК и установкой АТЛАС.

Отчёт состоит из введения, основной части, заключения, списка использованных источников и нескольких приложений. Разбиение на разделы основной части соответствует пунктам плана графика третьего этапа соглашения.

Общий план работ по модернизации АТЛАС представлен в нашем отчёте за 2014 г.

Основными задачами ПНИЭР по теме соглашения являются:

- Проработка как новых детекторов для установки АТЛАС, так и путей модернизации существующих детекторов и программного обеспечения установки с целью обеспечения её эффективной работы в условиях увеличенной светимости и энергии БАК.
- Стимулирование развития международных интеграционных процессов в науке и содействие формированию устойчивых кооперационных связей российских и иностранных научно-исследовательских организаций и университетов, направленных на создание оборудования и программного обеспечения для экспериментальной физики высоких энергий, соответствующих мировому уровню, либо превосходящих его.
- Привлечение молодых ученых и специалистов к исследованиям, направленным на проведение проблемно-ориентированных исследований и разработок, а также к созданию научно-технического задела в кооперации с организациями-участниками проектов ЦЕРН.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 ПНИЭР в обеспечение изготовления новых малых колёс

Технический проект новых малых колёс мюонного спектрометра АТЛАС представлен в работе [1].

1.1 Сборка и испытания лабораторных образцов ТЗК

Проверка толщины катодных плат

Перед сборкой камеры выполняется визуальная проверка катодных плоскостей на наличие дефектов и остатков клея, которые могут появиться в процессе их изготовления. На следующей операции выполняется проверка на электрические замыкания падов и стрипов. Далее проверяется толщина катодных плоскостей. Для этого толщина каждой катодной плоскости со стрипами и падами измеряется по периметру в 19 точках с помощью микрометра. На рисунке 2 показаны результаты измерения для катодной плоскости со стрипами (слева) и катодной плоскости с падами (справа).

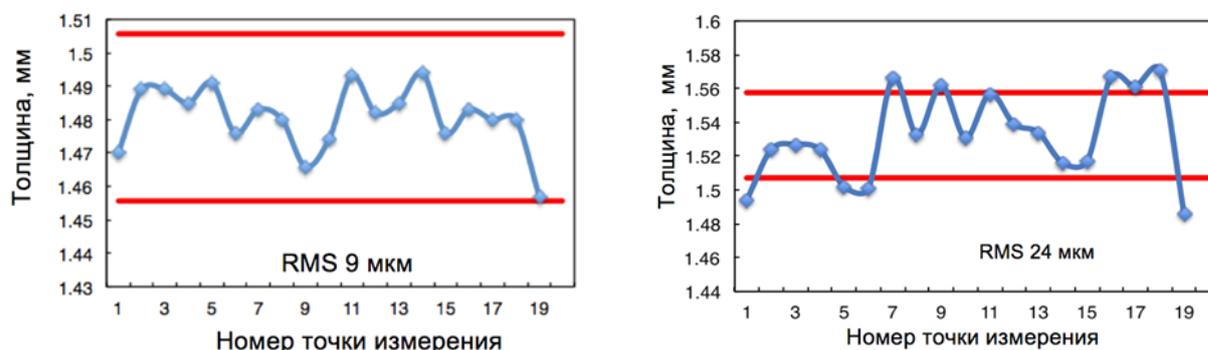


Рисунок 2 - Результаты измерения толщины катодной плоскости со стрипами (слева) и с падами (справа) в 19 точках по их периметру.

Как видно из графиков рисунка 2, среднеквадратичное отклонение составило 9 мкм для катодной плоскости со стрипами и 24 мкм для катодной плоскости с падами. Таким образом, отклонения толщины катодной плоскости со стрипами находятся в пределах спецификации ± 25 мкм, в то время как для катодной плоскости с падами наблюдаются отклонения которые незначительно превышают спецификацию.

Подготовка к нанесению графита на катодные плоскости

Графит напыляется на запрессованный неметаллизированный лист стеклотекстолита толщиной 200 мкм. Для подготовки к напылению используется гранитный стол с

плоскостностью не хуже 20 мкм. Катодная плоскость устанавливается на стол и очищается с помощью изопропилового спирта. Гранитный стол оснащен специальной вакуумной системой, которая позволяет прижать катодную плоскость к столу. Места, на которые будет напыляться графит закрываются кондукторами, которые размещаются между временными рамками. Места, на которые будут приклеиваться поддержки для анодных проволок, закрываются самоклеющейся лентой шириной 3,2 мм. Затем удаляются один за одним временные рамки. После удаления каждой временной рамки место, на котором она была расположена закрывается также самоклеющейся лентой.

На рисунке 3 показана фотография катодной плоскости с кондукторами перед нанесением самоклеющейся ленты при подготовке к напылению графита.

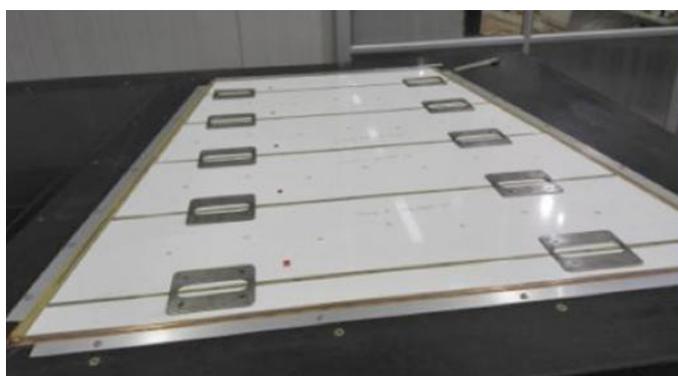


Рисунок 3 - Катодная плоскость, размещенная на гранитном столе (слева) прижатая к нему с помощью вакуумного присоса. Катодная плоскость, на которой расположены кондукторы для подготовки к напылению графита (справа).

Нанесение графита

Нанесение графита на катодные плоскости осуществляется с помощью специально разработанной машины, которая показана на рисунке 4.

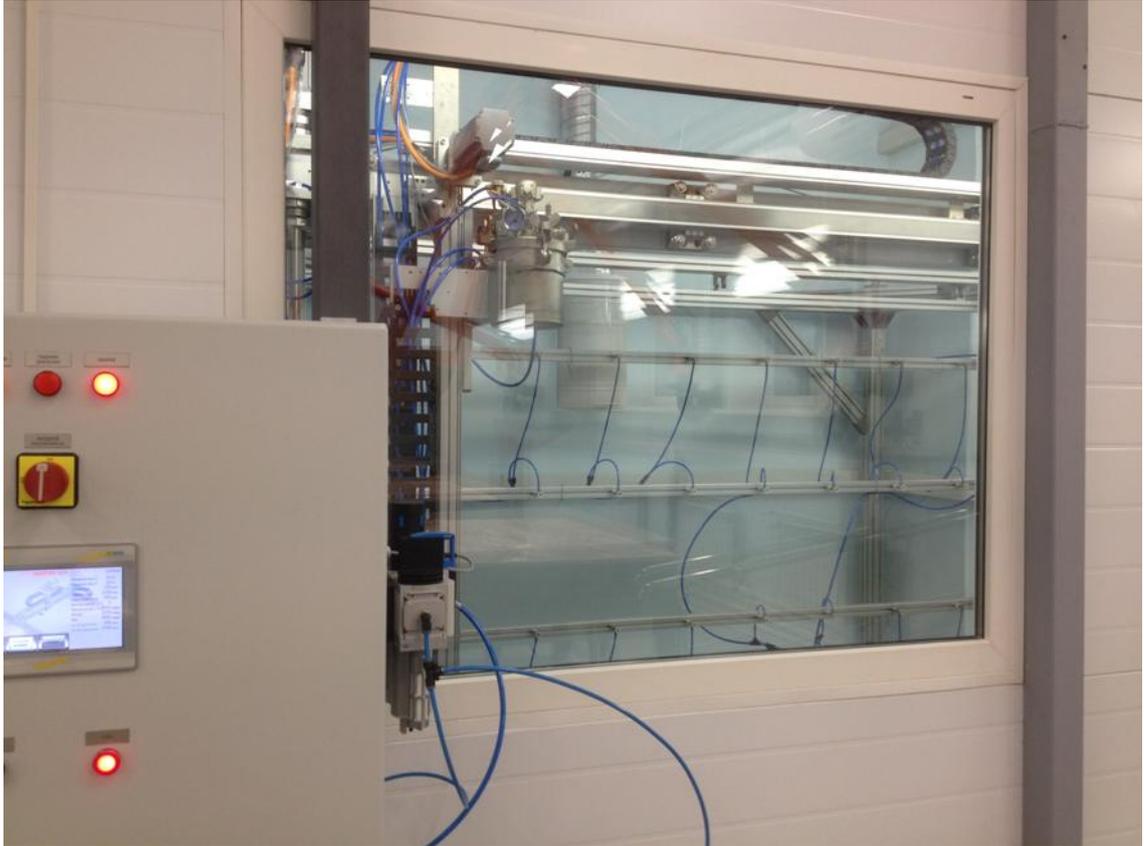


Рисунок 4 - Машина для нанесения графита на катодные плоскости.

Для нанесения используется смесь порошка графита и акрилового лака. Нанесение графита осуществляется в помещении с контролируемой влажностью ($<30\%$) и температурой (25°C). После нанесения графита измеряется его сопротивление (см. рисунок 5). Величина сопротивления должна находиться в пределах от 55 до 75 Ом/см^2 . Те места на катодной плоскости, в которой сопротивление превышает номинальное значение, дополнительно полируются для уменьшения сопротивления. Если после нанесения графита на катодной плоскости есть места, где сопротивление меньше номинального значения, то графит полностью смывается и процедура напыления повторяется заново. На рисунке 5 справа показана фотография, на которой видно как выполняется операция по измерению сопротивления нанесенного графита.

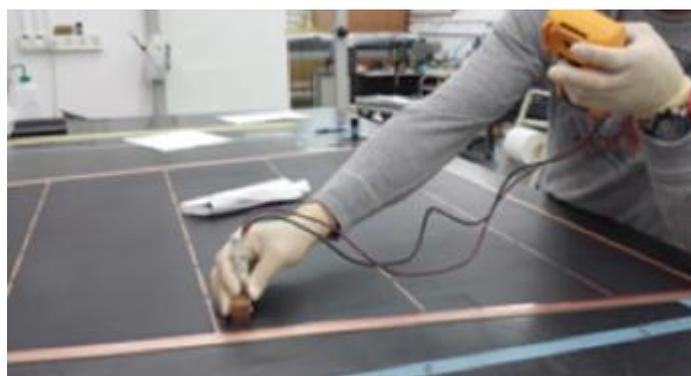
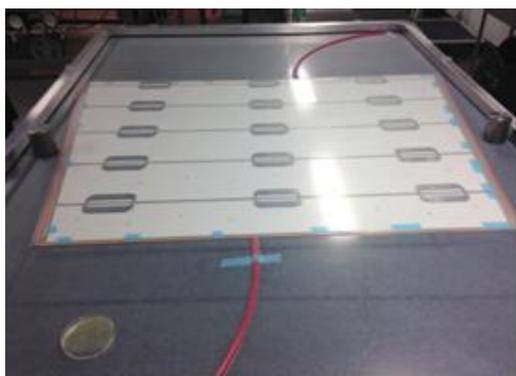


Рисунок 5 – Слева показана катодная плоскость, прижатая к столу. Справа - измерение сопротивления нанесенного на катодную плоскость графита.

Приклеивание рамок и поддержек для анодных проволок.

Катодная плоскость фиксируется на прецизионном гранитном столе, стороной покрытой графитом сверху, и с помощью вакуумной системы прижимается к столу. Поверхность графита очищается с помощью антистатической бумаги. Внешняя рама фиксируется на катодной плоскости с помощью штифтов, а затем на поверхность графита устанавливаются кондукторы. С помощью специального шлифовального инструмента места, где будут располагаться поддержки для анодных проволок в виде кнопок, очищают от графита, при этом пыль удаляется с помощью пылесоса.

Эпоксидную смолу и отвердитель, используемые для приклейки рамок и поддержек анодных проволок, смешивают и откачивают в течение 5 минут. Клей наносится на рамки и на поддержки анодных проволок с помощью специального дозатора, который позволяет контролировать толщину нанесенного клея. После нанесения клея рамки и поддержки размещаются на катодной плоскости. Сверху стол закрывается вакуумной пленкой, из-под которой откачивается воздух. Таким образом, обеспечивается прижим рамок и поддержек к катодной плоскости. Образец клея оставляется на столе, чтобы можно было проверить его затвердение. Через 10 часов проверяется затвердевание образца клея и снимается вакуум под пленкой. На рисунке 5 слева показана фотография катодной плоскости установленной на гранитном столе, которая закрыта сверху вакуумной пленкой, из-под которой откачен воздух. В левом нижнем углу на фотографии виден образец клея оставленный для контроля его затвердевания. После склейки измеряется по периметру толщина катодной плоскости с приклеенными рамками для анодных проволок. В соответствии со спецификацией отклонение толщины от среднего значения не должно превышать ± 40 мкм, а среднеквадратичное отклонение должно быть меньше 30 мкм. На рисунке 6 показаны результаты измерения толщины катодной плоскости с рамками.

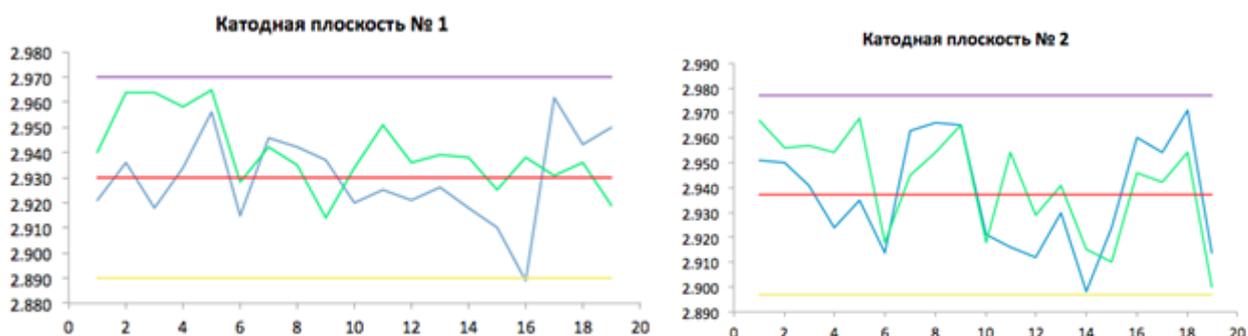


Рисунок 6 - Результаты измерения толщины катодной плоскости с приклеенными рамками для поддержки анодных проволок. По оси X отложен номер точки измерения, а по оси Y толщина в мм. Зеленым показана ожидаемая толщина, то есть сумма толщин катодной плоскости и рамки до склейки. Синим - показана толщина после склейки.

Намотка анодных проволок

В качестве анодной проволоки используется золоченая проволока из вольфрама диаметром 50 мкм. Две катодные плоскости помещаются на специализированный вращающийся стол и прижимаются к столу с помощью вакуумной системы. Для намотки используется специально разработанная машина, которая обеспечивает натяжение проволоки 400 грамм. Намотка происходит в течение 8-12 часов. На рисунке 7 показана намоточная машина, которая состоит из вращающегося стола (рисунок 7 слева) и натяжительного устройства (рисунок 7 справа).



Рисунок 7 - Машина для намотки анодных проволок, которая состоит из вращающегося стола, с вакуумной откачкой для прижима катодных плоскостей (слева), и натяжного устройства (справа).

После намотки анодные проволоки припаиваются к рамкам с помощью

специального припоя и водорастворимого флюса и лишние концы обрезаются. Для того, чтобы удалить остатки флюса катодные плоскости промываются дистиллированной водой под давлением. Далее приступают к проверке натяжения проволок. Для этого стол устанавливается в горизонтальное положение и снимается вакуум с верхней части стола (см. фотографию на рисунке 8 справа).

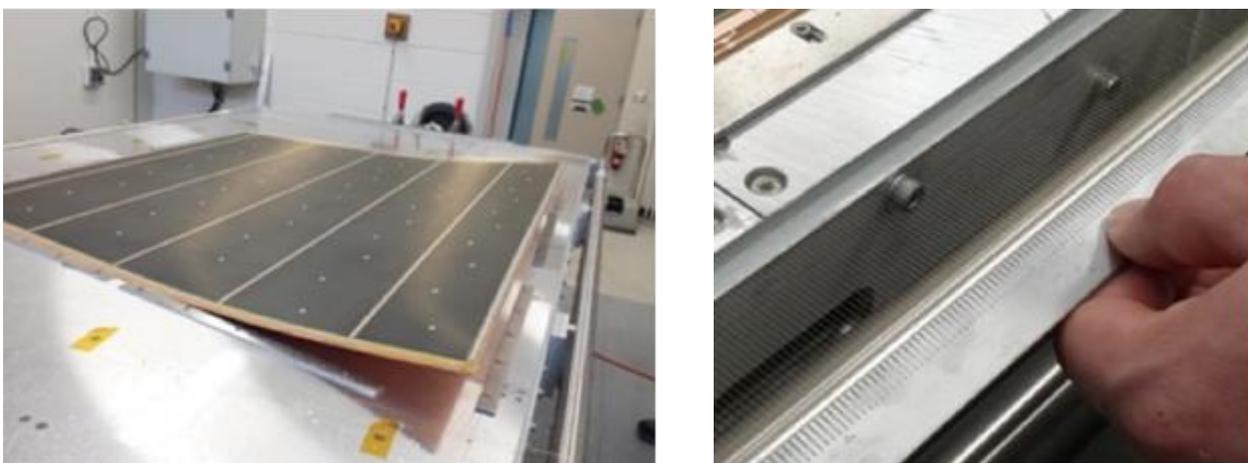


Рисунок 8 - Слева на фотографии показана катодная плоскость после намотки анодных проволок и остановки откачки стола. Хорошо видно, как под действием натянутых проволок катодная плоскость изгибается. Справа на фотографии показана проверка шага намотанных проволок с помощью специальной линейки.

Производится визуальный осмотр всех проволок для обнаружения провисания, замыкания с катодом, изломов и других дефектов. Шаг проволок проверяется с помощью специальной линейки (см. фотографию на рисунке 8 справа). Поврежденные проволоки удаляются.

Сборка однослойной камеры

Надлежащим образом очищенные катоды, один с намотанной проволокой, а второй - без, используются для сборки однослойной камеры. Сборка осуществляется в чистой комнате. Катод с проволокой помещается на прецизионный гранитный стол в специальном зажимном приспособлении. С помощью вакуума катод прижимается к столу. На катодную плоскость с падами, зафиксированную на столе, помещается с помощью направляющих пинов вторая катодная плоскость со стрипами. Поверх второй катодной плоскости с помощью подъемного механизма кладется плита из алюминиевого сотового материала (хоникомб), воздух из которой откачивается, обеспечивая тем самым прижим к плите верхней катодной плоскости. Таким образом, обеспечивается постоянный зазор между двумя катодными плоскостями. Сверху обе плоскости закрываются вакуумной резиной, из-под которой откачивается воздух. После этого под вакуумную резину

закачивается рабочий газ (55% CO₂+45% n-пентан) и на плоскость подается напряжение 3,3 кВ.

Плоскость остается под высоким напряжением не менее 12 часов. После этого высокое напряжение выключается, из-под резины удаляется рабочий газ, а плоскости разбираются. Выполняется визуальное обследование плоскостей и проволок с целью обнаружения высоковольтных пробоев. Места, в которых найдены пробой, ремонтируются. После этого повторяется сборка плоскостей, но уже с клеем из которого предварительно путем откачки удален воздух. Катодные плоскости остаются на столе для полимеризации в течении 12 часов.

На рисунке 9 (фото) показан рабочий момент сборки камеры.

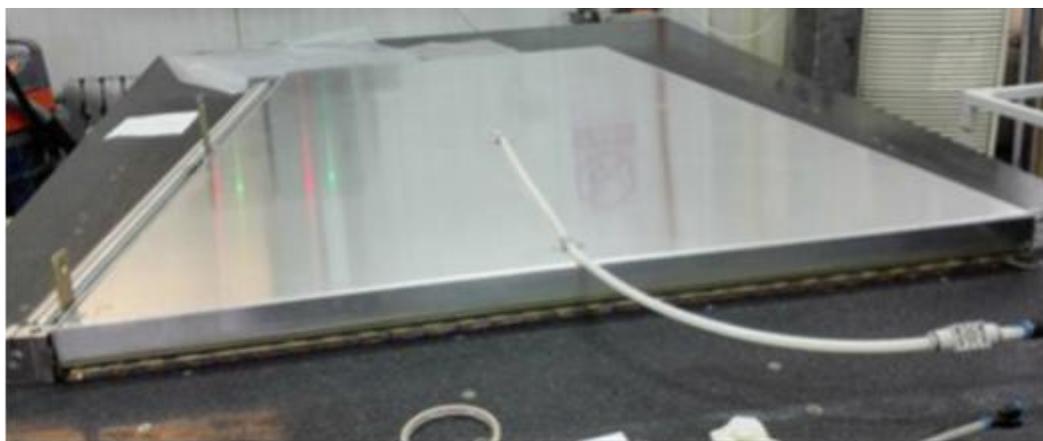


Рисунок 9 – Фотография этапа склейки однослойной ТЗК камеры. Видна плита из алюминиевого сотового материала, помещённая на гранитный стол. Между плитой и столом находится склеиваемый слой ТЗК камеры.

Далее удаляется вакуумная резина и верхняя плита. Один слой камеры по-прежнему остается прижатым к гранитному столу за счет вакуумного прижима снизу. Выполняется к измерению плоскостности, которое выполняется в 19 точках по периметру камеры. Толщина одного слоя должна быть равна $5,95 \pm 0,05$ мм. На рисунке 10 справа показаны результаты измерения толщины, выполненные для одного из собранных лабораторных образцов ТЗК камеры.

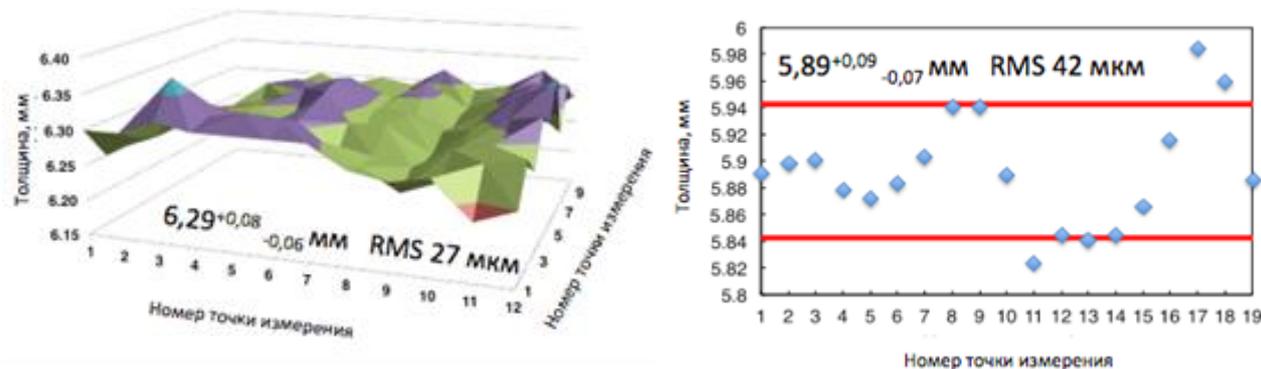


Рисунок 10 - Результаты измерения плоскостности собранного лабораторного образца ТЗК (слева) и толщины камеры, измеренной по периметру в 19 точках (справа).

Среднее значение толщины составило $5,89 \pm 0,09 - 0,07$ мм, что находится в соответствии с требованиями. Среднеквадратичное отклонение составило 42 мкм при допустимом значении 50 мкм. Однако есть несколько точек, которые отклонились от допустимого отклонения в 50 мкм. На рисунке 10 (слева) показан график измерения плоскостности собранного лабораторного образца ТЗК. Как видно из графика собранная камера имеет отклонения от плоскости менее 100 мкм.

Герметизация однослойной камеры

Пространство между двумя катодными плоскостями аккуратно проклеивается. Через пять часов, операция повторяется. Вклеиваются также входной и выходной газовые коннекторы. После проклейки приступают к испытанию собранной однослойной камеры на герметичность. Для этого в камеру подают CO_2 газ, так чтобы обеспечить избыточное давление 6 мбар. После чего, закрываются вход и выход газа из камеры, при этом измеряется давление в камере. Давление не должно падать больше чем на 1 мбар за 5 минут. Если это условие не выполняется, то ищется причина утечки и повторяется операция проклейки в месте утечки газа. Собранные лабораторные образцы ТЗК камер успешно прошли тест на герметичность.

Испытания однослойной ТЗК камеры

Собранные однослойные лабораторные образцы камер продувались не менее 12 часов рабочей газовой смесью. Затем на них подавалось напряжение 3,3 кВ, которое выдерживалось в течении 7 дней. В течение этого времени не наблюдалось превышения тока и высоковольтных пробоев. После этого на камеру подавалось напряжение 2,9 кВ и измерялся темновой ток, который оказался в пределах допустимых значений 100 нА.

На данном этапе работы было успешно собрано два лабораторных образца однослойных

ТЗК камер. Собранные камеры успешно прошли испытания на герметичность и высоковольтные испытания. Протокол испытаний изготовленных камер представлен в комплекте отчётной документации этапа.

Выполненная сборка лабораторных образцов позволила проверить разработанную ранее методику сборки ТЗК камер. На следующем этапе планируется приступить к сборке многослойных тестовых образцов ТЗК камер.

Акт изготовления и протокол испытаний лабораторных образцов ТЗК приведены в Приложениях 1 и 2 к отчёту.

1.2 Изготовление лабораторных образцов МИК.

В 2016 г. продолжались работы группы сотрудников ОИЯИ по созданию микроячеистых камер (МИК) для мюонного спектрометра АТЛАС в ЦЕРН. В течение 4-го этапа плана-графика соглашения были изготовлены 4 МИК.

Процесс производства МИК проиллюстрирован ниже серией фотографий.

Перед склейкой печатные платы проверяются на точность расположения отверстий. Для этой цели используется так называемый stiffback - специально изготовленный кондуктор/шаблон (см. рисунок 11), с нанесенными на него и откалиброванными с точностью до 10 мкм отверстиями.



Рисунок 11 - Проверка и подготовка печатных плат к склейке.

Затем печатная плата размещается на вакуумном столе (показано на рисунке 12).

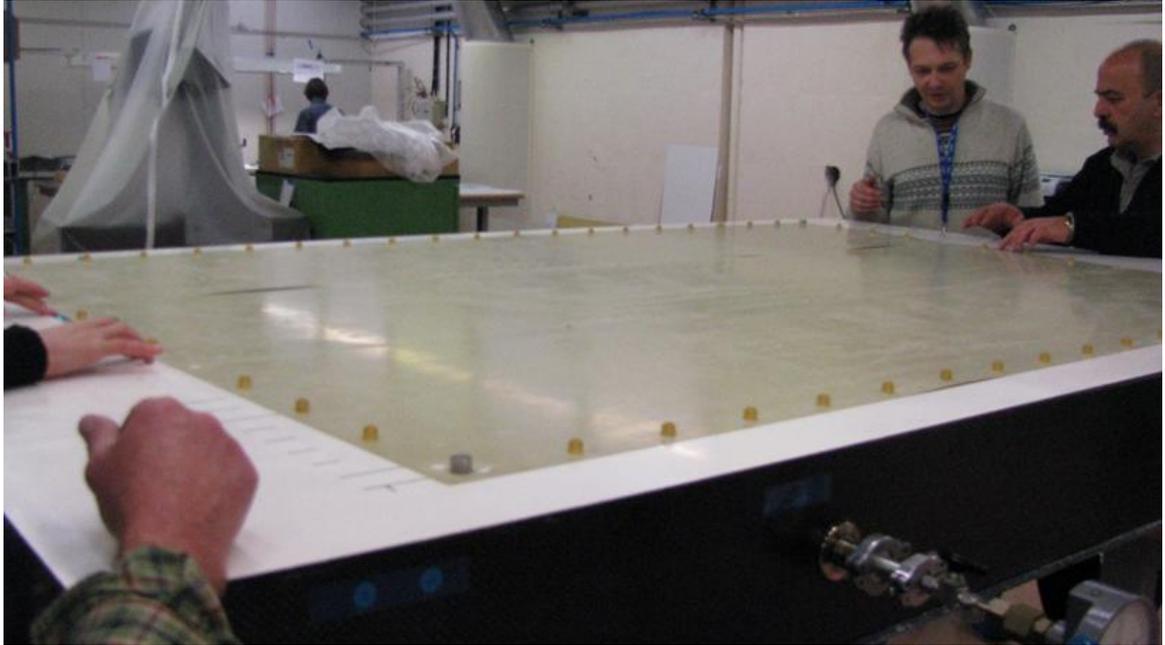


Рисунок 12 - Размещение печатных плат на вакуумном столе.

Этот же шаблон, что используется при проверке печатных плат, применяется для наклейки пластиковых втулок на печатную плату и склейки алюминиевого каркаса (см. рисунок 13).

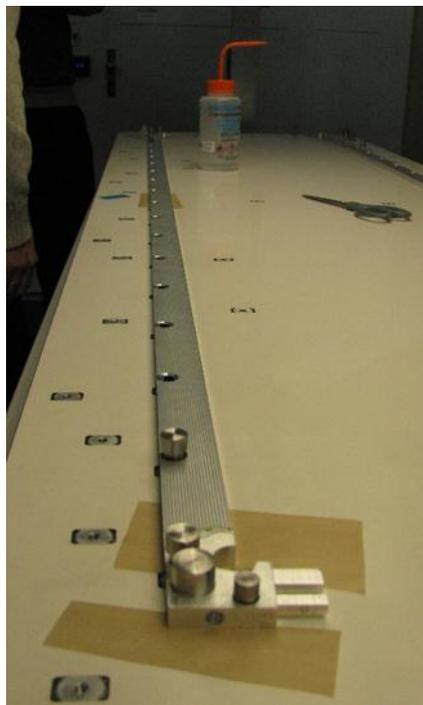


Рисунок 13 - Склейка алюминиевого каркаса

После проверки точности расположения отверстий и склеивания втулок печатные платы выравниваются на вакуумном столе, и фиксируются вакуумом. Проверяется точность их совмещения (зазор между платами должен быть 0,5 мм). Далее, сверху размещается склеенный каркас и проверяется совпадение втулок с отверстиями на каркасе (показано на рисунке 14)

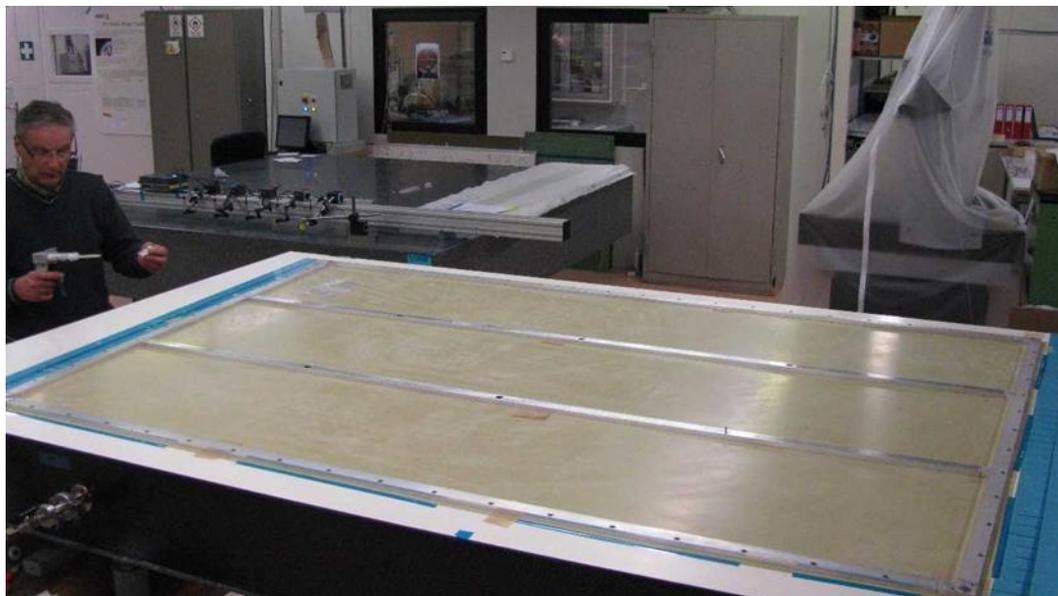


Рисунок 14 - Печатные платы и алюминиевый каркас на вакуумном столе (проверка совмещения втулок с отверстиями на каркасе).

После всех проверок печатные платы вновь выкладываются на вакуумный стол, выравниваются, присасываются вакуумом и заклеивается каптоновой лентой (полиамид) во избежание протечек клея. Затем наносится клей (показано на рисунке 15) и приклеиваются алюминиевый каркас и сотовые панели (рисунок 16).



Рисунок 15 - Нанесение клея на печатные платы.



Рисунок 16 - Монтаж сотовых панелей.

На втором вакуумном столе проводятся те же операции, но уже без каркаса и сотовых панелей. После этого второй вакуумный стол поднимается тельфером, переворачивается и размещается сверху первого вакуумного стола (рисунок 17).



Рисунок 17 - Завершение склейки: МИК между вакуумными столами.

Акт изготовления лабораторных образцов МИК представлен в приложении 3 к отчёту.

1.3 Отработка технологии сборки квадруплетов на основе МИК

Квадруплет представляет собой пакет из пяти микроячеек камер. Необходимо обеспечить их точное взаимное позиционирование (лучше, чем 50 мкм). Усилия, прилагаемые в процессе сборки не должны деформировать МИК. К тому же на сборку квадруплета необходимо тратить разумное время. С учётом этих требований была разработана схема сборки и созданы соответствующие механические устройства для сборки квадруплета. Чтобы избежать деформации камер и свести к минимуму попадание пыли на МИК, было решено производить сборку при вертикальном расположении модулей (см. рисунок 18).



Рисунок 18 - Механическое устройство для сборки квадруплета МИК.

Необходимую точность взаимного расположения камер в пакете обеспечивают юстировочные штифты и ответные щелевые и круглые вставки (см. рисунок 19). Последние клеиваются в точные отверстия считывающих и дрейфовых панелей (рисунок 20).

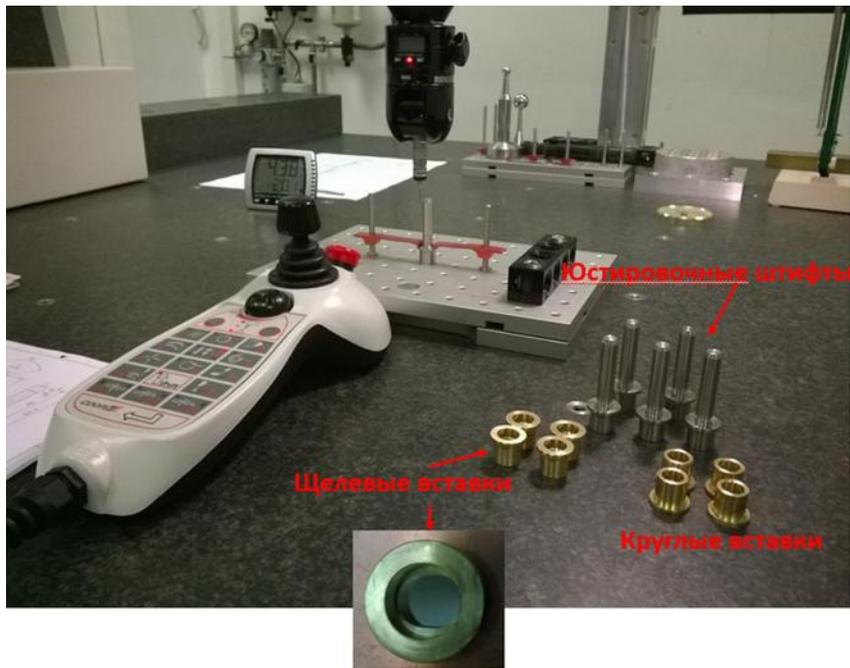


Рисунок 19 - Юстировочные штифты, щелевые и круглые вставки.

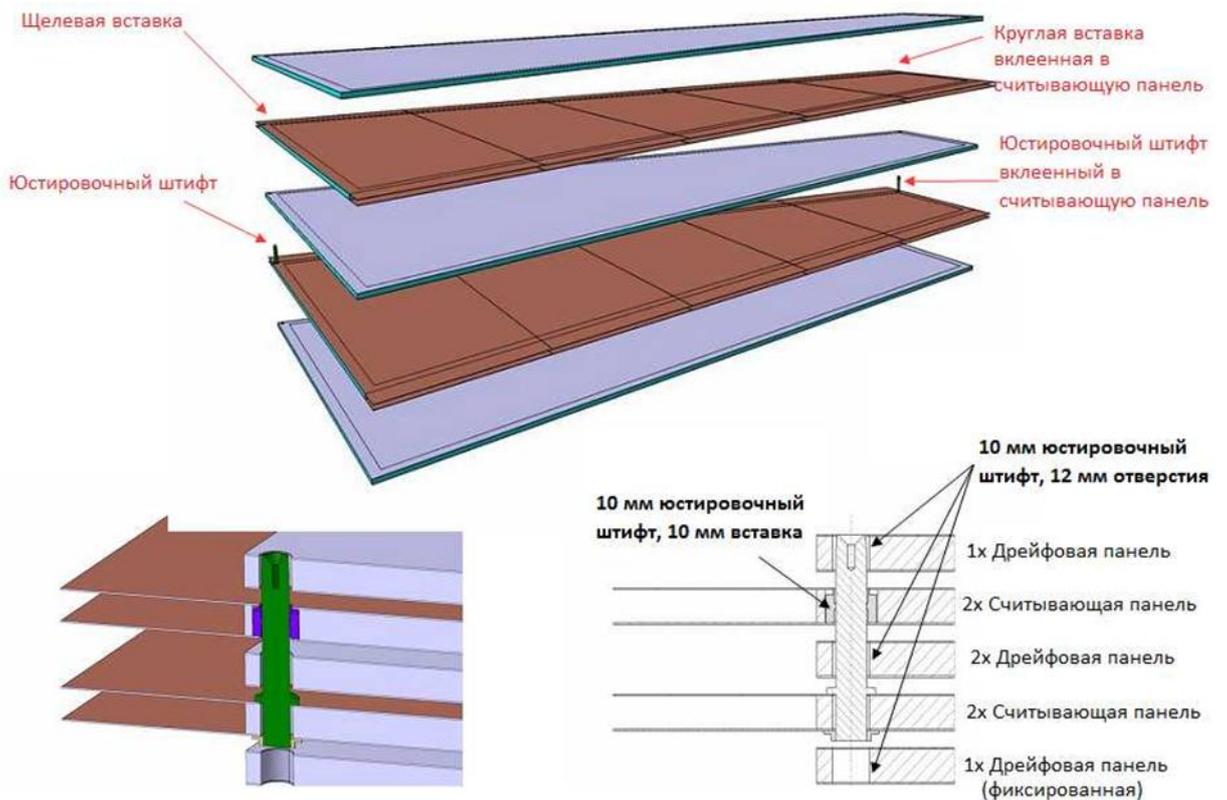


Рисунок 20 - Схема сборки квадруплета с использованием позиционирующих штифтов и вставок

Точностные характеристики юстировочных штифтов, щелевых и круглых вставок следующие:

- Диаметр 10 мм, посадка H7/g6
- Макс. отклонение радиуса 14,5 мкм
- Мин. отклонение радиуса 2,5 мкм
- Макс. угол штифт/вставка 1,7°
- Мин. угол штифт/вставка 0,3°

Панели при сборке поддерживаются структурой, изготовленной из алюминиевых профилей, в которой используются линейные подшипники для перемещения панелей вдоль осей Z и X (± 5 мм). Для точного горизонтального и вертикального выравнивания X и Y оси имеют две пары микрометрических винтов, а также тензодатчики для выравнивания по оси Y - они будут указывать на нарушение центровки при сборке, что дает индикацию для корректировки с помощью микрометрических винтов (см. рисунок 21).



Рисунок 21 - Микрометрический винт и тензодатчик на сборочном приспособлении.

Порядок сборки следующий: сначала на неподвижной части устройства крепится дрейфовая панель (рисунок 22).



Рисунок 22 - Соединение двух МИК. Справа - первая дрейфовая панель.

Затем, используя микрометрические винты и показания тензодатчиков, на штифты поочередно нанизываются все остальные панели квадруплета, предварительно располагаемые на движущейся части устройства. В конце процесса весь квадруплет стягивается с помощью винтов. Тесты, проведенные с использованием макетов панелей, показали, что на монтаж каждой панели тратится порядка 5 минут.

1.4 Отработка технологии интеграции квадруплетов МИК с ТЗК

Квадруплеты МИК и ТЗК интегрируются посредством алюминиевых штифтов на несущей конструкции (спейсере), которая в свою очередь крепится на основную конструкцию НМК с помощью «ушек» и кинематических креплений. Контроль точного положения квадруплета осуществляется с помощью вставок и реперных штифтов. Схема интеграции, включая спейсер, представлена на рисунке 23.

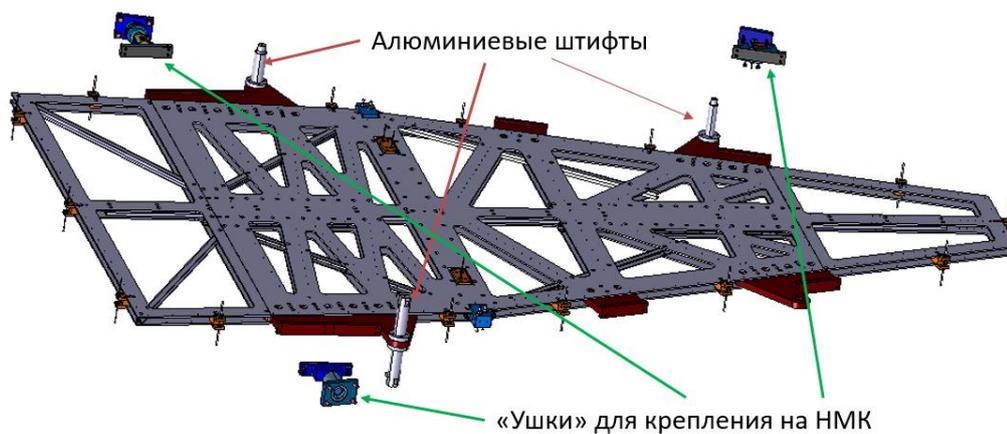
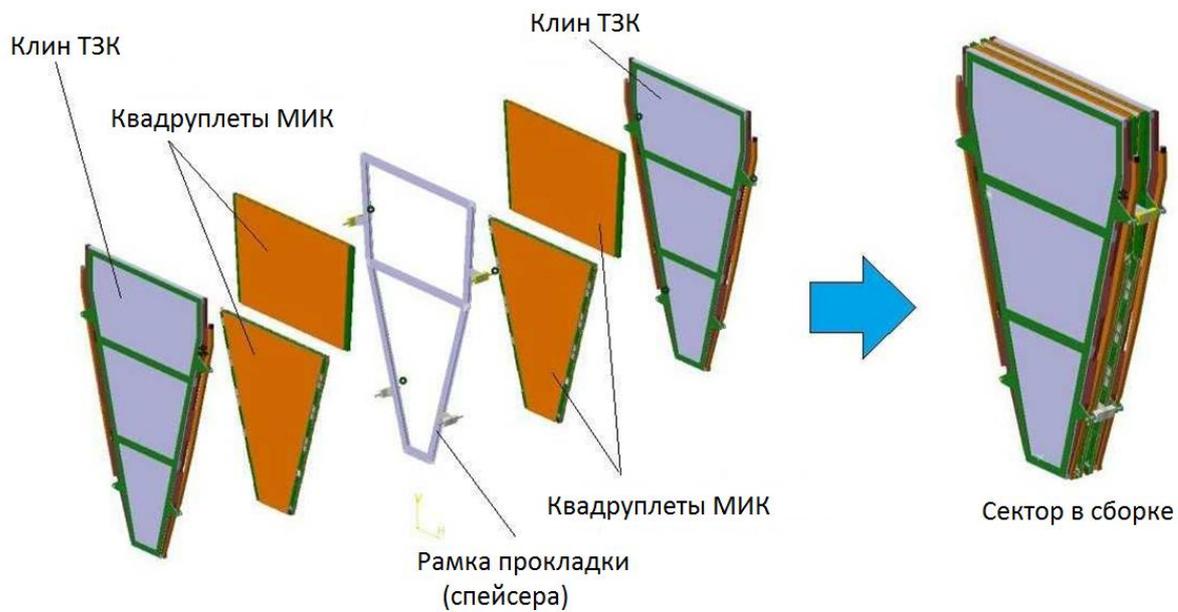


Рисунок 23 - Схема интеграции МИК с ТЗК и спейсером

Типы кинематических креплений и направляющих показаны на рисунке 24, а на рисунке 25 показано соединение с «ушками» спейсера.

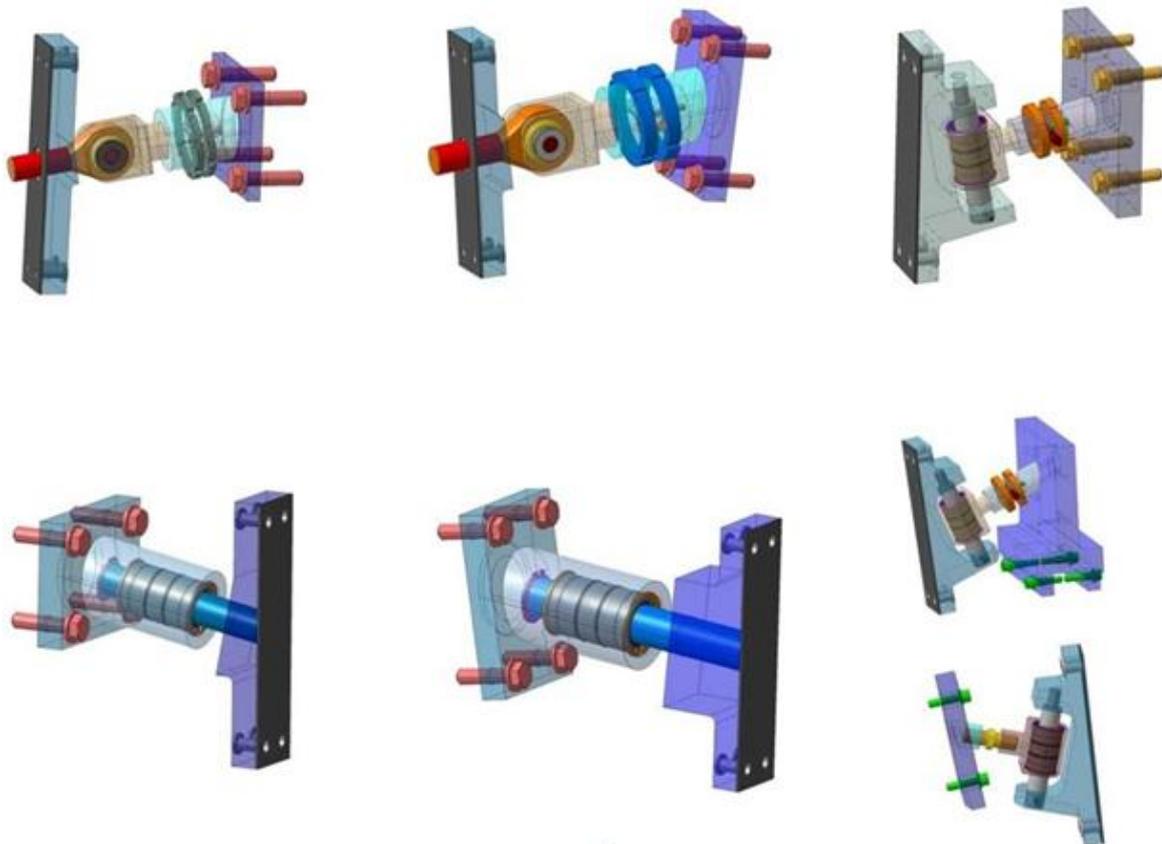


Рисунок 24 - Типы кинематических креплений (верхний ряд) и направляющих (нижний ряд)

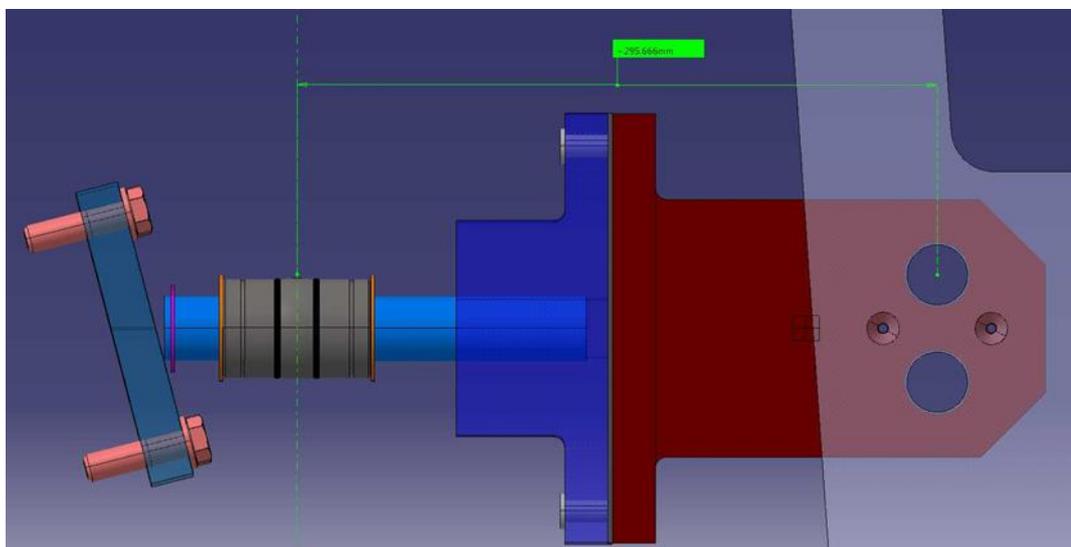


Рисунок 25 - Соединение с «ушками» спейсера.

В настоящий момент закончено изготовление деталей спейсера. Идет его сборка и тестирование (см. рисунок 26).

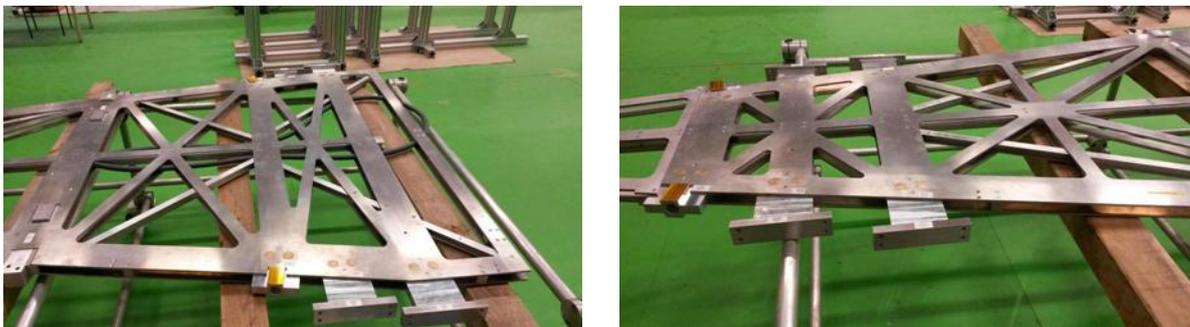
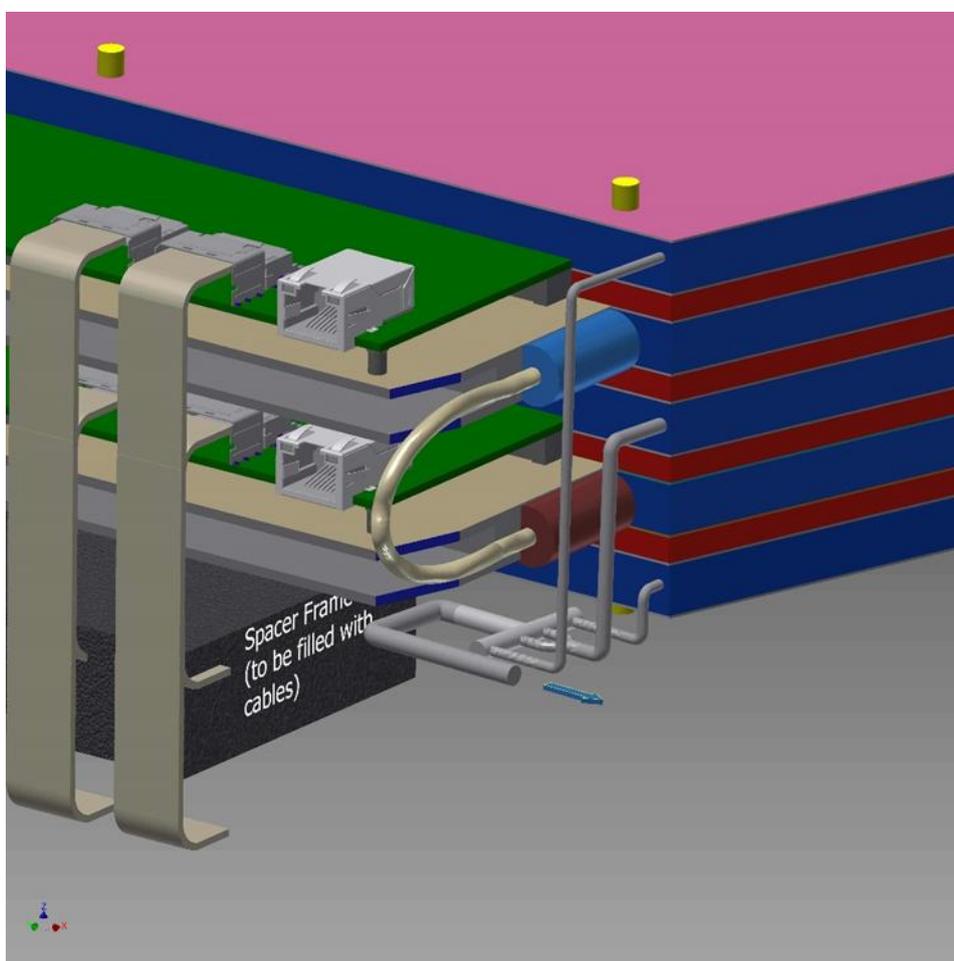
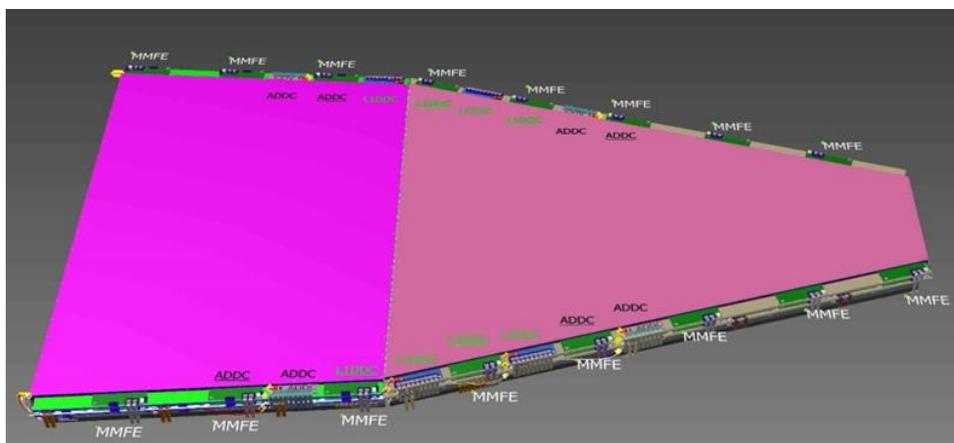


Рисунок 26 Общий вид спейсера

При сборке квадруплетов необходимо обеспечить проводку коммуникаций от коллектора до камер. Для этих целей используются лотки, предусмотренные между считывающими МИК (по два с каждой стороны) и отдельного дополнительного лотка под ними (см. рисунок 27).



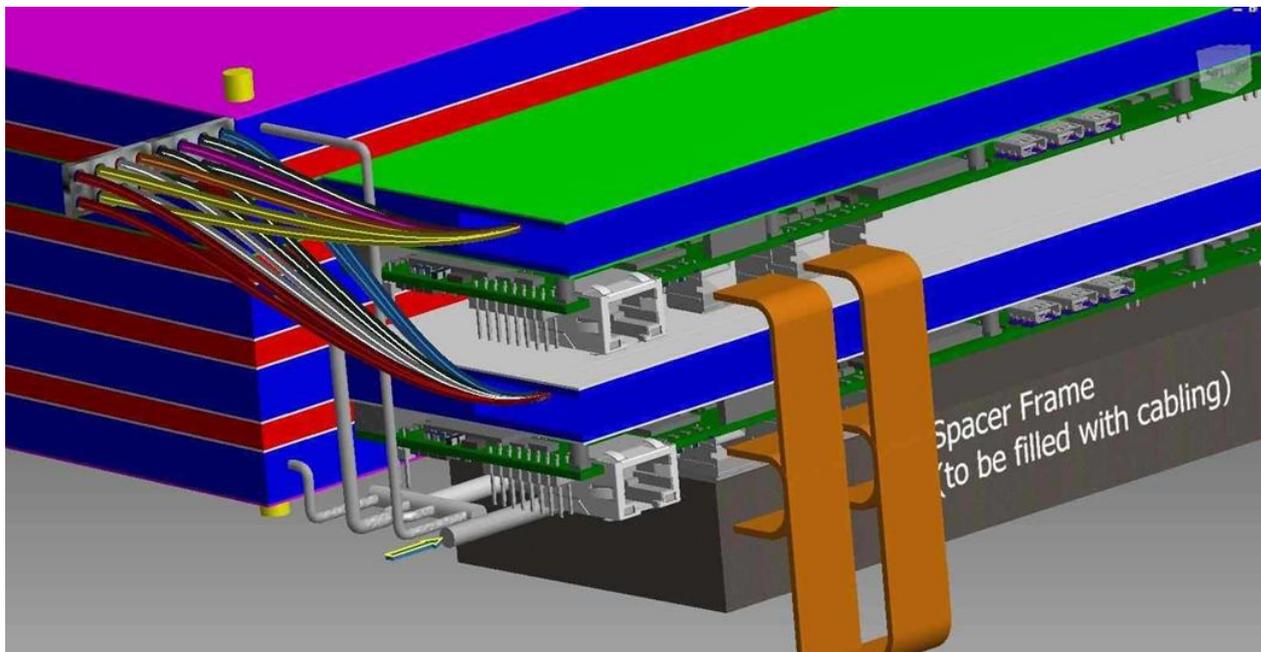


Рисунок 27 - Расположение основных и дополнительного лотков для размещения коммуникаций.

Руководства по сборке квадруплетов МИК и по интеграции МИК с ТЗК представлены в комплекте отчётной документации по четвертому этапу соглашения.

1.5 Изготовление РС и проведение пуско-наладочных работ.

Для производства лабораторных образцов рентгеновских сканеров, на ранних этапах выполнения данного проекта были разработаны технические требования, по которым созданы проекты РС двух типов: тип 1 (показан на рисунке 28), в котором применена сварная стальная рама, а перемещение каретки осуществляется с помощью шаговых двигателей, и тип 2 (рисунок 29), в котором рама выполнена из алюминиевых профилей, и каретка перемещается с помощью сервоприводов.



Рисунок 28 - Лабораторный образец рентгеновского сканера (РС) тип 1.

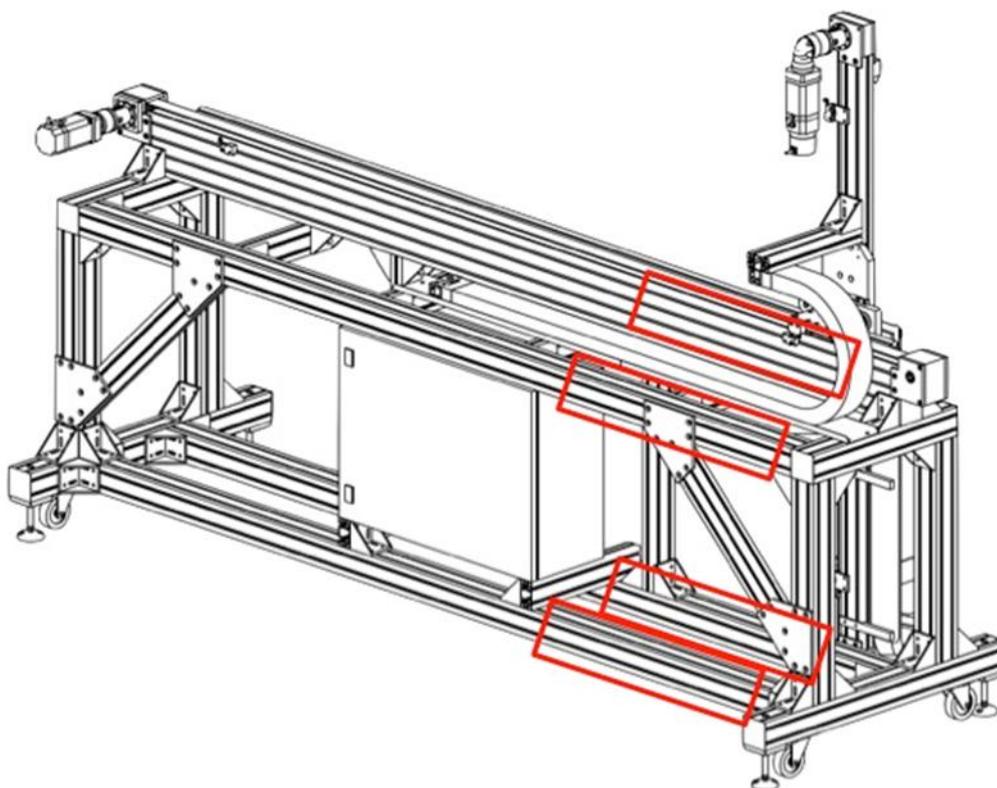


Рисунок 29 - Изометрическая проекция сканера типа 2. Красным показаны горизонтальные направляющие, подлежащие обрезке.

Также для производства лабораторных образцов РС были изготовлены круглые коллиматоры для сканирования полноразмерных камер sTGC (рисунок 30).

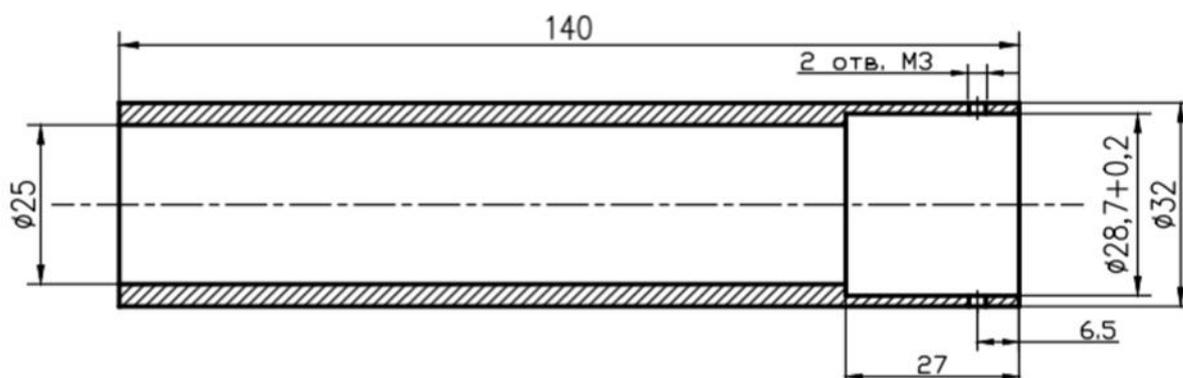


Рисунок 30. Чертеж коллиматора рентгеновской трубки для сканирования полноразмерных камер sTGC. Материал – латунь.

Тестирование каждого экземпляра прошло успешно. Однако, уже во время проведения пуско-наладочных работ выяснилось, что один из сканеров предназначается для сканирования модулей меньшего размера, вместе с тем, подготовленная именно для этого сканера рабочая комната в Университете Карлтоне, защищенная с помощью

свинцовых экранов от рентгеновского излучения, была построена меньшего размера, и не может вместить стандартный сканер по горизонтали. Поэтому было принято решение изменить размеры одного из сканеров, а именно – тип 2, собранный из алюминиевых профилей. Только эта модель может быть укорочена без существенных конструктивных изменений, с сохранением при этом необходимой для заданных модулей области сканирования.

Модернизации подверглись: дюралюминиевый профиль рамы, дюралюминиевый профиль направляющей, нержавеющие рельсы и армированный стальным тросом ремень. Основная конструкция рамы при этом не разбиралась, за исключением шкафа управления, который сдвинули на новую геометрическую середину. На рисунках 31 и 32 показаны фотографии сканера до и после модернизации.



Рисунок 31 - РС типа 2 до модернизации. Длина 3340 мм, область сканирования 2300x1450 мм.



Рисунок 32 - Сканер типа 2 после модернизации. Длина 2500 мм, область сканирования 1750x1450 мм.

После модернизации сканера были вновь проведены испытания на отклонения позиционирования каретки от заданного шага, которые показали соответствие техническим требованиям. Результаты «до» и «после» показаны на рисунках 33-36.

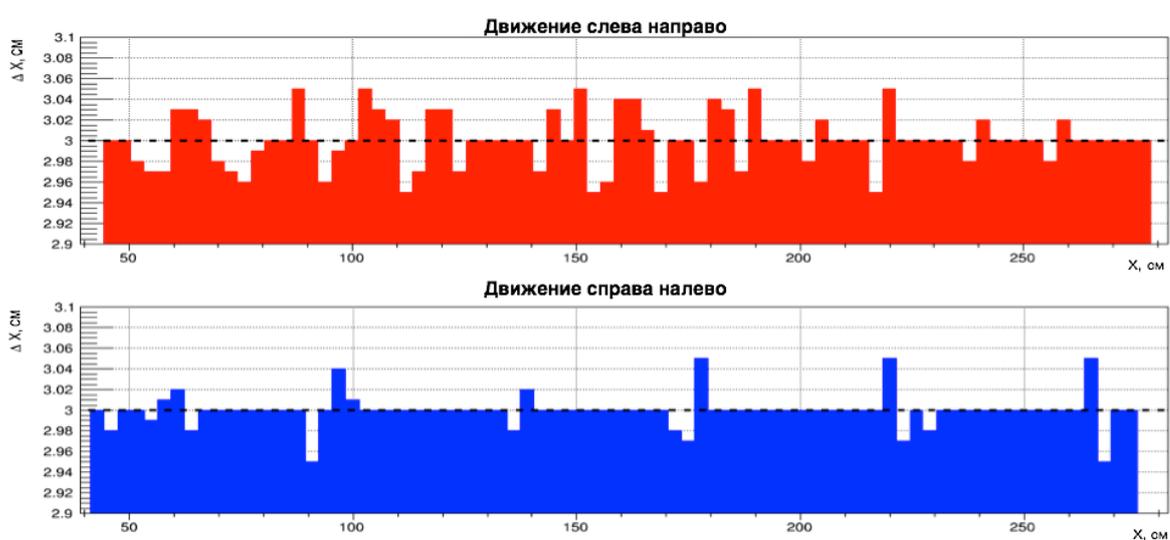


Рисунок 33. Гистограмма пошагового позиционирования сканера по горизонтальной оси до модернизации.

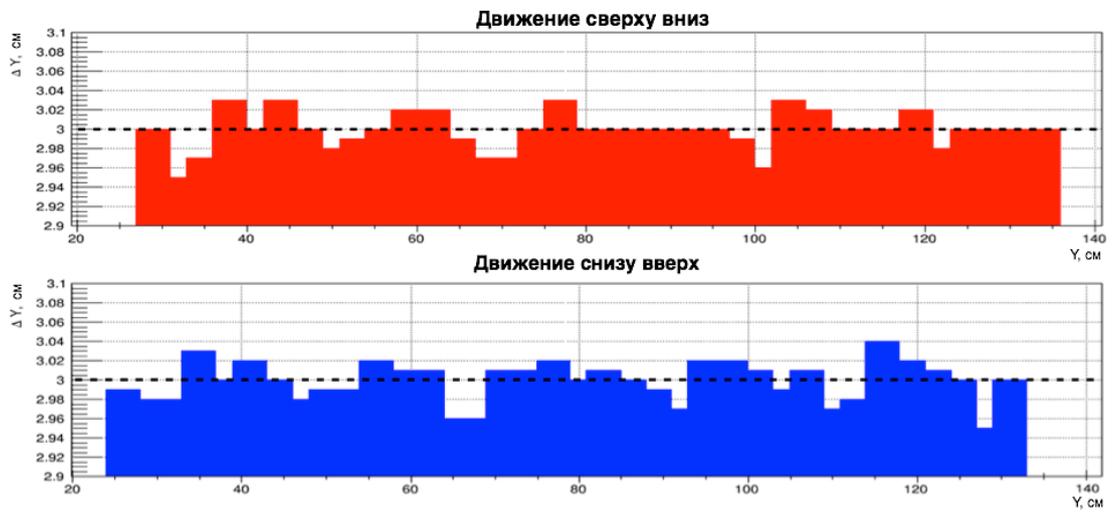


Рисунок 34 - Гистограмма пошагового позиционирования сканера по вертикальной оси до модернизации.

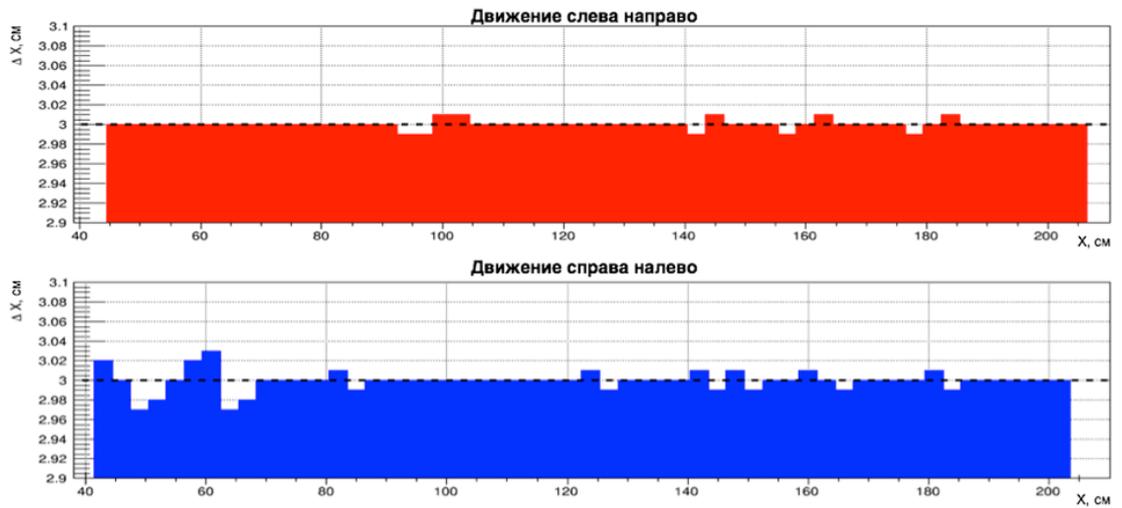


Рисунок 35 - Гистограмма пошагового позиционирования сканера по горизонтальной оси после модернизации.

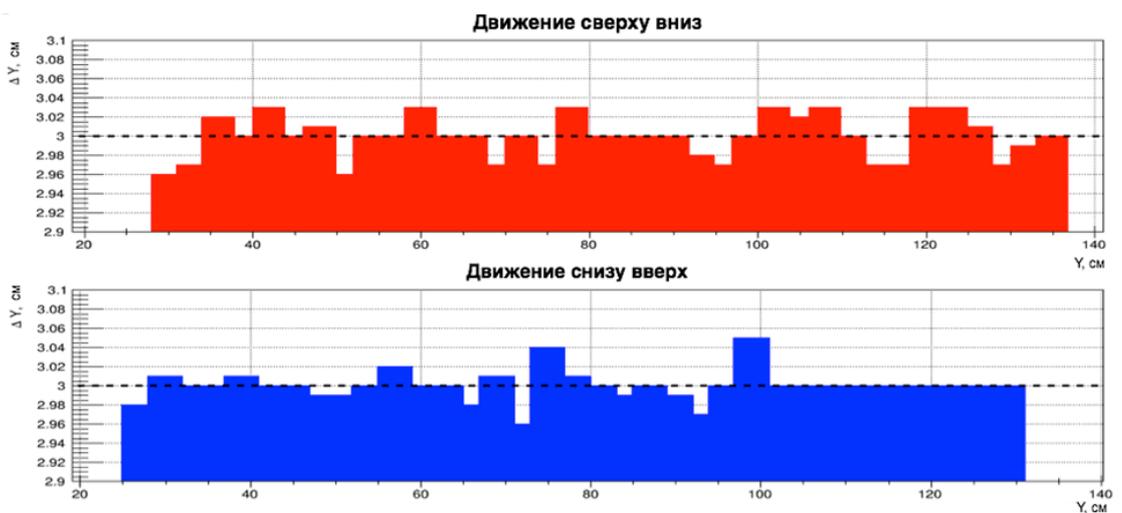


Рисунок 36 - Гистограмма пошагового позиционирования сканера по вертикальной оси после модернизации.

Из приведённых гистограмм видно, что точность позиционирования сканера не только не ухудшилась, но даже улучшилась по горизонтальной оси.

Были также сделаны тесты на возможную потерю шагов по горизонтали и вертикали. Получены следующие результаты:

По горизонтальной оси:

Движение каретки начинается с $X=42,9$ см. Перемещаемся вправо до 129 см и обратно на $X=42,9$ см, со скоростью 3,3 см/сек, повторяем эту операцию 20 раз. В итоге смещения нет, каретка возвращается ровно на $X=42,9$ см. Тот же результат получен и при движении влево.

По вертикальной оси:

Движение каретки начинается с $Y=81,7$ см. Поднимаемся вверх до 29,2 см и опускаемся обратно, на $Y=81,7$ см со скоростью 3,3 см/сек, повторяем эту операцию 20 раз. В итоге отклонения при движении нет, каретка точно возвращается на $Y=81,7$ см. Тот же результат получен и при движении вниз.

После испытания можно сделать вывод, что после уменьшения размеров горизонтальной оси, РС сохранил точность движения, а возникающие отклонения находятся в пределах, предусмотренных техническим заданием. При этом разработанная методика испытания РС зарекомендовала себя, как способная продемонстрировать работоспособность РС и выявить недостатки сборки.

- 2 Разработка программ и методик проведения испытаний экспериментальных образцов, проводимых на этапе.

Лабораторные образцы тонкоззорных камер (ТЗК) испытывались в соответствии с программой и методикой испытаний, разработанной на третьем этапе работ по плану-графику, соответствующий документ включен в состав отчётной документации по третьему этапу.

Экспериментальные образцы мюонных камер из ДТМ испытывались в соответствии с технологическим регламентом, разработанным на третьем этапе работ и, соответственно, включенном в состав отчётной документации по третьему этапу.

Методика и программа проверки работы электронных модулей ЦКСК, включённых в общую систему сбора информации адронного калориметра представлена отдельным документом в составе отчётной документации четвёртого этапа соглашения.

3 Изготовление экспериментальных образцов мюонных камер ДТМ с проведением испытаний на герметичность и высоковольтную стабильность.

В соответствии с п.4.3 плана-графика четвёртого этапа соглашения (1-е полугодие 2016г) изготовлены экспериментальные образцы ДТМ в соответствии с составленным на предыдущем этапе Технологическим регламентом «Производство мюонных камер из дрейфовых трубок малого (15 мм) диаметра». Количество изготовленных образцов – 2 шт. Каждая камера состоит из 48 дрейфовых трубок (ДТ) длиной 568 мм. ДТ склеены между собой в 3 слоя, по 16 шт. в каждом слое, расстояние между любыми соседними сигнальными проволоками – 15,5 мм (расположение показано на рисунке 37). Это расстояние задаётся точными поверхностями торцевых элементов ДТ.

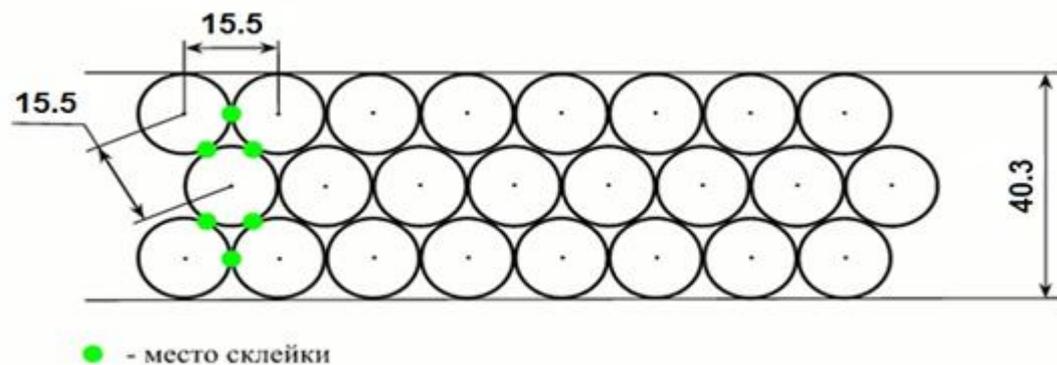


Рисунок 37 Схема расположения дрейфовых трубок в камере.

Фотография одного из экспериментальных образцов мюонной камеры, собранной из ДТ диаметром 15 мм, представлена на рисунке 38.



Рисунок 38 - Фотография экспериментальной мюонной камеры.

Испытания на герметичность проводятся в два этапа. На первом этапе выполняется контроль герметичности ДТ на стенде пневмовакуумных испытаний путем измерения потока гелия из трубки, заполненной смесью азота и гелия, в вакуум. Принципиальная схема стенда приведена на рисунке 39.



Рисунок 39 - Принципиальная схема стенда испытаний герметичности ДТМ.

ДТ помещается в вакуумную камеру. Один её конец герметично закрывается колпачком, а другой соединяется с форвакуумным насосом. Вакуумная камера откачивается до давления $\leq 10^{-5}$ мбар. Затем откачивается внутренняя полость ДТ и заполняется смесью ($N_2 90\% + He 10\%$) до давления 2 бар. Гелий проникает в вакуумную камеру из ДТ вследствие диффузии через лавсановую пленку и через возможные дефекты сварки и клейки. Поток гелия измеряется гелиевым течеискателем “Adixen ASM 310”. Течь по гелию пересчитывается в течь по рабочему газу ($Ar + 7\% CO_2$). Так, для ДТ длиной 2,5 м гелиевая течь не должна превышать $2 \cdot 10^{-7}$ л·бар/с, с тем, чтобы не превысить

установленный предел $2 \cdot 10^{-8}$ л·бар/с по рабочему газу. Распределение измеренных потоков гелия в изготовленных ДТ - на рисунке 40.

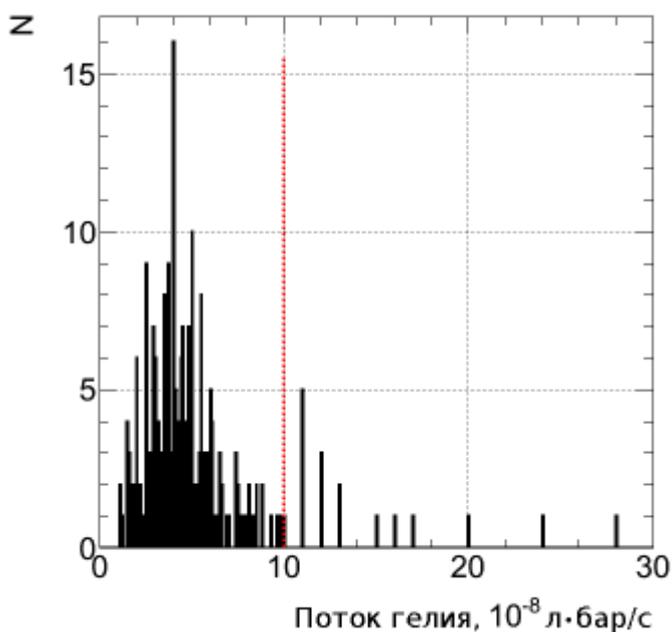


Рисунок 40 - Распределение измеренных потоков гелия в изготовленных ДТМ

На втором этапе проводится испытание камеры на герметичность в целом путем измерения падения давления. Для этого камера, в которой все трубки соединены последовательно с помощью газовых перемычек, заполняется азотом до давления 1,5 бар и отключается от газовой магистрали, после чего в течение нескольких дней измеряется остаточное давление газа. После нахождения и устранения неплотных соединений, камеры доведены до указанного выше уровня герметичности.

Перед проведением высоковольтных испытаний, обязательным этапом является измерение электрического сопротивления между торцевыми элементами дрейфовой трубки и отбраковка, если это сопротивление превышает 80 Ом. Итоговое распределение показано на рисунке 41.

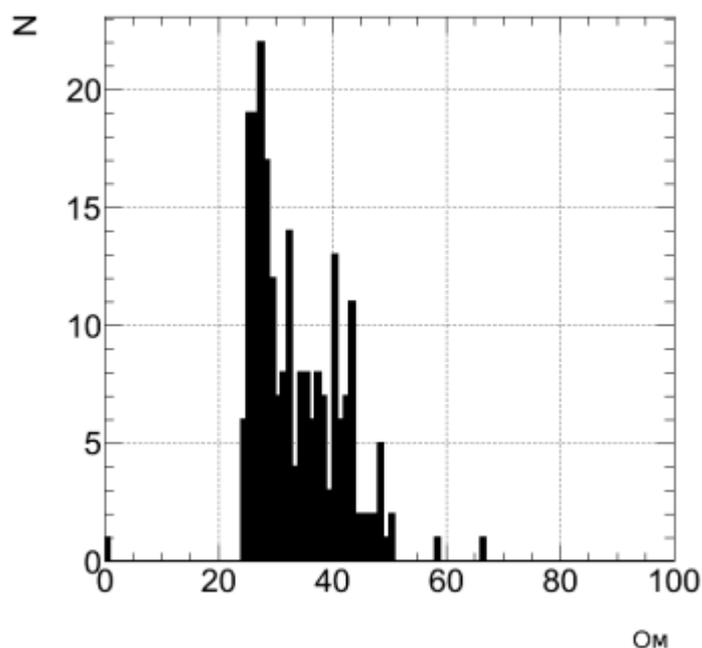


Рисунок 41 - Электрическое сопротивление между торцевыми элементами ДТМ

На рисунке 42 показана схема электрического подключения ДТМ.

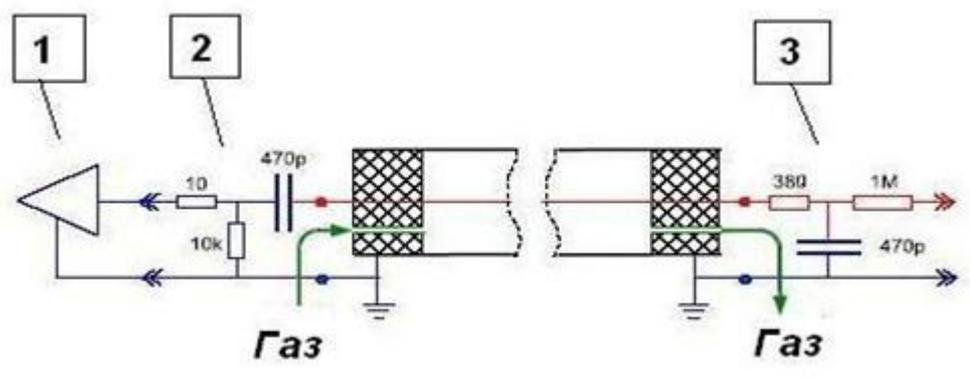


Рисунок 42 - Схема подключения ДТМ (1 – усилитель, 2 и 3 – платы с пассивными элементами)

Среднее значение сопротивления ДТМ длиной 568 мм составило 33,3 Ом.

Высоковольтные испытания заключаются в измерении зависимости скорости счета дрейфовых трубок от поданного высокого напряжения. Эту зависимость принято называть счетной характеристикой. Для экспериментальных образцов счетные характеристики измерены на рабочей газовой смеси (аргон + 7% углекислоты) при абсолютном давлении 1,5 атм. На рисунке 43 слева приведены индивидуальные счетные характеристики ДТМ, на том же рисунке справа - усредненная по всем дрейфовым трубкам счетная характеристика.

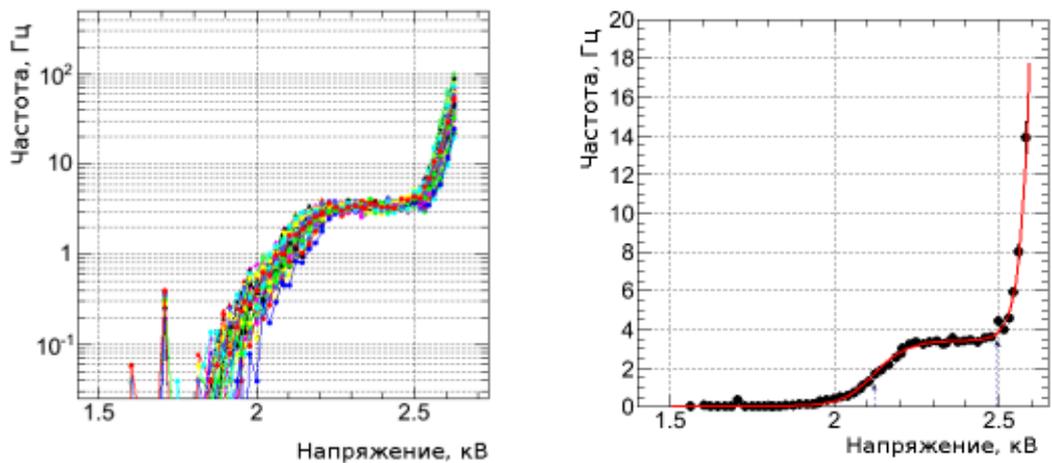


Рисунок 43 - Счетные характеристики ДТМ. Слева – индивидуальные кривые для всех дрейфовых трубок, справа – усредненная кривая.

Видно, что имеет место плато по напряжению 250 – 300 В, шумы отсутствуют, разброс по отдельным трубкам на плато – минимален. Таким образом, экспериментальные образцы мюонных камер ДТМ готовы для проведения дальнейших исследований их физических характеристик на космике или пучке заряженных частиц на заключительном (5-м) этапе, в соответствии с планом-графиком соглашения.

Акт изготовления ДТМ камер представлен в составе отчётной документации четвертого этапа соглашения.

Протокол испытаний лабораторных образцов ТЗК представлен в приложении 4 к отчёту.

- 4 Разработка рабочей документации на варианты прототипа миникалориметра и согласование её с другими участниками работ по миникалориметру и с Сотрудничеством АТЛАС.

Конечной целью работы является выбор варианта переднего миникалориметра установки АТЛАС, способного работать в области малых углов (область больших псевдобыстрот) при светимости суперЛНС (sLHC). Выполненный в 2014 году в рамках первого этапа настоящего соглашения аналитический обзор (см. отчёт за 2014 год) и дальнейшие исследования показали, что предпочтительным вариантом является жидкоаргоновый миникалориметр с цилиндрической системой электродов.

В соответствии с решением Сотрудничества по жидкоаргоновым калориметрам установки АТЛАС, нами была разработана эскизная документация на варианты прототипа модуля такого миникалориметра (см. отчёт за 2015 год), которая была рассмотрена и одобрена Сотрудничеством с поручением ИФВЭ разработать рабочую документацию.

Рабочая документация была разработана в первой половине 2016 года и представлена отдельным документом в комплекте отчётной документации четвертого этапа соглашения. Она состоит из трёх основных частей: собственно прототипов модулей миникалориметра с разной величиной зазора между цилиндрическими электродами, криостата для их испытаний в пучках частиц и системы криогенного обеспечения, задача которой состоит в заполнении криостата жидким аргоном, измерении его чистоты и охлаждении криостата жидким азотом при проведении испытаний.

Все прототипы модулей имеют одинаковую конструкцию (сборочный чертёж 0057 02-02-00 СБ) и отличаются только разной величиной зазора между цилиндрическими электродами. Их корпуса изготавливаются из меди марки М1 (чертёж 0057 02-02-01). В каждом корпусе имеется 32 отверстия, в которые вставляются медные втулки с внутренним диаметром d_1 5,15 мм (чертёж 0057 02-02-03) и электроды (чертёж 0057 02-02-02) с внешним диаметром d_2 4,812 или 4,912 мм. Зазор между втулкой и электродом $(d_1-d_2)/2$ определяет дрейфовый путь электронов и ионов в жидком аргоне.

Для испытаний прототипы модулей помещаются в криостаты (сборочный чертёж 0057 01-00-00 СБ), состоящий из двух обечаек, тройника (сборочный чертёж 0057 01-01-00 СБ), фланца, крышки, двух донышек и сетки. Все детали – из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Фланец и донышки привариваются к обечайкам. Пространство между ними откачивается через тройник форвакуумным насосом до давления 10^{-3} тор для уменьшения теплопритока к жидкому аргону, который находится во внутреннем сосуде криостата. При заполнении криостата жидким аргоном давление будет улучшаться до 10^{-5}

тор за счёт охлаждения активированного угля (поз. 15 на чертеже 0057 01-00-00 СБ). Оно контролируется при помощи манометрической лампы, устанавливаемой на тройнике (поз. 1 на чертеже 0057 01-00-00 СБ).

Криостат плотно закрывается крышкой (сборочный чертёж 0057 02-00-00 СБ). Для уплотнения используется тефлоновое кольцо. На крышке устанавливаются сигнальные и высоковольтные разъёмы типа 2РМС27Б24Ш1Е2 и патрубки для закачки и эвакуации газообразного аргона, подачи жидкого азота в змеевик-холодильник и установки предохранительных клапана и диафрагмы (поз. 2-7 на сборочном чертёже 0057 02-01-00 СБ). Разъёмы, клапан и диафрагма являются покупными изделиями и на чертежах не показаны. К крышке криостата также крепятся шпильки (поз. 4 на чертеже 0057 02-00-00 С) с опорной площадкой (поз. 3 и 4 на чертеже 0057 02-00-00 СБ), на которую устанавливается исследуемый модуль (поз. 2 на чертеже 0057 02-00-00 СБ). На шпильках и на модуле крепятся покупные датчики температуры, являющиеся одновременно показателями уровня жидкого аргона.

Система криогенного обеспечения (чертёж 0057 00-00-00 СК) предназначена для заполнения криостатов аргоном и поддержке его в жидком состоянии во время испытаний. Газообразный аргон из стандартных 40-литровых баллонов через систему вентилей и блок очистки, позволяющий очистить аргон до уровня электроотрицательных примесей не более $3,10^{-7}$ по кислороду, поступает в криостаты с модулями прототипа миникалориметра. Одновременно в змеевики-холодильники в криостатах из промежуточного сосуда Т1 подаётся жидкий азот, что приводит к ожижению аргона. Сосуд Т1 периодически пополняется жидким азотом из стандартного танка типа ТРЖК. После того, как жидкий аргон в рабочих криостатах достигнет определённого уровня выше модулей, включается система, автоматически поддерживающая давление паров аргона в интервале 1,2÷1,5 атм. путём пропускания жидкого азота через змеевики-холодильники. После завершения испытаний на пучке частиц аргон из криостатов выбрасывается в атмосферу.

В июне с.г., в ЦЕРН состоялось Сопревание по жидкоаргоновым калориметрам эксперимента АТЛАС, на котором представленная выше рабочая документация на варианты прототипа миникалориметра прошла согласование с другими участниками работ по миникалориметру, как из российских (ФИ РАН, ОИЯИ), так и зарубежных (США, Канада, Германия) институтов и лабораторий и затем была одобрена Сопреудничеством АТЛАС.

5 Облучение образцов сцинтиллятора для горячих зон в различных радиационных полях

Облучению подверглись 10 образцов, представленных ниже в таблице Таблица 1.

Таблица 1 - Список облучённых образцов.

Номер	Производитель	Марка	Состав	Цвет
1	ИФВЭ		Полистирол+РТР+РОРОР	Голубой
2	ИФВЭ		Полистирол+РТР+РОРОР	Голубой
3	Saint-Gobain	BC-408	Поливинилтолуол	Голубой
4	Saint-Gobain	BC-408	Поливинилтолуол	Голубой
7	ИФВЭ		Полистирол+РТР+ВВQ	Зеленый
8	ИФВЭ		Полистирол+РТР+ВВQ	Зеленый
9	ИФВЭ		Полистирол+РТР+ВВQ	Зеленый
10	ИФВЭ		Полистирол+РТР+ВВQ	Зеленый
11	Харьков	UPS-923А	Полистирол+РТР+РОРОР	Голубой
12	Харьков	UPS-923А	Полистирол+РТР+РОРОР	Голубой

Облучение проводилось на установке PANDA RS в ИФВЭ. Установка представляет собой мощный ($6,9 \cdot 10^{12}$ Бк на 31.07.2009) гамма источник Co^{60} , выдвижение которого на рабочую позицию осуществляется дистанционно. Средняя энергия испускаемых гамма квантов составляет 1,25 МэВ, период полураспада Co^{60} – 1925,5 дней.

Общий вид установки показан на рисунке 44.



Рисунок 44 - Облучательная установка PANDA RS.

Образцы устанавливались перед источником стопкой, расположенной к источнику длинной стороной. Время экспозиции составило 165,5 часа. Передняя и задняя части (относительно гамма источника) сборки образцов были снабжены дозиметрической пленкой типа Gafchromic EBT3, позволившей измерить мощность получаемой дозы.

На рисунке 45 для примера приведена цветная диаграмма зависимости полученной дозы для передней пленки от места облучения.

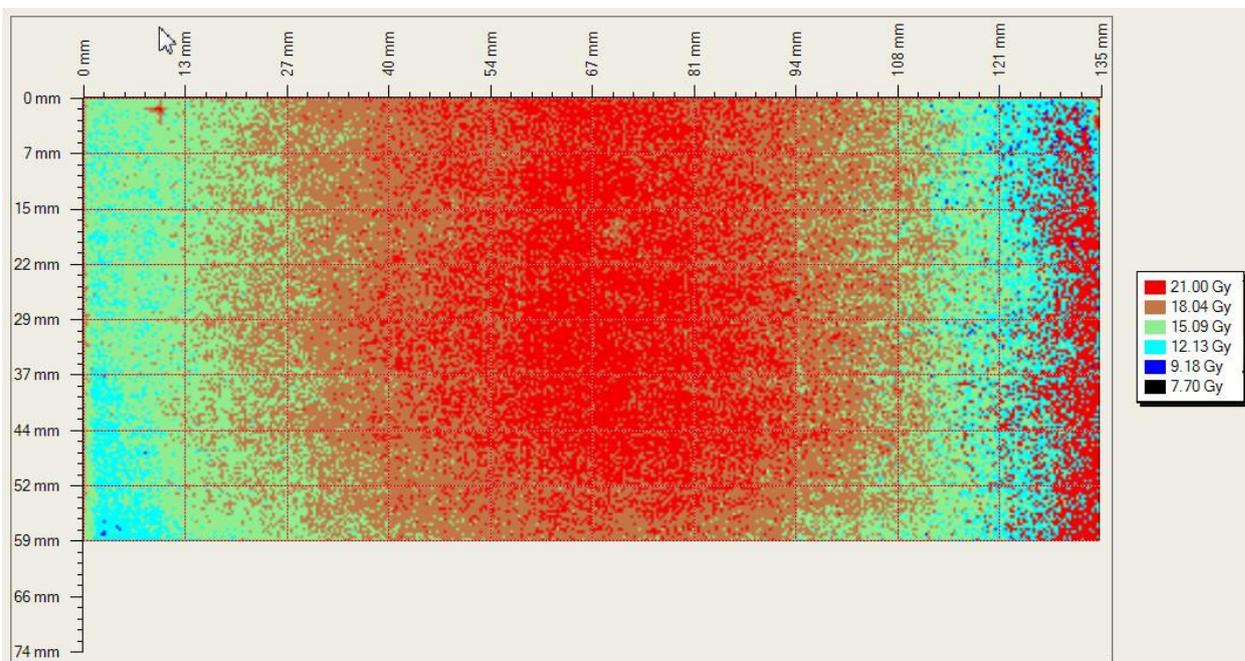


Рисунок 45 - Зависимость полученной дозы в Гр от места облучения (координаты X и Y в мм) для дозиметрической пленки, установленной на передней плоскости сборки образцов сцинтиллятора.

Красные области соответствуют зонам с самой высокой полученной дозой. Экспозиция пленок проводилась в течение известного фиксированного времени (1 час 5 минут), поэтому легко вычислить мощность поглощенной дозы для каждого конкретного места на передней и задней плоскостях сборки образцов и затем экстраполировать полученные данные на ее внутренний объем с помощью специализированной программы расчета.

На рисунках 46 и 47 представлены данные за весь сеанс облучения по поглощенной дозе для передней и задней плоскостей для каждого из образцов.

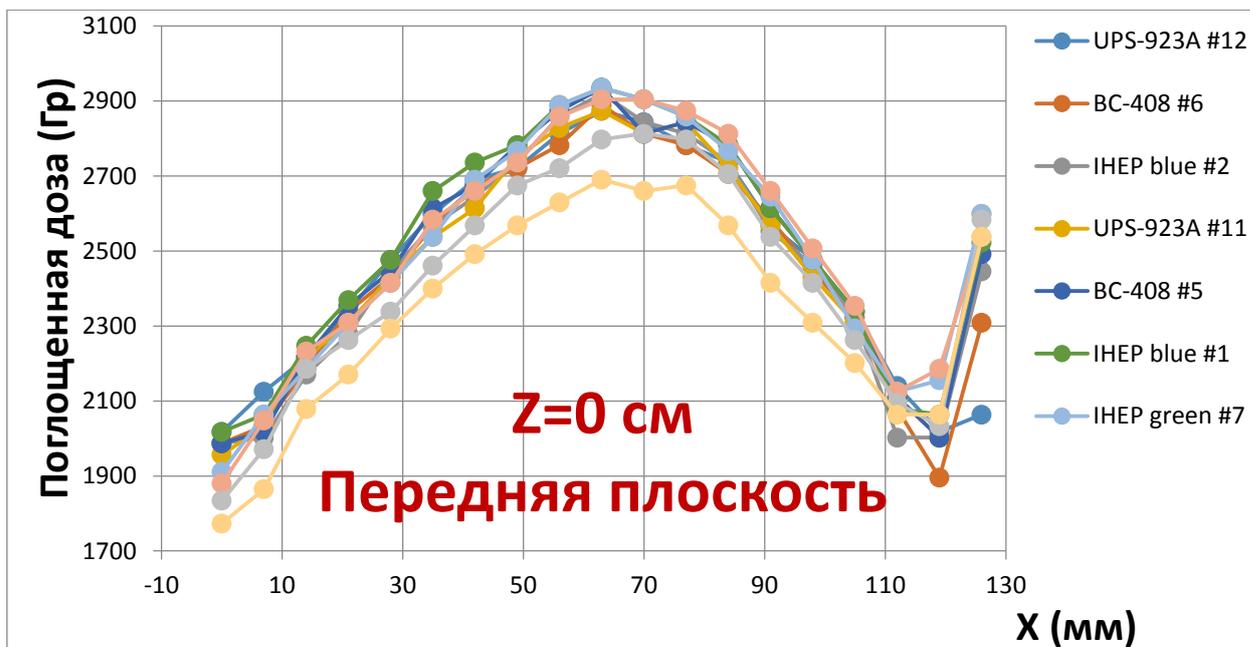


Рисунок 46 - Зависимость измеренной (поглощенной за все время экспозиции) дозы от горизонтальной координаты на передней плоскости сборки для всех образцов.

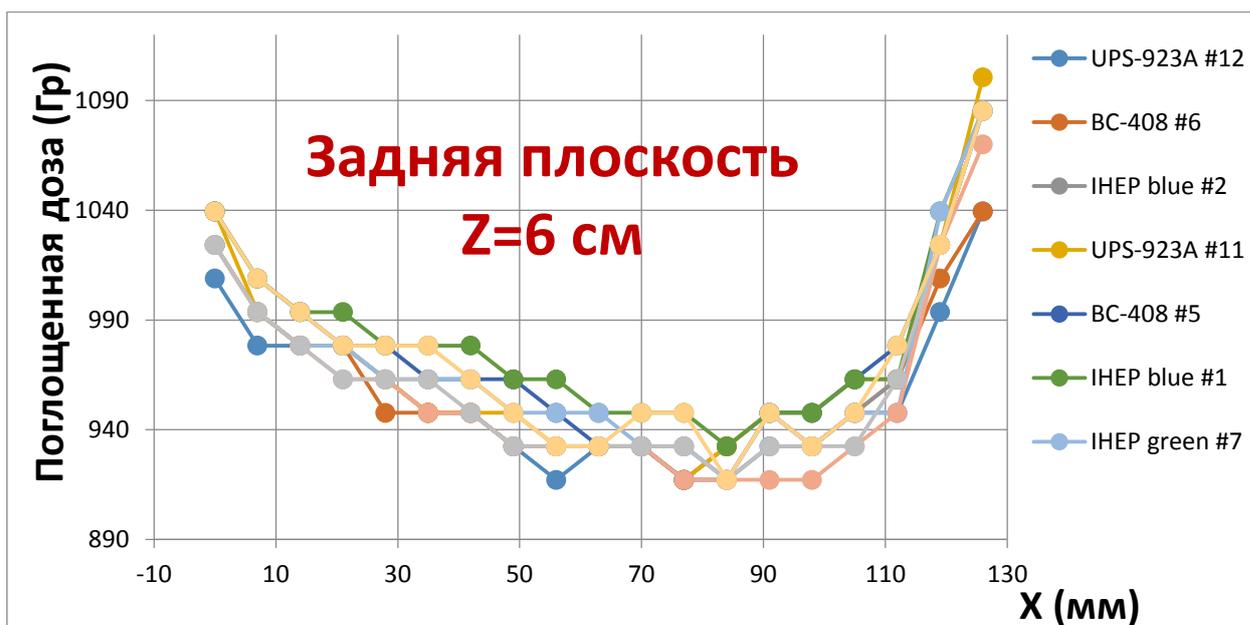


Рисунок 47 - Зависимость измеренной (поглощенной за все время экспозиции) дозы от горизонтальной координаты на задней плоскости сборки для всех образцов.

В среднем спереди поглощенная доза составляет 2500 Гр, сзади – 950 Гр.

Экстраполяция измеренных данных по поглощенной дозе на весь объем облученного сцинтиллятора проводилась с помощью разработанной в ИФВЭ программы FAN15 для расчета переноса низкоэнергетических фотонов и нейтронов в произвольных средах (препринт ИФВЭ 2016-4). Для примера, в таблице 2 приведены данные по поглощенной дозе для образца #11 UPS-923A в зависимости от координат.

Таблица 2 - Расчетная поглощенная за все время экспозиции доза для образца UPS-923А #11 для разных координат X (горизонталь) и Z (глубина по пучку).

Поглощенная доза (Гр) в зависимости от координат в образце #11 UPS-923А							
X (mm)	Z=0 см	Z=1 см	Z=2 см	Z=3 см	Z=4 см	Z=5 см	Z=6 см
8,5	2022,4	1715,1	1454,9	1237,9	1055,4	896,7	764,3
15,5	2161,5	1819,1	1534,7	1295,7	1104,6	936,7	792,3
22,5	2309,7	1919,9	1614,2	1357,7	1145,2	976,8	823,8
29,5	2429,0	2019,3	1683,0	1410,6	1190,2	1003,7	848,4
36,5	2549,7	2104,9	1753,3	1455,1	1224,7	1035,8	872,8
43,5	2665,9	2184,4	1803,8	1505,2	1255,3	1056,9	886,4
50,5	2777,5	2251,7	1852,7	1536,3	1287,1	1081,8	906,2
57,5	2834,1	2306,7	1895,5	1568,4	1305,3	1100,6	920,8
64,5	2902,8	2343,4	1924,5	1585,2	1320,9	1106,0	925,7
71,5	2935,0	2366,3	1933,7	1595,9	1326,2	1108,4	924,8
78,5	2935,0	2366,3	1933,7	1595,9	1326,2	1108,4	925,7
85,5	2902,8	2343,4	1924,5	1585,2	1320,9	1106,0	924,8
92,5	2834,1	2306,7	1895,5	1568,4	1305,3	1100,6	920,8
99,5	2777,5	2251,7	1852,7	1536,3	1287,1	1081,8	906,2
106,5	2665,9	2184,4	1803,8	1505,2	1255,3	1056,9	886,4
113,5	2549,7	2104,9	1753,3	1455,1	1224,7	1035,8	872,8
120,5	2429,0	2019,3	1683,0	1410,6	1190,2	1003,7	848,4
127,5	2309,7	1919,9	1614,2	1357,7	1145,2	976,8	823,8
134,5	2161,5	1819,1	1534,7	1295,7	1104,6	936,7	792,3
141,5	2022,4	1715,1	1454,9	1237,9	1055,4	896,7	764,3

Здесь Z=0 и Z=6 соответствуют передней и задней плоскостям сборки. Плоскость с Z=1 пересекает образец параллельно передней плоскости на расстоянии 1 см от нее и т.д.

Координата X определяет центр площадки длиной 7 мм и шириной 6 мм (равной толщине образца). Значение поглощенной дозы, указанное в таблице 2, усреднено по этой площадке. На рисунке 48 представлено графическое отображение данных из этой таблицы.

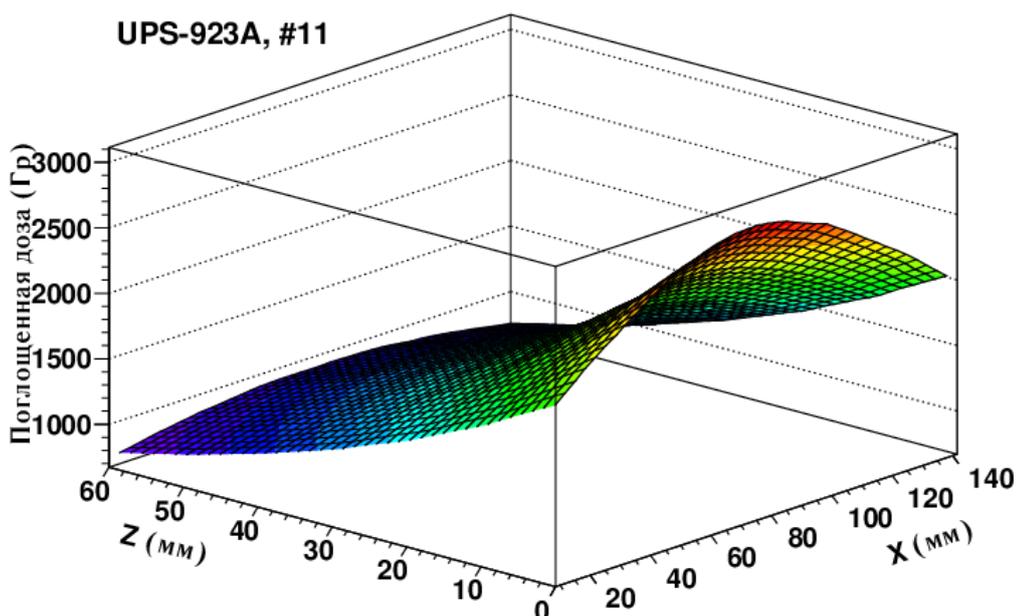


Рисунок 48 - Графическое представление расчетной поглощенной за все время экспозиции дозы для образца UPS-923A #11 для разных координат X (горизонталь) и Z (глубина по пучку).

Расчетная поглощенная доза в центральной области (при Z=3) для всех образцов приведена в таблице 3.

Таблица 3 - Расчетная поглощенная за все время экспозиции доза в Гр для всех образцов на средней плоскости (Z=3 см) в зависимости от горизонтальной координаты X.

z=3 см X (мм)	UPS 923A #12	BC 408 #6	IHEP Blue #2	UPS 923A #11	BC 408 #5	IHEP Blue #1	IHEP green #7	IHEP green #8	IHEP green #9	IHEP green #10
8,5	1167,6	1204,7	1223,2	1237,9	1246,4	1246,4	1237,9	1223,2	1204,7	1167,6
15,5	1215,6	1261,0	1283,0	1295,7	1306,1	1306,1	1295,7	1283,0	1261,0	1215,6
22,5	1277,0	1316,3	1346,3	1357,7	1361,8	1361,8	1357,7	1346,3	1316,3	1277,0
29,5	1321,5	1366,9	1395,5	1410,6	1421,8	1421,8	1410,6	1395,5	1366,9	1321,5
36,5	1373,5	1419,9	1444,2	1455,1	1467,2	1467,2	1455,1	1444,2	1419,9	1373,5
43,5	1405,3	1457,4	1483,2	1505,2	1514,4	1514,4	1505,2	1483,2	1457,4	1405,3
50,5	1443,0	1490,6	1523,3	1536,3	1551,5	1551,5	1536,3	1523,3	1490,6	1443,0
57,5	1473,4	1518,1	1545,4	1568,4	1568,4	1568,4	1568,4	1545,4	1518,1	1473,4
64,5	1490,3	1539,3	1562,2	1585,2	1595,9	1595,9	1585,2	1562,2	1539,3	1490,3
71,5	1495,1	1548,5	1574,5	1595,9	1603,5	1603,5	1595,9	1574,5	1548,5	1495,1
78,5	1495,1	1548,5	1574,5	1595,9	1603,5	1603,5	1595,9	1574,5	1548,5	1495,1
85,5	1490,3	1539,3	1562,2	1585,2	1595,9	1595,9	1585,2	1562,2	1539,3	1490,3
92,5	1473,4	1518,1	1545,4	1568,4	1568,4	1568,4	1568,4	1545,4	1518,1	1473,4
99,5	1443,0	1490,6	1523,3	1536,3	1551,5	1551,5	1536,3	1523,3	1490,6	1443,0
106,5	1405,3	1457,4	1483,2	1505,2	1514,4	1514,4	1505,2	1483,2	1457,4	1405,3
113,5	1373,5	1419,9	1444,2	1455,1	1467,2	1467,2	1455,1	1444,2	1419,9	1373,5
120,5	1321,5	1366,9	1395,5	1410,6	1421,8	1421,8	1410,6	1395,5	1366,9	1321,5
127,5	1277,0	1316,3	1346,3	1357,7	1361,8	1361,8	1357,7	1346,3	1316,3	1277,0

134,5	1215,6	1261,0	1283,0	1295,7	1306,1	1306,1	1295,7	1283,0	1261,0	1215,6
141,5	1167,6	1204,7	1223,2	1237,9	1246,4	1246,4	1237,9	1223,2	1204,7	1167,6

Данные по дозам будут использованы в дальнейшем при сравнении оптических свойств облученных сцинтилляторов. На рисунке 49 показана зависимость поглощенной дозы от места облучения для каждого образца.

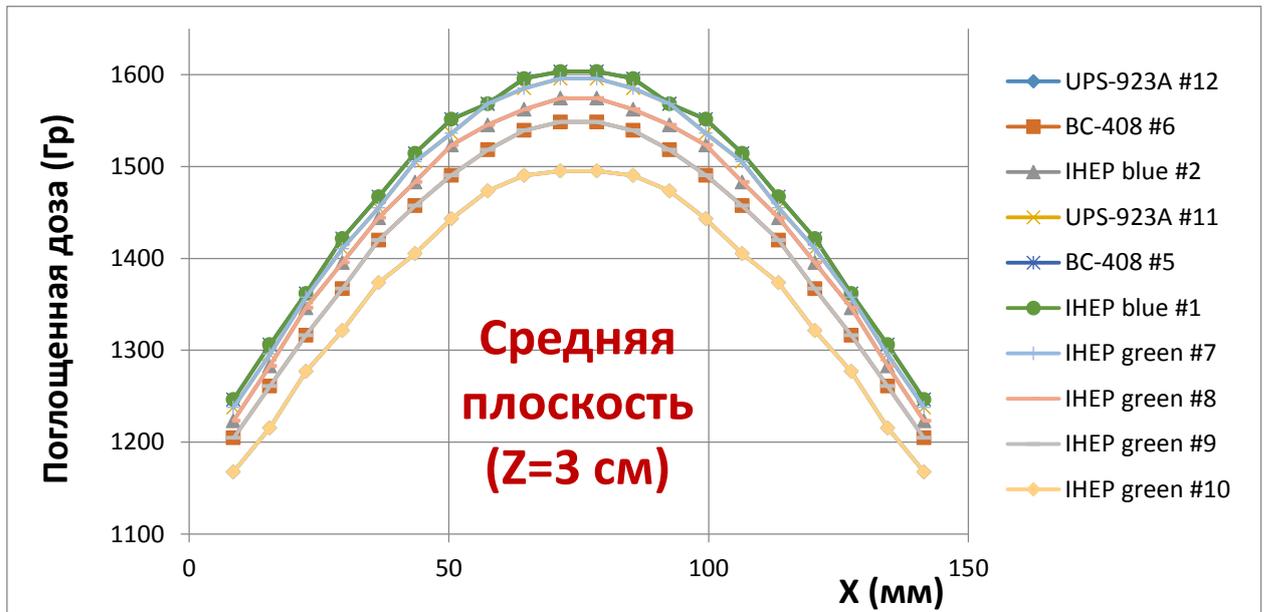


Рисунок 49 - Зависимость расчетной поглощенной за все время облучения дозы для средней плоскости от горизонтальной координаты.

Таким образом, максимальная поглощенная доза в центральной области для всех образцов варьируется в пределах от 1500 до 1600 Гр. Относительная разница между наибольшим и наименьшим значениями составляет 6,3%, что приемлемо для последующего количественного сравнения оптических характеристик образцов.

- 6 Проверка работы электронных модулей ЦКСК, включённых в общую систему сбора информации адронного калориметра.

Контрольные модули цезиевой калибровочной системы (ЦКСК) адронного калориметра установки АТЛАС (6U-Garage, 6U-ADC и 6U-SIN, далее “Cs 6U модули”), регистрирующие и обрабатывающие информацию с устройств для хранения радиоактивных источников (“гаражи”), датчиков давления и сенсоров перемещения источников, располагаются по внешнему периметру калориметра и в настоящее время связаны с центром управления локальной сетью (CAN-BUS). В связи с намечаемым радикальным изменением техники и общей структуры приёма данных с калориметра эти модули будут подключены к периферийной электронике (дроверы) и связаны напрямую с общей системой сбора данных, что расширит возможности ЦКСК и значительно увеличит её надёжность.

Обмен информации электроники ЦКСК с модифицированными дроверами (прототип “демонстратор”), решено осуществить через порты специализированной платы связи, называемой “Daughter Board” (“Дочерняя Плата”), содержащей два узла приёма и передачи данных. Через один из имеющихся двух 10-ти контактных разъёмов возможно подключение Cs 6U модулей для приёма и передачи информации по протоколу SPI в общую систему сбора данных.

Осуществление этого соединения требует изменения, как наших модулей, так и внесения некоторых изменений в схематику “Дочерней Платы”. Требуется решить вопросы гальванической развязки, питания, согласования уровней и прочее. На данном этапе решается задача выработки принципов осуществления передачи, отработки протокола обмена данными, изменение формата посылок для обеспечения новой адресации наших модулей и согласование этих посылок с выделяемыми ресурсами.

Испытание соединения Cs 6U модулей с прототипом “демонстратора” в условиях реальной работы запланировано и будет осуществлено на тестовых пучках SPS летом этого года.

Функциональная схема обмена данными между “Дочерней Платой” и модулем Cs 6U показана на рисунке 50.

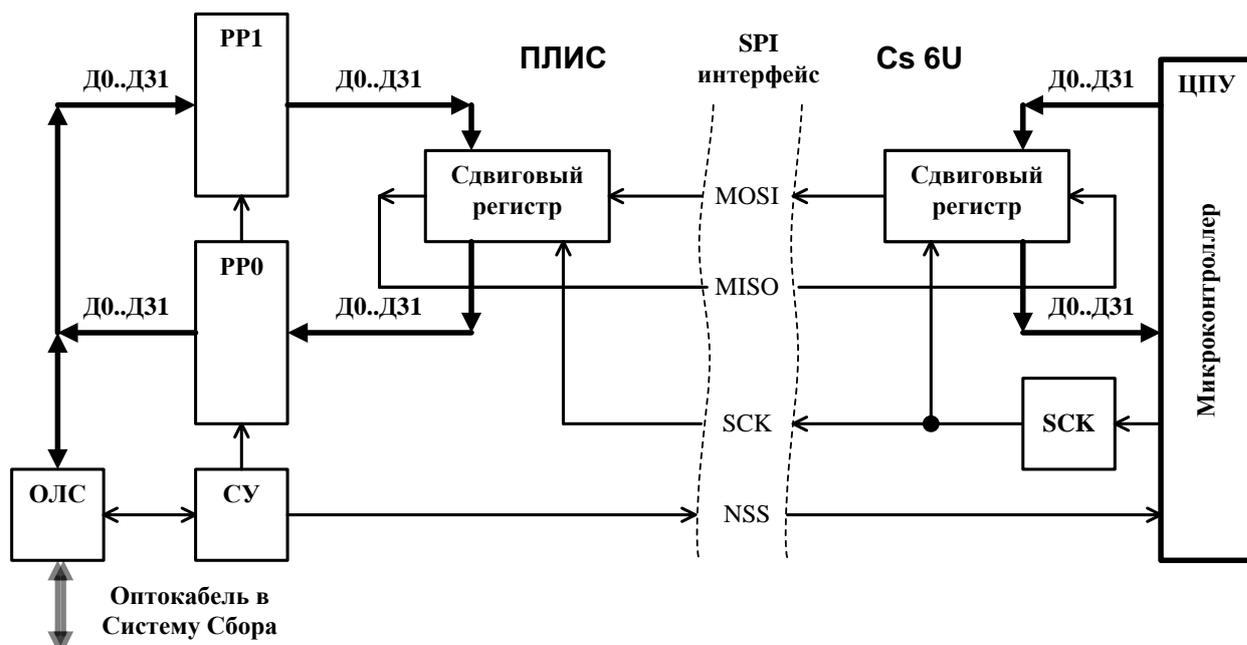


Рисунок 50 - Схема обмена данными между “Дочерней Платой” и модулем Cs 6U.

Для первичной отладки схемы соединения и обслуживающих программ проведено макетирование процесса приёма и передачи данных между Cs 6U модулем и “Дочерней Платой”, используя универсальную тестовую плату ATLYS (производства фирмы DIGILENT) с микросхемой ПЛИС фирмы XILINX, аналогичной той, которая используется в “Дочерней Плате”.

В ПЛИС платы ATLYS была создана схема, обеспечивающая работу SPI интерфейса со стороны “Дочерней Платы”. На одном из Cs 6U модулей установлен разъём IDC10, подсоединённый к интерфейсу SPI микроконтроллера STM32F205VG через разъём JB плоским кабелем.

В процессе отладки была успешно проведена передача и приём данных между платами 6U-Garage и тестовой ATLYS. При передаче данных из микроконтроллера в ПЛИС, ЦПУ микроконтроллера записывает передаваемые данные в Сдвиговой Регистр интерфейса SPI и выдаёт 32 импульса на линию SCK вместе с данными на линии MOSI, как показано на рисунке 51.

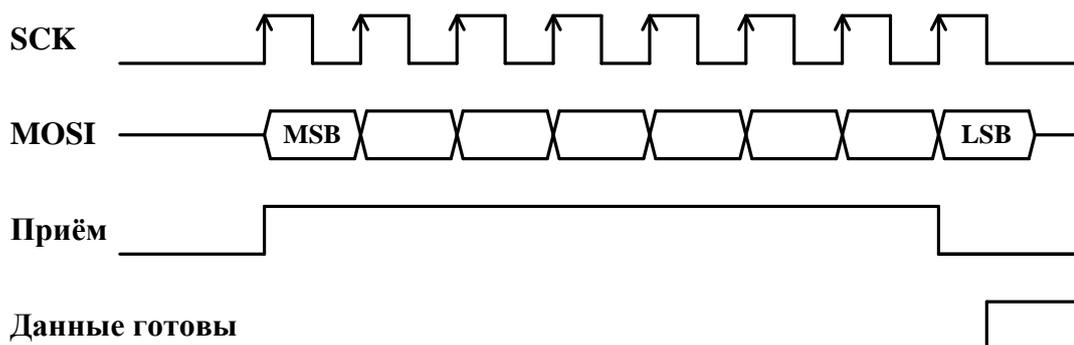


Рисунок 51 - Временная диаграмма записи данных в ПЛИС.

По первому перепаду SCK в ПЛИС возникает сигнал ПРИЁМ, а по 32-му положительному перепаду он снимается. Сдвиг в сдвиговом регистре производится по отрицательному перепаду SCK. Сигнал ПРИЁМ запрещает выдачу сигнала NSS, если в момент приёма в ПЛИС поступили данные для передачи в микроконтроллер. По 32-му отрицательному перепаду сигнала SCK данные из сдвигового регистра записываются в 32-х разрядный регистр PPO, откуда они включаются в общий поток данных системы сбора информации адронного калориметра. Для передачи данных в микроконтроллер, ПЛИС выставляет сигнал NSS (рисунок 52), в ответ микроконтроллер выдаёт на линию SCK цуг из 32-х импульсов.

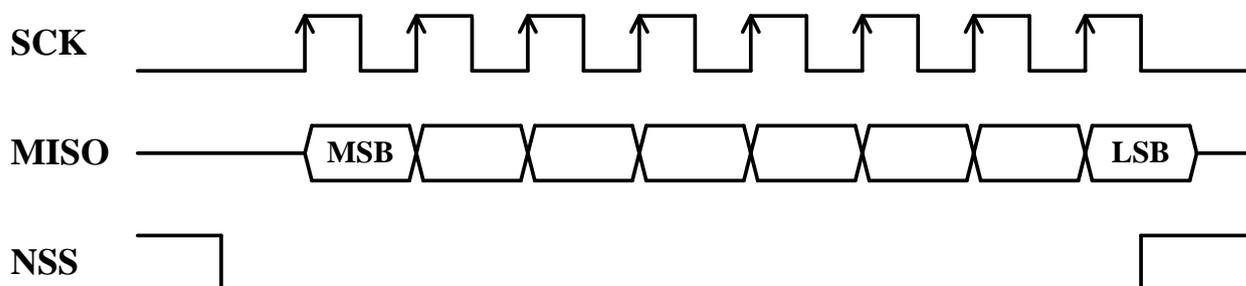


Рисунок 52 - Временная диаграмма чтения данных из ПЛИС.

ПЛИС последовательно передает данные из своего сдвигового регистра на линию MISO, откуда они принимаются интерфейсом SPI микроконтроллера.

После завершения макетных работ с платой и готовности прототипа демонстратора, произведено подключение к “Дочерней плате” (показано на рисунке 53) через 10-ти контактный разъём, выделенный для цезиевой системы на стенде адронного калориметра в зд.175 ЦЕРНа

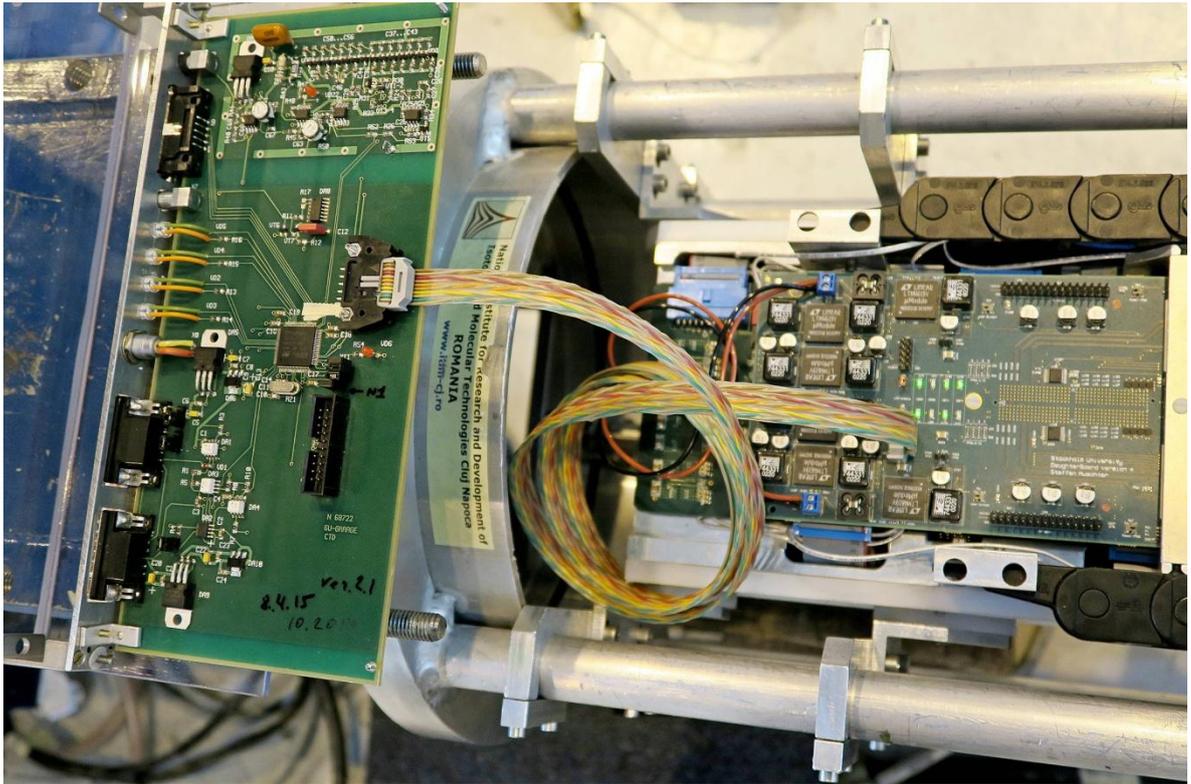


Рисунок 53 - Подключение платы Cs 6U-Garage к “Дочерней плате” прототипа.

Разъём включает в себя вывод земли, питания +2,5 В и шесть контактов, подключенных к главной ПЛИС платы. В ПЛИС была реализована та же схема приёма – передачи, что была промоделирована на тестовой плате.

На рисунке 54 показана условная схема реализации подключения “Дочерней платы” и Cs 6U модулей с использованием микросхемы гальванической развязки ёмкостного типа.

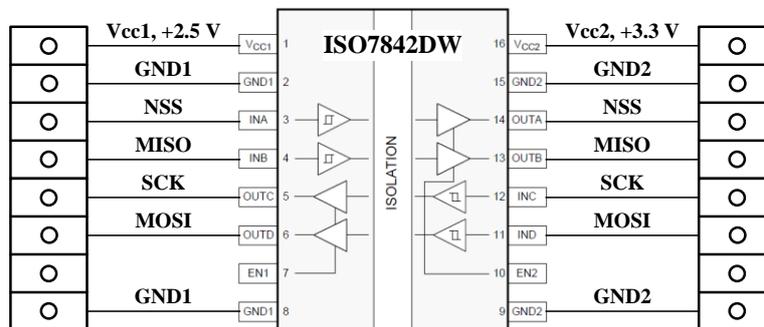


Рисунок 54 - Подключение платы Cs 6U-Garage к “Дочерней плате” с использованием микросхемы гальванической развязки ISO7842DW.

Микросхема ISO7842DW имеет широкий диапазон по питающему напряжению от

2,25 В до 5,5 В, что позволило передать сигналы от микросхемы ПЛИС, у которой максимально допустимая амплитуда входных сигналов 2,5 В, к микроконтроллеру, имеющему амплитуду выходных сигналов до 3,3 В. При этом скорость передачи данных через микросхему ISO7842DW может достигать 100 Мб/с, что гораздо выше необходимой для работы Cs 6U модулей частоты синхросигнала в 10 МГц.

Ведётся дальнейшая разработка программного обеспечения по интегрированию разработанной схемы и протоколов передачи данных калибровки в общую систему сбора информации адронного калориметра в рамках согласованных ресурсов общей памяти и структуры синхронизации вычислительных процессов.

В целом выполненная проверка показала удовлетворительную работу модулей электроники системы калибровки калориметра.

- 7 Разработка модулей новой электроники ЖАК. Разработка предварительных формирователей электронных сигналов ЖАК и схем подключения цифрового управляющего триггерного модуля к каналу считывания торцевого калориметра

На основе исследований, проведенных на третьем этапе проекта, проведена адаптация новой электроники к считыванию сигналов с жидкоаргонового адронного калориметра (НЕС). Работы велись по двум направлениям:

- оптимизация передаточных характеристик предварительных формирователей ЖАК, макетирование формирователя на дискретных элементах и разработка топологии печатной платы прототипа формирователя;
- разработка схем подключения цифрового триггерного модуля (LTDB) к каналам считывания ЖАК, изготовление рабочего варианта базовой платы ЖАК и ее тестирование.

Результаты проведенных работ приводятся ниже. Последующий контроль качества разработанных формирователей и базовых плат, а также проверка их электрических характеристик будет проведена на специализированных стендах в TRIUMF (Канада). Соответственно, подготовленные нами комплекты документации и файлы размещены на сайте TRIUMF и представлены в комплекте отчетной документации четвертого этапа..

Разработка технологии предварительных формирователей.

В настоящее время в сотрудничестве АТЛАС-ЖАК принято, что все элементы аналогового тракта ЖАК (предусилитель, предварительный формирователь, фильтр и аналого-цифровой преобразователь) будут интегрированы в единую интегральную микросхему. Предварительный формирователь будет функциональным блоком этой микросхемы. Требование интеграции привело к необходимости изменить некоторые характеристики предварительного формирователя и включить в схему дополнительный каскад для возможности подключения внешнего управления.

На рисунке 55 приведена схема одного канала формирователя без управления.

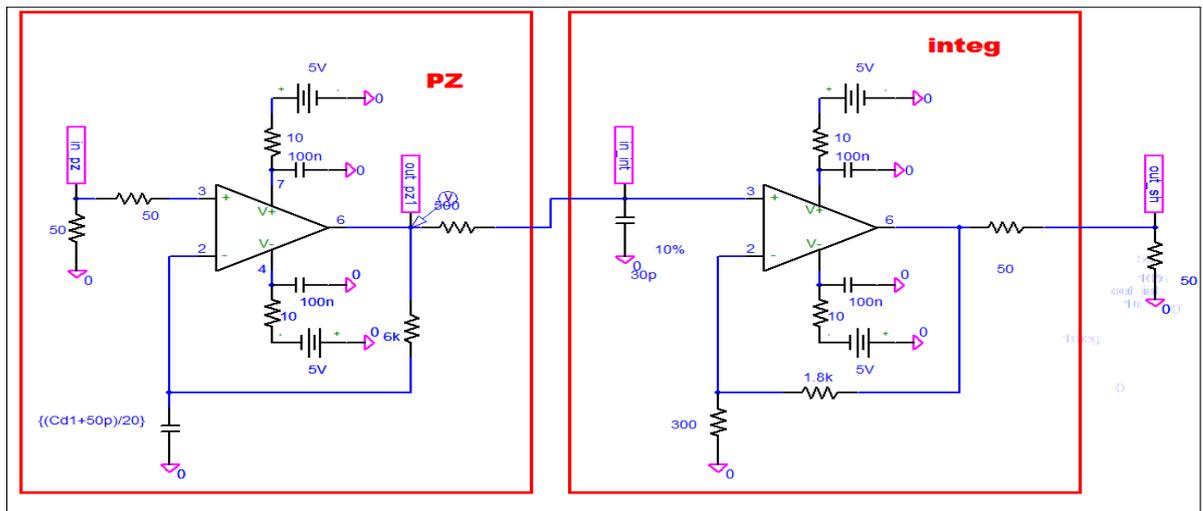


Рисунок 55 - Принципиальная схема одного канала формирователя без внешнего управления

Макет этого формирователя был изготовлен и протестирован на третьем этапе соглашения, Подготовлена вся техническая документация необходимая для производства полного количества тестовых печатных плат и распайки компонент.

Следующая задача состояла в том, чтобы разработанную схему приблизить к финальной версии. Для этого было решено включить каскад внешнего управления для возможности управлять временной константой и изучить электрические параметры полученного формирователя. Схема формирователя с внешним управлением приведена на рисунке 56.

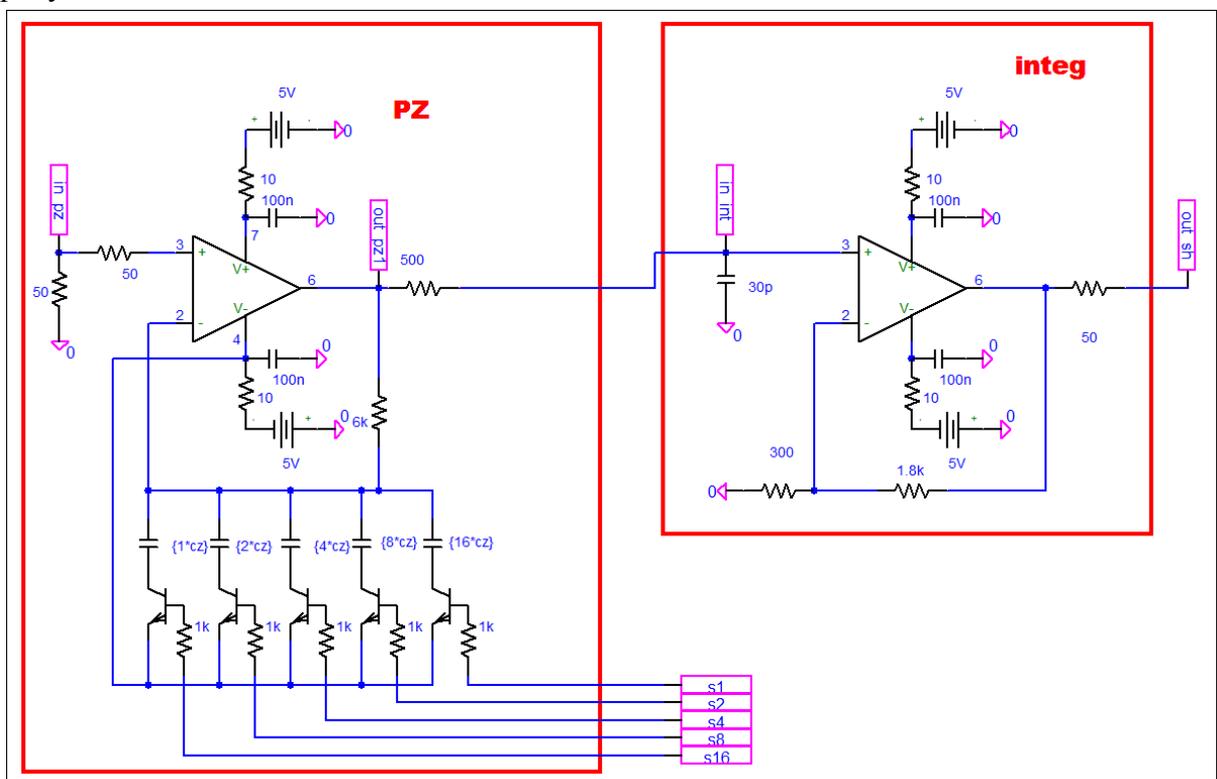


Рисунок 56 - Принципиальная схема одного канала формирователя с внешним управлением.

Формирователь с внешним управлением направлен в производство и его изготовление ожидается в начале июня 2016 года. После получения опытного образца будут изучены основные характеристики с помощью стенда, созданного на третьем этапе соглашения. К этим характеристикам можно отнести следующие:

- стабильность работы;
- точность выбора временной константы;
- диапазон рабочих сигналов;
- линейность в данном диапазоне;
- отклонение отклика от идеальной формы.

Разработка структурной и принципиальной схем подключения цифрового триггерного модуля к каналу считывания торцевого адронного калориметра

Подключение каналов считывания ЖАК к модулю LTDB осуществляется с помощью базовой платы в корзине детекторной электроники. Разводка базовой платы ЖАК произведена на третьем этапе проекта и была представлена в отчете по этому этапу. После проведения стандартной инспекции печатных плат и проверки качества электрических соединений, было принято решение произвести полную распайку компонент. Две рабочие платы были изготовлены совместно с коллегами из TRIUMF (Ванкувер, Канада).

На рисунке 57 приведена фотография базовой платы.

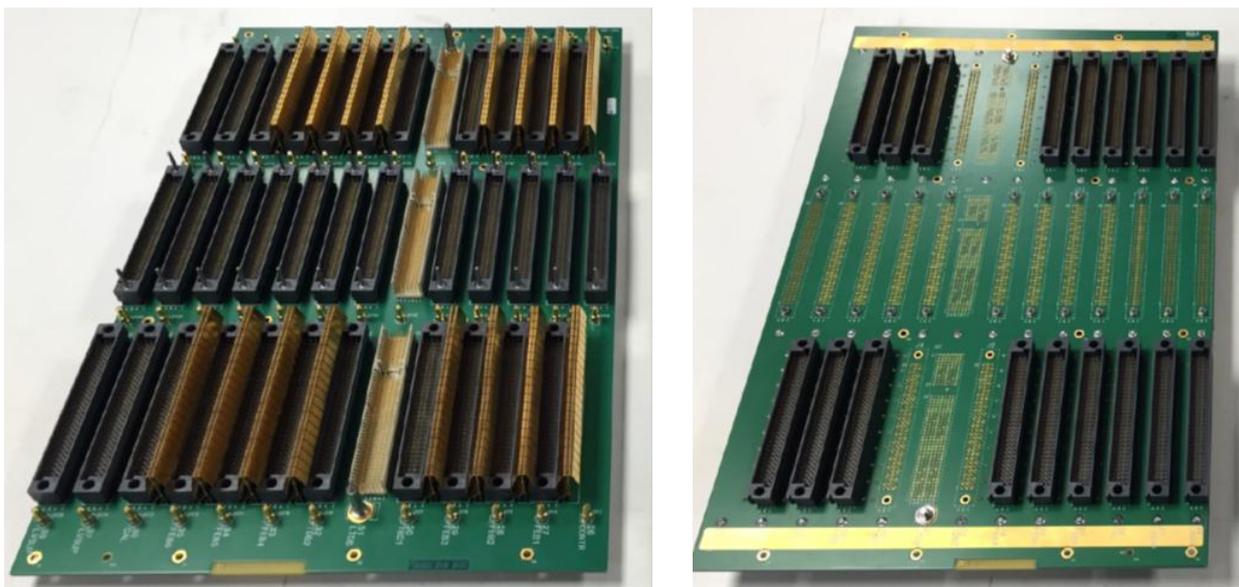


Рисунок 57 - Базовая плата для подключения цифрового триггерного модуля LTDB.

Подготовлена вся техническая документация, необходимая для производства

полного количества печатных плат и распайки компонент.

Предварительные измерения электрических характеристик базовых плат проведены по методике, использованной на втором этапе проекта при тестировании прототипа базовой платы. Было показано, что измерения импедансов передаточных линий, уровень искажения сигналов и величина наводки на соседние каналы находятся на приемлемом уровне и практически не отличаются от аналогичных величин, измеренных на прототипе. Сравнение с расчетами, представленными в отчете за третий этап проекта, показало, что реальные характеристики отличаются от проектных не более чем на 5%, что подтверждает качество конструкторской разработки. Результаты работ были доложены сотрудничеству ЖАК на техническом совещании в апреле 2016 г.

Необходимым условием производства электронных систем для использования в установке АТЛАС является тщательный контроль качества поставляемых изделий. В настоящее время сценарий контроля качества базовых плат жидкоаргонового калориметра находится в стадии разработки. Тестирование базовых плат ЖАК будет проведено по той же методике, что и тестирование базовых плат других калориметров, после официального утверждения в сотрудничестве.

8 Работы по модернизации специального программного обеспечения

8.1 Разработка программного обеспечения для прецизионного «офф-лайн» детектирования спорадических шумовых всплесков в каналах ЖАК

Спорадические шумовые всплески (англ. Noise Burst), также их иногда называют когерентными шумами, представляют собой одновременное появление большого числа каналов в калориметре, энерговыделение в которых превышает 3σ (стандартных отклонения) электронного шума. В основном, когерентный шум встречается в торцевой части калориметра: ЕМЕС/НЕС/FCAL, при этом не наблюдается корреляции для сторон А и С.

Всплески когерентного шума происходят во время столкновений пучков. Продолжительность всплесков достигает 10 мкс. Наблюдается сильная зависимость частоты шумовых всплесков от светимости (см. рисунок 58).

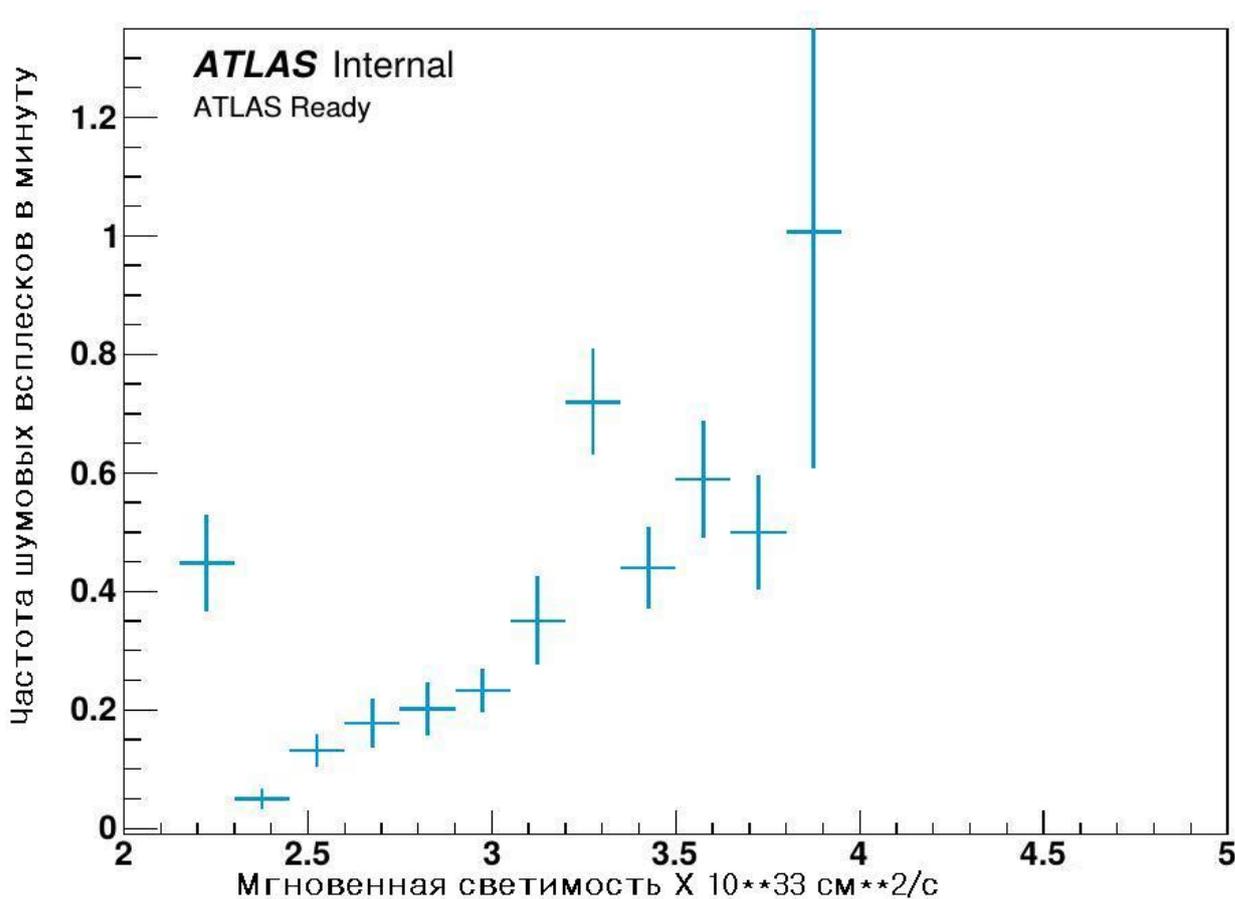


Рисунок 58 - Зависимость частоты шумовых всплесков от светимости.

Всплески шума наблюдаются также при подъёме или при снятии высоковольтного напряжения. Источник данных шумов все еще точно не известен. Хотя недавние данные

показали зависимость появления шумовых всплесков от состояния (включено или выключено) высоковольтного напряжения в системе измерения чистоты аргона в калориметрах/

В настоящее время для детектирования шумовых всплесков в событиях используется следующая процедура:

- Для нахождения ядра всплеска шума применяется стандартное условие (Standard flag) – наличие больше 5 FEB, в каждой из которых имеется больше 30 каналов с $Q > 4000$, где Q фактор качества – величина, используемая для измерения согласия между измеренной формой сигнала и ожидаемой.
- Для нахождения «хвостов» шумовых всплесков используется условие насыщения (Saturated flag) – наличие более 20 каналов с энергосодержанием, превышающим 1 ГэВ, и $Q = 65535$ (наибольшее возможное значение «фактора качества», указывает на плохое согласие измеренной формы импульса с ожидаемой).
- Далее применяется алгоритм временного вето. Вокруг каждого события, удовлетворившего одному из двух условий (см. выше) устанавливается временное окно 200 мс. В случае шумового всплеска временные окна перекрываются. Если во временном окне, находится, как минимум, 2 события и одно из них удовлетворяет стандартному условию, то все события, попавшие в такое окно, полностью исключаются из обработки, тогда как одиночные события остаются.

Описанный подход успешно применялся для Run-1 и Run-2. В период Run-2 произошло увеличение частоты столкновений сгустков протонов. Время между столкновениями уменьшилось с 50 до 25 нс. Для того, чтобы уменьшить время, требующееся на оцифровку и принятие решения триггером, был осуществлён переход от записи данных LAg калориметра с 5 пробами (оцифрованными с шагом 25 нс значениями амплитуды сигнала) к записи данных с 4 пробами. Данный переход мог повлиять на применимость Q -фактора, который является одним из наиболее важных параметров при детектировании шумовых событий.

До осуществления перехода к записи событий с 4 пробами была проведена проверка возможности использования стандартного условия для нахождения ядра всплеска шума при работе с 4 пробами. Специальный вариант программы реконструкции для данных с 4 пробами был использован для имевшегося сеанса 205071 с 5 пробами для триггерных потоков JetTauEtMiss и CosmicCalo. Проведено сравнение числа событий, которые по стандартному условию являются ядром всплеска шума, при использовании двух вариантов реконструкции с 4 и 5 пробами. Результат сравнения приведен в таблице 4.

Таблица 4 - Сравнение числа событий, детектированных как ядро всплеска шума, при реконструкции с 5 пробами (оцифрованными с шагом 25 нс значениями амплитуды сигнала) и с 4 пробами.

	Триггер JetTauEtMiss	Триггер CosmicCalo
Общее число событий	16473	596
Число событий, детектированных как ядро всплеска шума при реконструкции с 5 пробами	2734	322
Число событий, детектированных как ядро всплеска шума, при реконструкции с 4 пробами	2847	349
Число событий, детектированных как ядро всплеска шума, при реконструкции и с 5 пробами, и с 4 пробами	2730 (99.85%)	322 (100%)
Число событий, детектированных как ядро всплеска шума, только при реконструкции с 5 пробами	4 (0.15%)	0 (0 %)
Число событий, детектированных как ядро всплеска шума, только при реконструкции с 4 пробами	117	27

Поскольку более 99% событий были отмечены как ядро всплеска шума при реконструкции с 4 пробами, был сделан вывод о возможности использования старых стандартных критериев нахождения всплесков шума, т.к. распределение по числу шумящих FEB близки для обоих вариантов реконструкции.

Пакет программ для независимого поиска шумящих ячеек

Пакет FindNoiseBurstCells был написан с целью независимого поиска шумящих ячеек, т.е. без использования стандартной процедуры описанной выше. Предполагается, что анализ распределения шумящих ячеек, в совокупности с другими результатами, будет использован для поиска возможной причины возникновения шумовых всплесков.

Принцип работы пакета основан на анализе распределения энерговыделения в ячейках для каждого слоя (PS, FRONT, MIDDLE и BACK) разных частей центрального и торцевого ЭМ калориметра. Кроме этого, в каждом слое анализ выполняется отдельно для разных областей данного слоя. Например, FRONT слой состоит из 7 областей, а MIDDLE из 3.

По всем ячейкам в конкретной области проводится подгонка полученного энерговыделения, в результате которой получается среднее значение энергии $\langle E \rangle \pm \sigma_E$.

Шумящими ячейками считаются те, которые вышли за пределы $\langle E \rangle \pm N\sigma E$, где N варьируется от 4 до 9 в зависимости от областей и частей calorиметра. Пример работы пакета показан на рисунке 59.

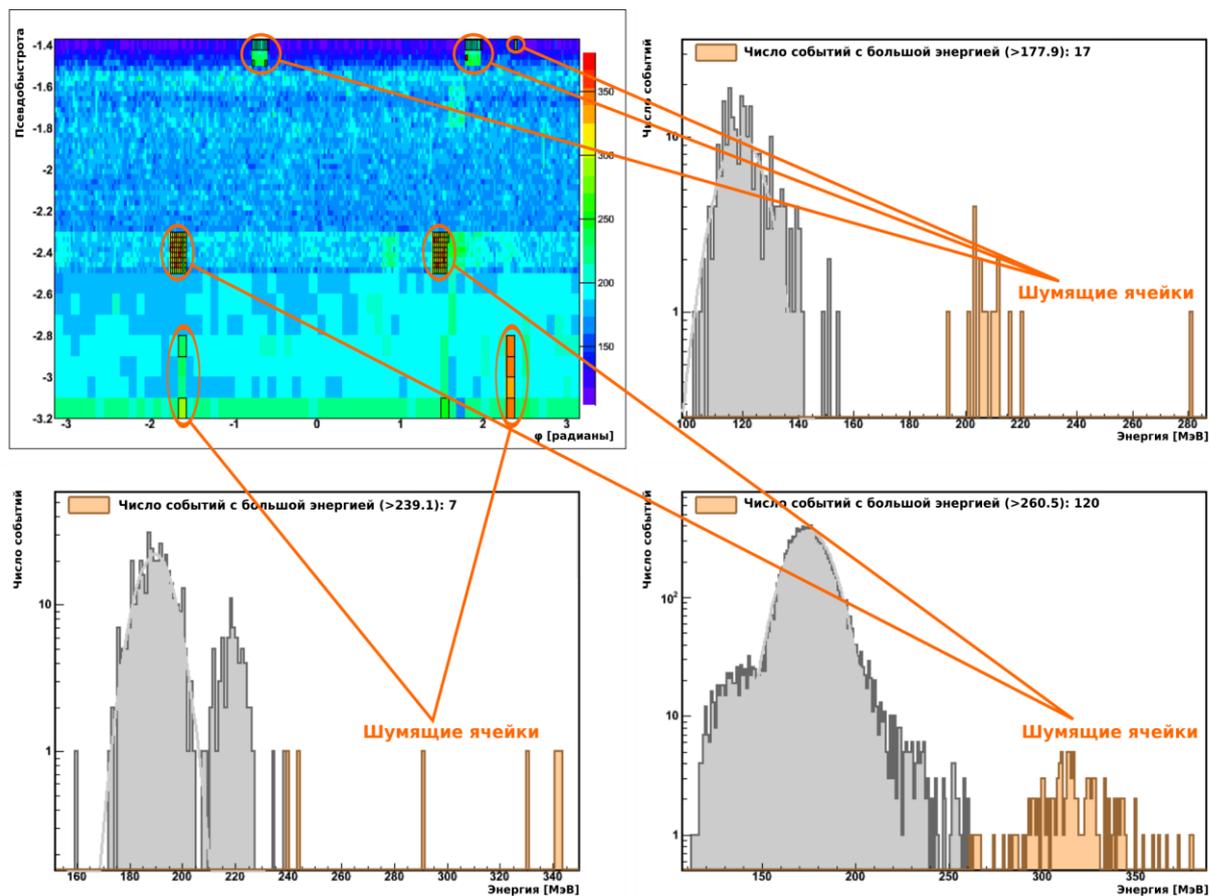


Рисунок 59 - Пример определения шумящих ячеек для MIDDLE слоя EMEC части calorиметра. Слева сверху показана карта распределения энергосвечения в ячейках в зависимости от значения азимутального угла и псевдобыстроты. На остальных частях рисунка приведены энергетические спектры в отдельных регионах, в которых найдено значительное количество шумящих ячеек (обозначены оранжевым цветом).

Руководство по использованию пакета FindNoiseBurstCells представлено в приложении 5 к отчёту.

8.2 Тестирование рабочей версии СПО для РС на реальных РС, заключительная проверка методики управления РС, систем сбора и хранения информации, анализа и мониторинга данных

Рентгеновские сканеры предназначаются для технологического контроля на разных этапах в процессе сборки малых колёс мюонного детектора АТЛАС. Планируется тестировать 2 типа детекторов, это тонко зазорные камеры и микроячейстые камеры.

На выполненных этапах сборки нет возможности применить электронику считывания информации, которая будет монтироваться на конечном этапе сборки детекторов. Однако, в процессе изготовления требуется определять качество электродов. Предложенный метод контроля заключается в измерении тока ионизации в межэлектродных зазорах. Ионизация создается рентгеновским источником фирмы АМРТЕК 30-50 кэВ. Ток ионизации измеряется в цепи высоковольтного источника напряжения. Напряжение подается между структурами электродов. Постоянство тока вдоль структуры электродов должно характеризовать равномерность величины зазоров.

Тест на отсутствие пробоев также позволяет отбраковать детали на ранних этапах изготовления детекторов.

В процессе сборки малых колёс мюонного детектора АТЛАС применены двухкоординатные системы перемещения рентгеновской трубки для контроля технологических параметров детекторов.

Облучение детекторов производится миниатюрными рентгеновскими трубками фирмы АМРТЕК. Мюонные детекторы питаются от высоковольтных блоков фирмы САЕН или фирмы ISEG, режимы которых также задаются программой и управляются по USB и RS232. Используется драйвер фирмы FTDI. В этих блоках имеется схема для автоматического измерения токов детектора.

Программное обеспечение системы сканирования мюонных детекторов состоит из нескольких разделов:

- Система управления перемещением.
- Система управления режимами высоковольтных источников питания и = Блок управления и контроля работы рентгеновской трубкой.
- Программный блок визуализации принятой информации.

Программы написаны на С++ для работы в разных операционных системах, Windows и Linux. В программе использовались стандартные библиотеки для сервоприводов и шаговых двигателей [2,3]. Также использовались программные

библиотеки фирмы АМРТЕК для рентгеновской трубки [4].

В блоке управления перемещением предусмотрены режим автоматического сканирования, который имеет два режима перемещения – непрерывное сканирование и сканирование в одном направлении (зигзаг). Также имеется возможность пошагового сканирования с остановкой на время измерения токов. Предусмотрен ручной режим измерений. В этом блоке отражается координатная информация о перемещении, скорости сканирования, площади сканирования. Вид программного интерфейса для работы с программой показан на рисунке 60

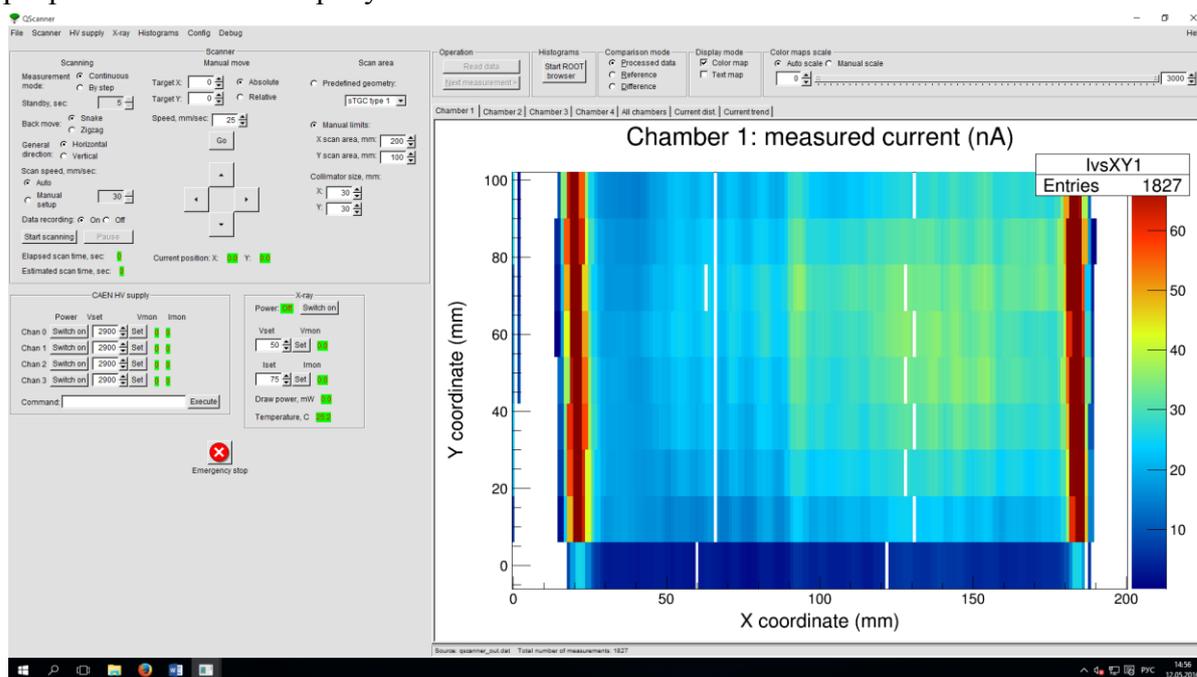


Рисунок 60 - Программный интерфейс для работы онлайн программы, созданной для тестирования системы прецизионного перемещения (общий вид - для иллюстрации).

Проверка работы программ проводилась на дублете тонкоззорных камер sTGC. Межэлектродный зазор камер заполнялся Ar/CO₂ газом. Использовались высоковольтные источники питания CAEN N1471H и iseg NHS 6220p. Напряжение на детекторах было установлено 1700В, Режим рентгеновской трубки 50кВ – 30мкА, с использованием щелевого коллиматора 1 x 12 мм². Сканирование проводилось с постоянной скоростью, равной 1 мм/сек в горизонтальном направлении, слева направо, затем следующий ряд сканировался в обратном направлении, и т.д. Регистрация тока в камере проводилась каждую секунду. Результат сканирования представлен на рисунке 61.

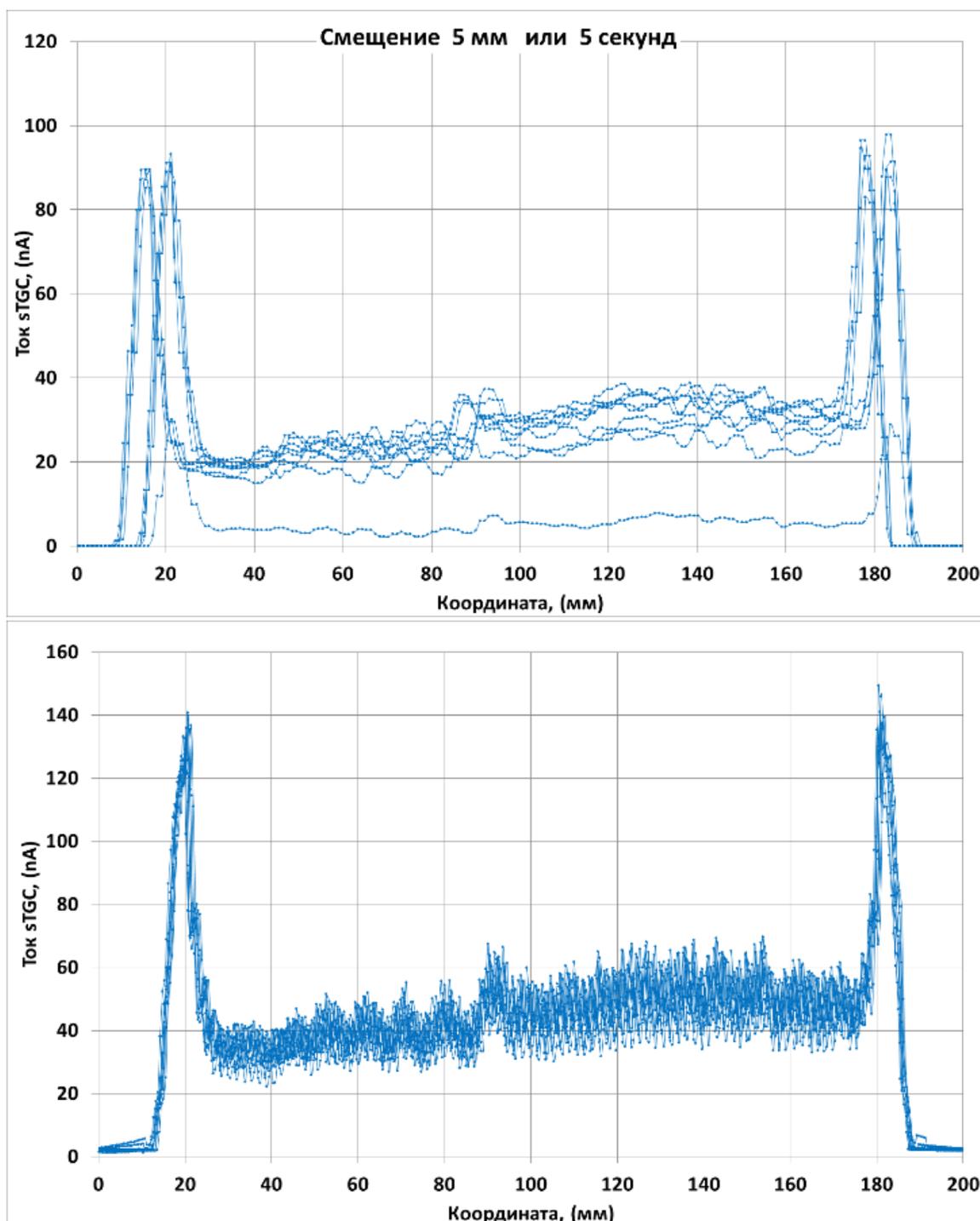


Рисунок 61 - Результаты сканирования детектора sTGC, выполненные последовательно в разных направлениях. Для блока CAEN (вверху) расхождение координатной информации составляет 5 мм. Для блока iseg NSH6220p (внизу) расхождение не наблюдается.

Из приведенных графиков можно оценить координатную точность по размытию профилей, которое составляет $\pm 1,2$ мм. Эта величина складывается из динамической точности воспроизведения координат при перемещениях, а также зависит от угла наклона щелевого коллиматора относительно направления перемещения.

Для высоковольтного блока фирмы CAEN обнаружено запаздывание приёма информации при сканировании в противоположных направлениях. Это вызвано медленным нарастанием сигнала тока в измерительной системе блока CAEN. Для подтверждения этого предположения проведено исследование нарастания тока в измерительных системах CAEN и NSH (iseg).

На рисунке 62 приведены осциллограммы — временная зависимость нарастания тока на камере sTGC при включении и выключении источника излучения – рентгеновской трубки.

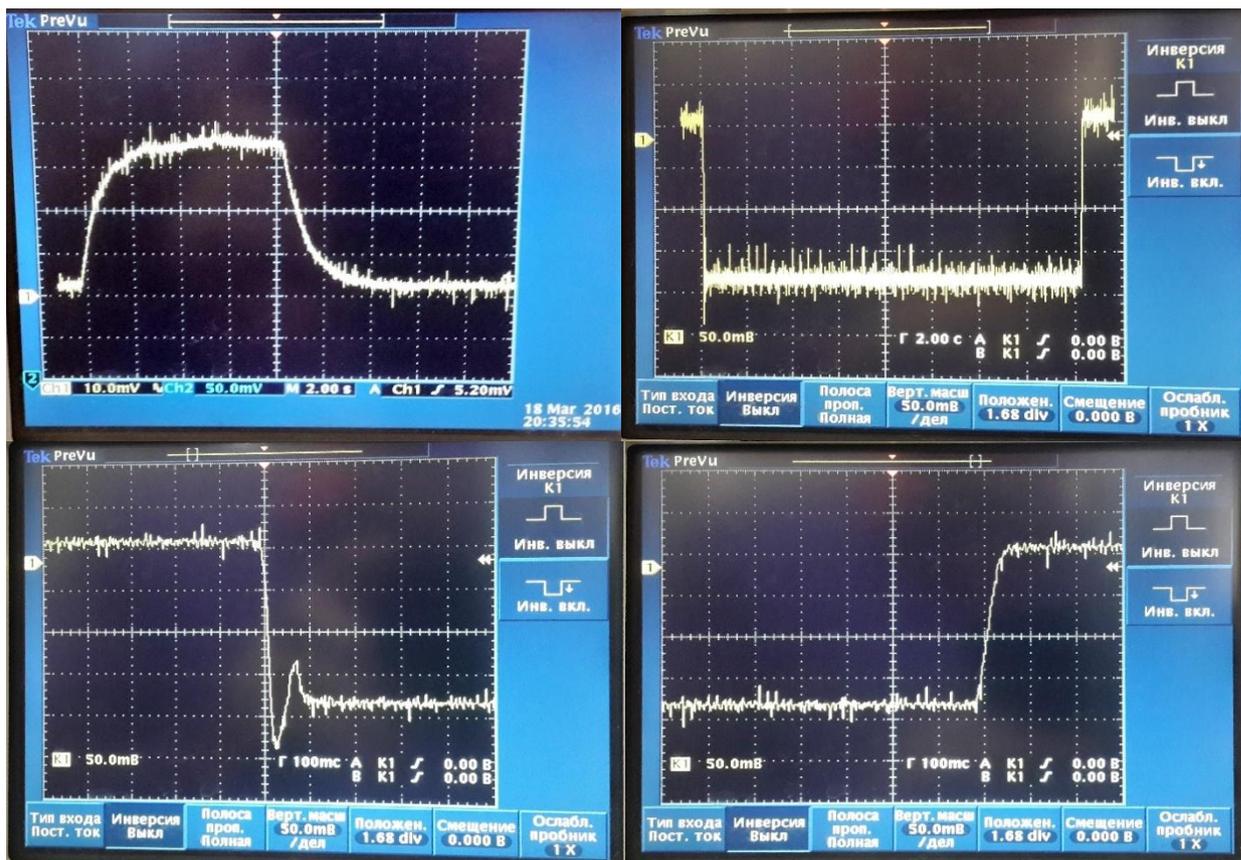


Рисунок 62. Вверху справа, нарастание тока при включении и выключении рентгеновской трубки в блоке CAEN N1471H – нарастание около 4-5 секунд. Вверху слева, аналогичная реакция блока isegNSH6220p на включение и выключение рентгеновской трубки. На нижних рисунках изображены подробно фронты для блока isegNSH6220p. Нарастание тока около 50 мсек.

Результаты работ раздела следующие:

- Создано программное обеспечение для работы со сканерами различных систем – с шаговыми двигателями и сервоприводами.
- С помощью этих программ получены некоторые характеристики сканирующих систем – координатная точность измерения токов в динамическом режиме $\pm 1,2$ мм.

- При применении высоковольтных блоков питания фирмы CAEN существует ограничение для их применения. Скорость сканирования с миллиметровым коллиматором не может быть более 0,2мм/сек.
- Для блоков фирмы iseg скорость сканирования с миллиметровым коллиматором может быть повышена до 20мм/сек без искажения информации.

8.3 Оптимизация алгоритмов идентификации электронов в условиях возросшей загрузки ТДПИ

В ходе подготовки к новому сеансу работы Большого Адронного Коллайдера (БАК) была произведена оптимизация алгоритмов идентификации электронов в условиях повышенной загрузки Трекового Детектора Переходного Излучения (ТДПИ). Целью данной работы являлась проверка результатов оптимизации алгоритмов идентификации электронов к условиям повышенной загрузки и при работе с арговыми газовыми смесями.

В отличие от первого сеанса работы ускорителя, когда детектор TRT заполнялся только газовой смесью на основе ксенона, во втором сеансе детектор заполняется как ксеноновой ($\text{Xe}/\text{CO}_2/\text{O}_2$), так и аргоновой ($\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{O}_2$) газовыми смесями. Это является необходимой мерой по причине наличия утечек газа из детектора и высокой стоимости ксенона. Схема наполнения ТДПИ газом для случая базовой геометрии 2015 года приведена на рисунке 63.

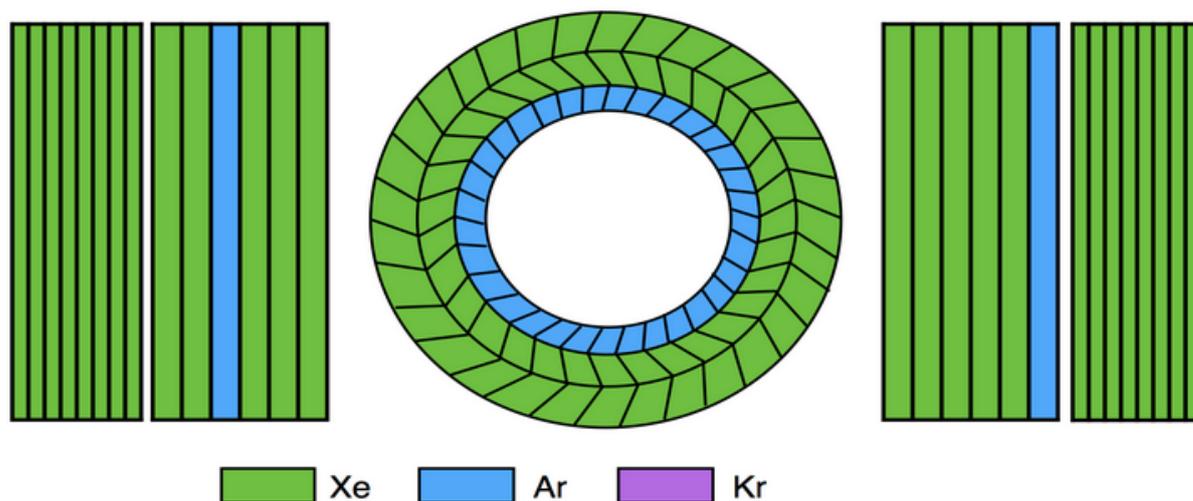


Рисунок 63 - Схема наполнения ТДПИ газовыми смесями для базовой геометрии в сеансе 2015 года. Зелёным цветом показаны модули, наполненные ксеноновой смесью, синим цветом - модули, наполненные аргоновой смесью.

Возможность идентификации электронов в первую основана на наличии сигнала в ТДПИ, превосходящего высокий порог (HT hit). Сигнал высокого порога в пропорциональной трубке показывает присутствие фотона переходного излучения, которые в основном испускается электронами. В результате число сигналов высокого порога на треке (n_{HT}) является отличительным признаком для идентификации электронов

в ТДПИ. Но поскольку треки проходят через различное число пропорциональных трубок, то лучшим признаком будет доля сигналов высокого порога, получающаяся из нормировки числа сигналов высокого порога на общее число сигналов в ТДПИ (n_{TRT}).

$$f_{HT} = n_{HT}/n_{TRT} \quad ($$

Из-за большого числа взаимодействий протонов в условиях повышенной светимости во втором сеансе работы ускорителя, используется только средний из трёх временных битов сигнала высокого порога.

Однако, в то время как доля сигналов с высоким порогом является довольно простым признаком для идентификации электронов, она не учитывает ряд дополнительной информации необходимой для идентификации частиц. Например, сигналы высокого порога могут быть так же вызваны и другими частицами за счёт флуктуаций Ландау в удельных потерях энергии и δ -лучей. Также, этот признак не включает различные вариации параметров между различными пропорциональными трубками, которые могут повлиять на вероятность возникновения сигнала высокого порога в детекторе.

В качестве альтернативы можно воспользоваться методом правдоподобия, который учитывает данные эффекты. Чтобы применить метод правдоподобия необходимо определить вероятность образования сигнала высокого порога (p_{HT}), которая в первом приближении зависит в основном от γ -фактора частицы. γ -фактор используется для того, чтобы разделить минимально ионизирующие частицы (МИЧ; например, мюоны, пионы) при низких значениях γ от электронов при высоких значениях γ . После параметризации вероятности образования сигнала высокого уровня можно составить функцию правдоподобия для каждого трека, предполагая, что трек получен от электрона или МИЧ, такой, как мюон.

$$\mathcal{L}^{e,\mu} = \prod_{TRT\ hits} \begin{cases} p_{HT}^{e,\mu}, & \text{если сигнал высокого порога} \\ 1 - p_{HT}^{e,\mu}, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Из двух полученных функции правдоподобия можно получить вероятность определения электрона следующим образом:

$$\mathcal{P}^e = \frac{\mathcal{L}^e}{\mathcal{L}^e + \mathcal{L}^\mu}$$

Как отмечено выше, часть детектора во втором сеансе была наполнена аргоновой смесью, но аргон имеет отличную от ксенона вероятность поглощения переходного излучения, что приводит к ослаблению разделения между p_{HT}^e и p_{HT}^μ и, впоследствии, к уменьшению чувствительности идентификации частиц в ТДПИ. Это приводит к большим

различиям в вероятности получения сигнала высокого порога, что показывает необходимость использования метода правдоподобия, включающего в себя коррекции как для ксеноновой, так и для аргоновой газовых смесей.

В условиях увеличенной светимости во втором сеансе работы БАК происходит увеличение среднего числа протонных взаимодействий при столкновении, что приводит к увеличению загрузки ТДПИ. Повышение загрузки происходит из-за большего количества треков в детекторе, которые оставляют больше энергии в пропорциональных счётчиках, что увеличивает вероятность получения сигнала высокого порога. Таким образом необходимо учесть загрузку детектора при рассмотрении вероятности получения сигнала высокого порога. К тому же вероятность для МИЧ растёт быстрее, чем для электронов, что понижает эффективность разделения частиц.

Для учёта загрузки детектора в определении вероятности p_{HT}^e была предложена следующая модель

$$p_{HT}^e(Occ) = p_{HT}^e(0) + (1 - p_{HT}^e(0))(p_{HT}^\mu(Occ) - p_{HT}^\mu(0))$$

Данное выражение включает в себя все эффекты, не зависящие от загрузки ТДПИ, в членах p_{HT}^e для нулевой загрузки. Для учёта эффекта загрузки детектора используется разница вероятностей для МИП частиц для выбранной и нулевой загрузки ($p_{HT}^\mu(Occ) - p_{HT}^\mu(0)$), которая входит в выражение как пропорциональный фактор члена, описывающего вероятность не получить сигнал высокого порога от электрона при нулевой загрузке ($1 - p_{HT}^e(0)$). Подобная модель позволяет предсказать поведение вероятности получения сигнала высокого порога от электрона как функции загрузки детектора с минимальным числом степеней свободы. Вероятность для МИЧ можно параметризовать полиномом второй степени:

$$p_{HT}^\mu(Occ) = c_1 + c_2 \cdot Occ + c_3 \cdot Occ^2$$

В сеансе 2016 года было решено снова изменить геометрию наполнения детектора газом, и возникла необходимость в понимании того, насколько эффективно выполняется идентификация электронов при различных геометриях. В качестве изучаемых геометрий детектора были выбраны базовая геометрия сеанса 2015 года (рисунок 63), «худший» случай геометрии сеанса 2015 года (рисунок 64) и продолженная базовая геометрия сеанса 2015 (рисунок 65)

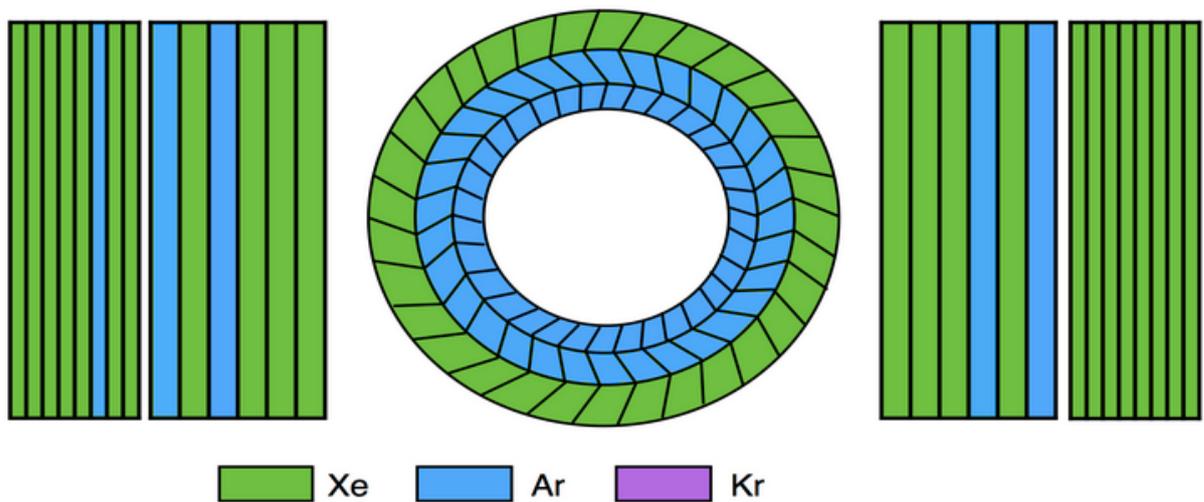


Рисунок 64 - Схема наполнения ТДПИ газовыми смесями для «худшего» случая в сеансе 2015 года. Зелёным цветом показаны модули, наполненные ксеноновой смесью, синим цветом показаны модули, наполненные аргоновой смесью.

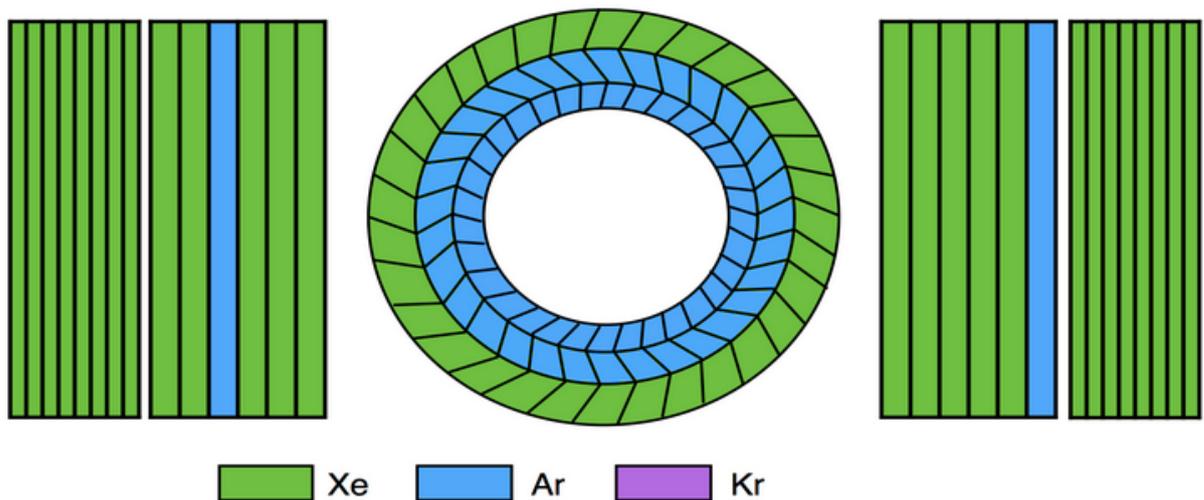


Рисунок 65 - Схема наполнения ТДПИ газовыми смесями для продолженной базовой геометрии в сеансе 2015 года. Зелёным цветом показаны модули, наполненные ксеноновой смесью, синим цветом показаны модули, наполненные аргоновой смесью.

В ходе данной работы использовались результаты Монте-Карло моделирования событий распада Z бозонов на мюонные и электрон-позитронные пары. В качестве проверки идентификации электронов рассматривалась величина эффективности регистрации мюонов при 90% эффективности регистрации электронов в зависимости от псевдобыстроты. Данная величина позволяет определить насколько хорошо разделяются мюоны и электроны в различных частях ТДПИ.

Для получения распределения эффективности регистрации мюонов были использованы кривые ошибок, определенные в выбранных регионах по псевдобыстроте.

На рисунках 66-67 показаны примеры данных кривых для базовой и продолженной базовой геометрии при различных загрузках для всей центральной части детектора ($|\eta| < 0.625$).

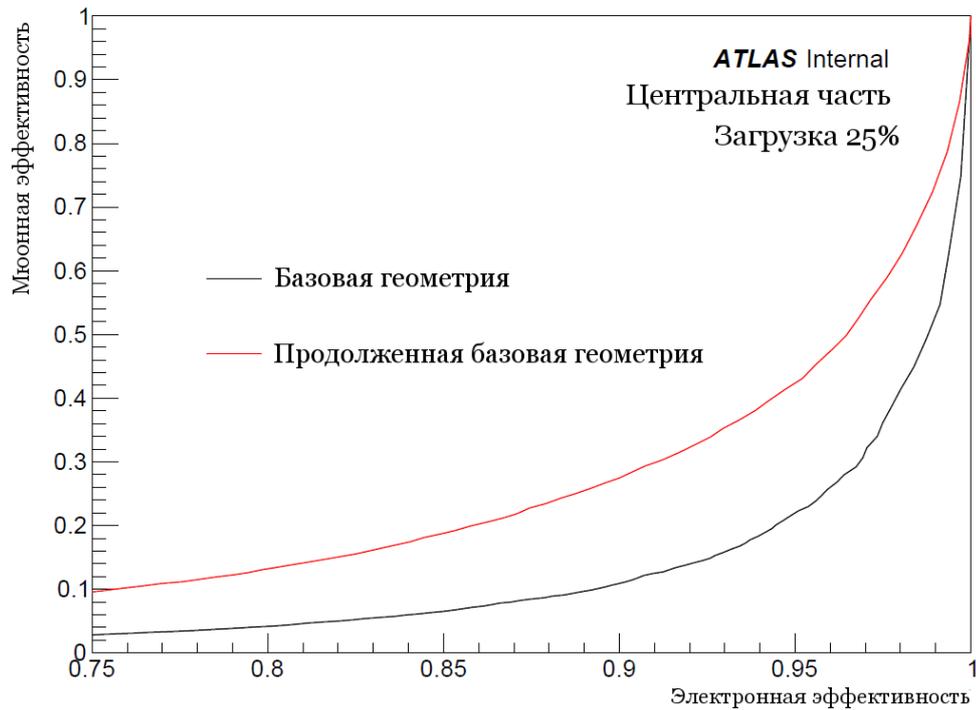


Рисунок 66 - Кривые ошибок для базовой (чёрная линия) и продолженной базовой (красная линия) геометрий для центральной части ТДПИ при загрузке в 25%.

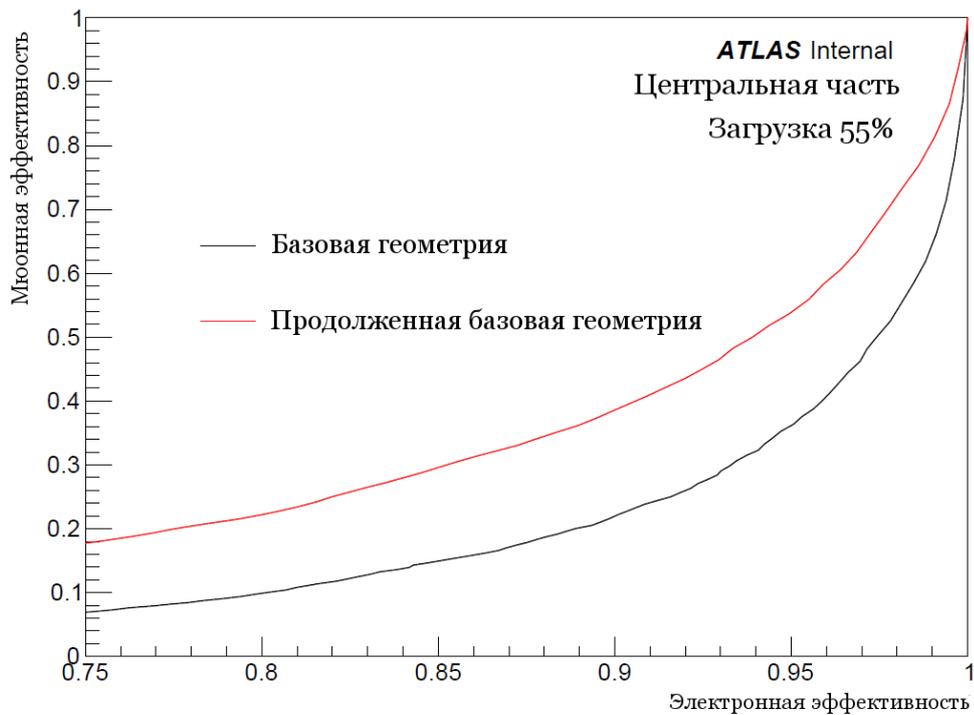


Рисунок 67 - Кривые ошибок для базовой (чёрная линия) и продолженной базовой (красная линия) геометрий для центральной части ТДПИ при загрузке в 55%

На рисунках 68-69 приведены сравнения распределений эффективности регистрации мюонов при 90% эффективности регистрации электронов в зависимости от псевдобыстроты для уровня загрузки в 25% для базовой геометрии, продолженной базовой геометрии и «худшего» случая.

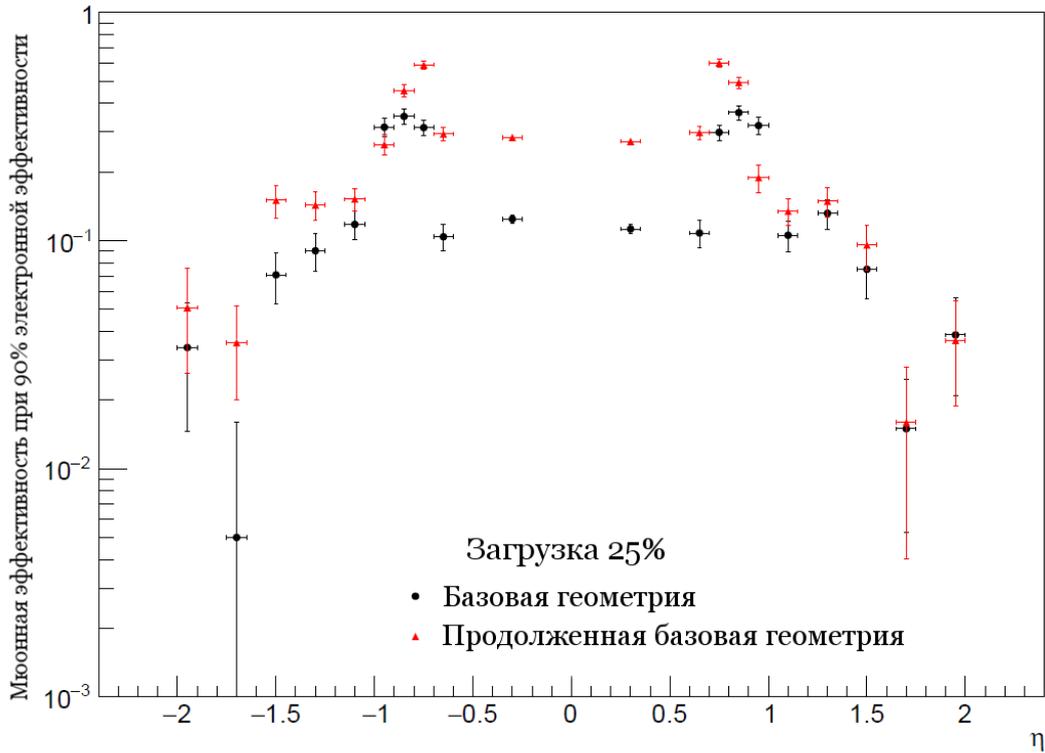


Рисунок 68. Распределение эффективности регистрации мюонов при 90% эффективности регистрации электронов при 25% загрузке детектора для случаев базовой геометрии (чёрные точки) и продолженной базовой геометрии (красные треугольники).

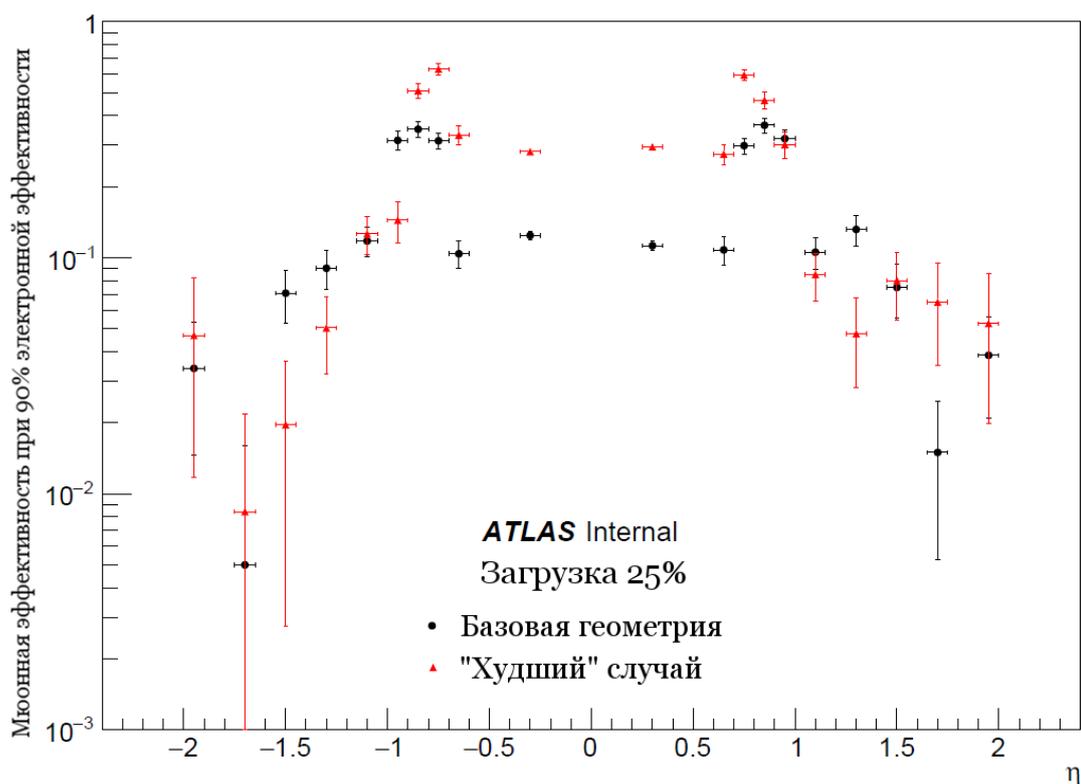


Рисунок 69 - Распределение эффективности регистрации мюонов при 90% эффективности регистрации электронов при 25% загрузке детектора для случаев базовой геометрии (чёрные точки) и «худшего» случая (красные треугольники).

Результаты показывают, что эффективность регистрации мюонов в центральной части детектора достигает порядка 30% для продолженной геометрии и «худшего» случая, что является ожидаемым эффектом при использовании двух модулей, наполненных аргоном, что показывает корректную работу алгоритмов идентификации частиц в ТДПИ. Высокая мюонная эффективность в области $0,625 < |\eta| < 1,07$ связана с попаданием частицы в область перехода между центральной и торцевыми частями ТДПИ, которая содержит меньше отсчётов на треке, и относительно большей вероятностью получения сигнала высокого уровня от мюонов. Большие ошибки при $|\eta| > 1,07$ связаны с малой статистикой для димюонного распада в торцевой части детектора.

Аналогичные сравнения были проведены для случая повышенной загрузки, достигающей 55%. Результаты сравнения приведены на рис. 70-71.

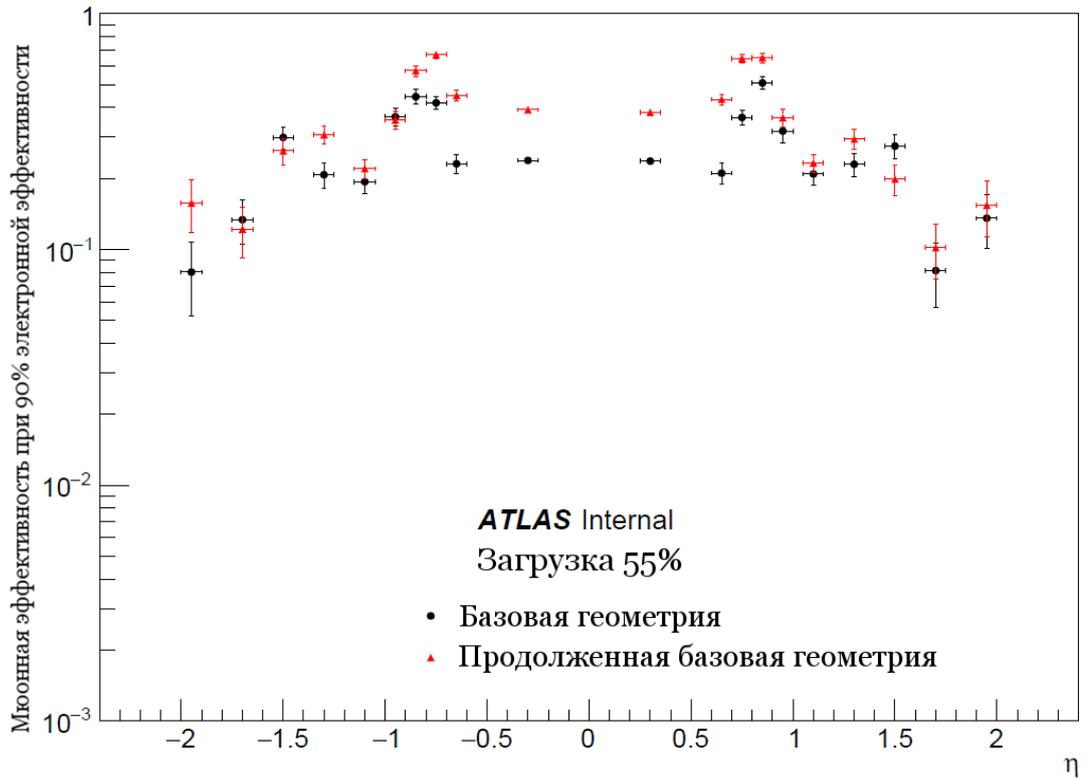


Рисунок 70 - Распределение эффективности регистрации мюонов при 90% эффективности регистрации электронов при 25% загрузке детектора для случаев базовой геометрии (чёрные точки) и продолженной базовой геометрии (красные треугольники).

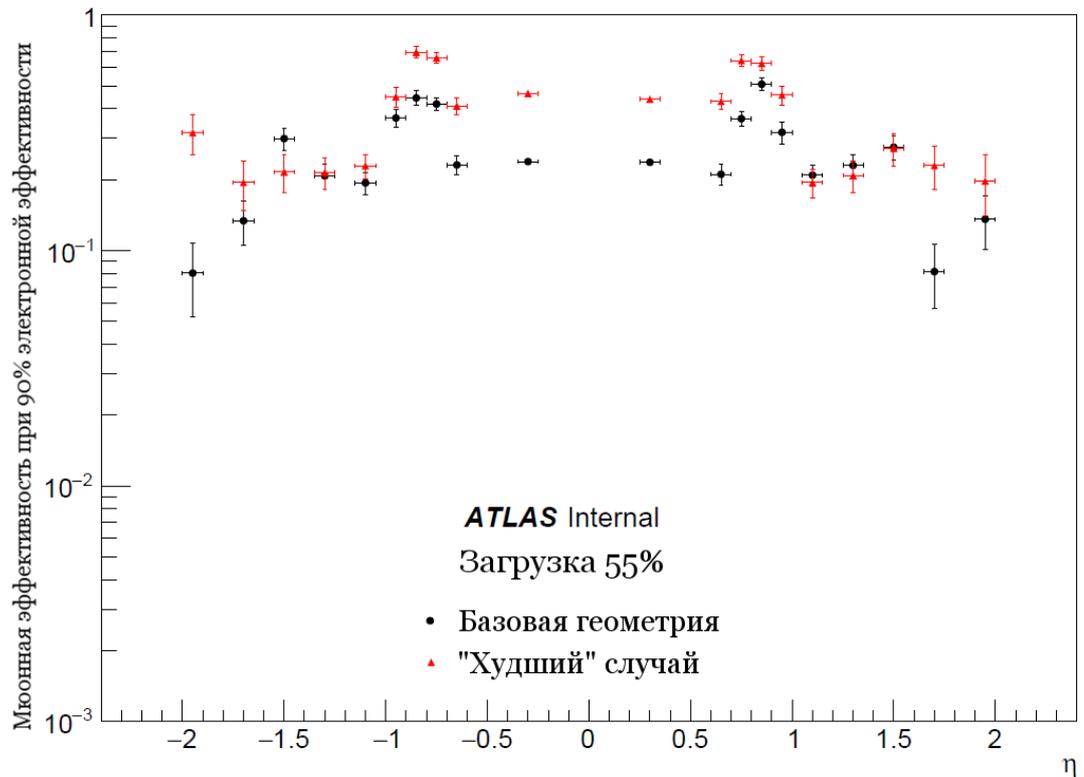


Рисунок 71 - Распределение эффективности регистрации мюонов при 90% эффективности регистрации электронов при 25% загрузке детектора для случаев базовой геометрии (чёрные точки) и «худшего» случая (красные треугольники).

При повышении загрузки эффективность регистрации мюонов значительно возрастает (до 40% в центральной части и до 20% в торцевых частях детектора) и можно видеть, что замена ксеноновой газовой смеси на аргоновую в части модулей ТДПИ понижает качество идентификации электронов в меньшей степени для высокой загрузки, по сравнению со случаем низкой загрузки. Резкое повышение эффективности в торцевых частях связано с увеличением числа мюонных треков в торцевой части, что приводит к повышению вероятности регистрации сигнала высокого уровня.

Проведенная работа показала, что оптимизация алгоритмов идентификации частиц успешно работает в условиях повышенной загрузки и корректно учитывает вероятности возникновения сигнала высокого порога в аргоновой газовой смеси для электронов и мюонов.

8.4 Анализ возможностей оптимизации алгоритмов трекинга во внутреннем детекторе с учетом данных, полученных на БАК после длительной остановки

Недавно начавшийся сеанс работы ускорителя Run 2 ставит серьезные задачи перед программным обеспечением эксперимента ATLAS. Триггер высокого уровня (HLT) достигнет частоты 1 КГц, вместо 400 Гц, которые изначально планировалось достичь к концу сеанса Run 1, и до которых не хватило примерно 150 Гц. Программное обеспечение также должно быть готово к более высокой степени наложения событий. На рисунке 72 показано, что время обработки события увеличивается в зависимости от среднего числа взаимодействий в сгустках частиц в пересекающихся пучках.

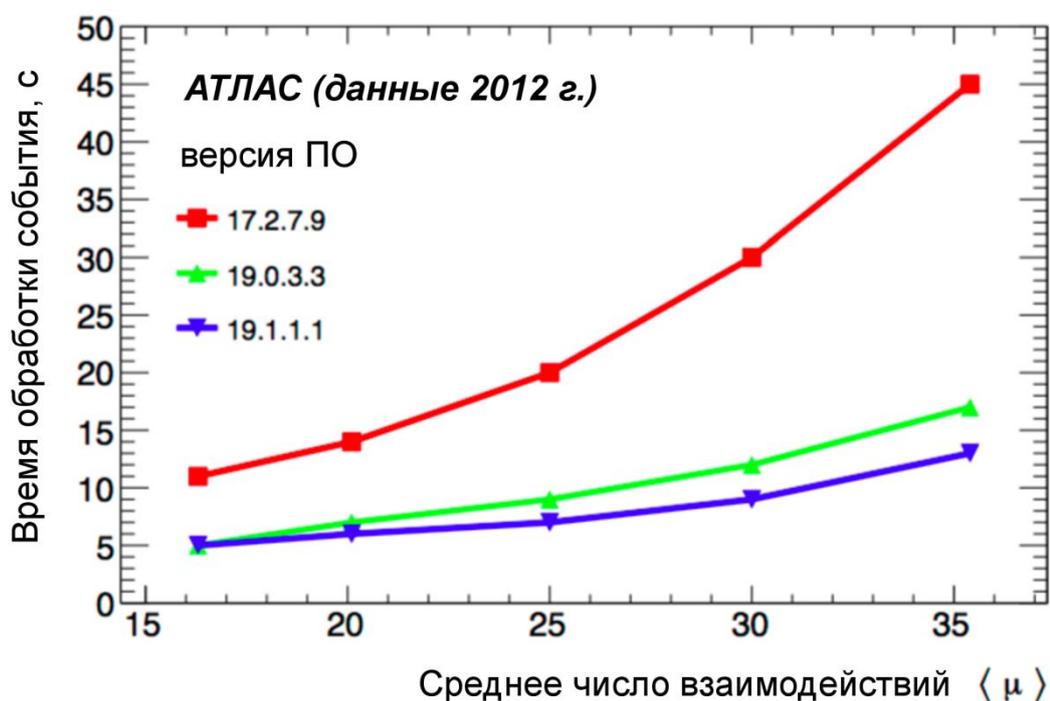


Рисунок 72 – Время обработки одного события при реконструкции в зависимости от среднего числа взаимодействий в сгустках частиц пересекающихся пучков и версии программного обеспечения. События отбирались триггером при наличии струй, потери поперечного импульса, или при обнаружении тау-лептонов. Версию ПО 17.2.7.9 использовали в сеансе Run 1, а версии 19.0.3.3 и 19.1.1.1 уже включают некоторые улучшения. Для исследования использовались данные, полученные в конце 2012 года при завершении сеанса Run1 работы ускорителя.

Кроме того, производительность физического анализа не должна быть поставлена под угрозу, а наоборот, должна по возможности быть улучшена. В условиях, когда бюджет не позволяет привлекать больше вычислительных ресурсов, ставится задача

справиться с поступающим объемом данных на имеющемся оборудовании. Для достижения поставленных целей потребовалось трехкратное сокращение времени обработки на этапе реконструкции событий по сравнению с тем, что мы имели в Run 1.

Для ускорения реконструкции был выполнен ряд общих улучшений программного обеспечения. Был переработан метод доступа к значениям напряженности магнитного поля: был уменьшен объем запрашиваемых данных, уменьшено число преобразований и реализовано кэширование последних результатов, так как запросы к значениям магнитного поля часто выполняются для соседних местоположений. Библиотека линейной алгебры CLHEP была заменена библиотекой Eigen, которая благодаря использованию шаблонных выражений значительно повышает производительность. Также была заменена библиотека GNU libm более быстрой Intel Math. И, наконец, новые, более оптимизированные версии компилятора GCC, используемые в 64-битном режиме также внесли вклад в уменьшение времени выполнения алгоритмов реконструкции.

Для повышения удобства использования программного обеспечения физического анализа была разработана новая Модель Данных Событий (EDM - Event Data Model) с результирующим выходным форматом xAOD, который заменил старые форматы AOD и D3PD. Для этого потребовалось внести множество дополнительных изменений в программное обеспечение реконструкции. Простота и согласованность программного обеспечения были главными приоритетами при создании новой модели EDM. Например, теперь один фрагмент кода позволяет изолировать электроны и мюоны, тогда как раньше это выполнялось различными программными модулями.

Ключевой особенностью новой модели EDM является разделение данных объектов и самих объектов (далее “внешнее хранение”). Вместо того, чтобы храниться в качестве переменных членов классов, все данные объектов хранятся отдельно как вектора значений. Таким образом, данные сохраняются в формате “структур массивов”, в то время как пользователь может получить доступ к ним как к “массивам структур”. Такая организация позволяет выполнять частичное чтение объектов “по требованию”; выборочно удалять свойства объектов; а также добавлять произвольные свойства, определенные самим пользователем в унифицированном виде. Модель EDM также показала улучшенную производительность за счет локализации обращений к памяти. Полученные структуры данных могут быть записаны в файлы формата ROOT вместе со свойствами данных, представленных в виде деревьев ROOT.

На рисунке 73 представлена обобщенная схема внешнего хранения данных.

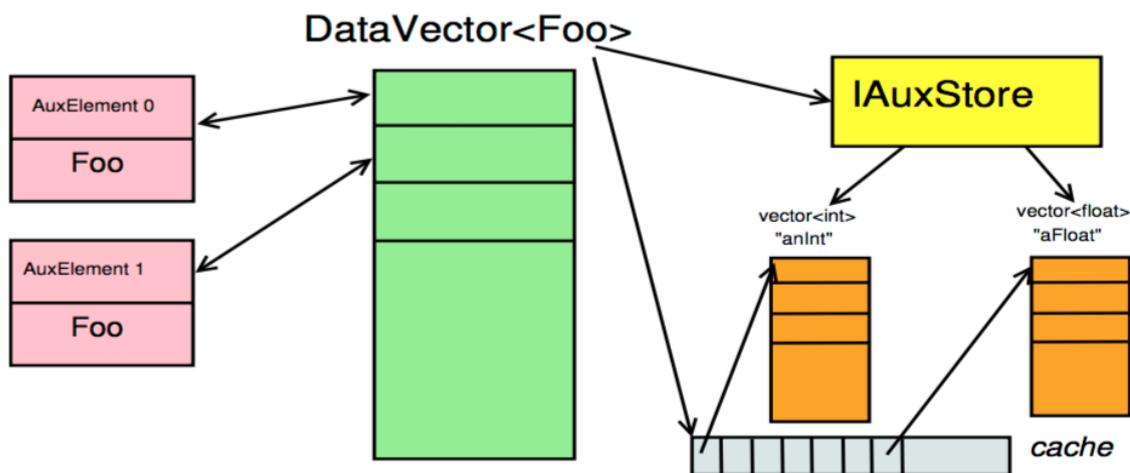


Рисунок 73 – Схема внешнего хранения объектов. На рисунке применяется терминология языка программирования высокого уровня: DataVector — набор векторов объектов, vector (вектор) — шаблонный класс последовательных контейнеров, int — обозначение целого типа данных, float — обозначение вещественного типа данных, AuxElement — элемент вектора, IAuxStore — абстрактный интерфейс, cache — область памяти компьютера с быстрым доступом.

Объект DataVector хранит указатели на элементы. Элементы в свою очередь содержат указатели назад на контейнер и собственный индекс в контейнере. Так же DataVector содержит указатель на абстрактный интерфейс IAuxStore, обеспечивающий внешнее хранение объектов. Интерфейс управляет набором векторов объектов, по одному на каждую переменную. Во время выполнения запроса к внешней переменной, связанной с данным контейнером, DataVector извлекает их через интерфейс IAuxStore вектор для этой переменной, затем используя индексы, выполняет поиск нужного элемента в векторе.

Начаты работы, связанные с исследованием возможностей использования многопроцессорных (многоядерных) систем для алгоритмов трекинга и реконструкции во Внутреннем Детекторе АТЛАС. Было показано, что алгоритм поиска и восстановления треков заряженных частиц может быть оптимизирован таким образом, что все ядра современных процессоров будут иметь равномерную загрузку при реконструкции, что позволит уменьшить время реконструкции одного события почти пропорционально числу ядер.

Был осуществлен анализ более эффективного использования современных и будущих многоядерных процессоров для ускорения реконструкции событий. Алгоритм обнаружения первичных треков во Внутреннем детекторе установки ATLAS занимает около 50% от общего времени реконструкции. Исследование заключалось в попытке

реорганизации кода таким образом, чтобы для реконструкции события были задействованы все вычислительные ядра системы, и при этом ядрам было доступно единое пространство кластеров, пространственных точек, треков и т.д., а также описание геометрии детектора и базы данных условий.

Подход, принятый за основу данного исследования, заключается в параллелизации на уровне программных инструментов. В этом случае при реконструкции каждого события мы задействуем все доступные вычислительные ядра, запуская отдельные инструменты параллельно. В соответствии с данным подходом была выполнена адаптация следующих алгоритмов для использования возможностей многопоточковых вычислений:

- InDetSiSPSeededTrackFinder: этот алгоритм отвечает за поиск начальных треков в кремниевых детекторах и выдает на выходе вектор треков.
- InDetExtensionProcessor: этот алгоритм вычисляет продолжение треков из кремниевых детекторов в детекторе TRT.

Идея адаптации алгоритмов заключается в том, что бы каждый следующий элемент из вектора треков независимо обрабатывался на доступном ядре процессора. В ходе исследований было выполнено моделирование многоядерной системы при помощи программного обеспечения управления потоками библиотеки POSIX thread (pthread) library и Intel Threading Building Blocks (TBB). Работа велась на вычислительной машине Intel® Core™ i7-2600 CPU @3.40ГГц процессоре с 4 физическими ядрами и 8 Гб RAM-памяти.

Результаты исследования продемонстрировали в первую очередь принципиальную возможность адаптации алгоритмов, а также обратную зависимость времени реконструкции с увеличением числа вычислительных ядер процессора.

В рамках подготовки программного обеспечения к будущему использованию параллелизации, были выполнены работы по замене используемых математических библиотек и оптимизации программного обеспечения. Задача включает в себя рационализацию модели данных событий, векторизацию базовых компонентов алгоритмов и устранение алгоритмов, представляющих собой узкие места системы. Было обеспечено трехкратное уменьшение времени выполнения, в то время как введение нового формата данных xAOD потребовало значительных изменений в алгоритмах реконструкции. Также было достигнуто улучшение производительности физического анализа.

Память всегда была дефицитным ресурсом для вычислительных задач, выполняющих реконструкцию в эксперименте ATLAS. Параллельно с исследованием возможности параллелизации самих алгоритмов в эксперименте ATLAS также ведутся

разработки средств параллельного выполнения текущих алгоритмов. Для оптимального использования всех доступных ядер процессора на одном вычислительном узле нам необходим механизм, обеспечивающий совместное использование страниц памяти между процессами или потоками. Несколько лет назад а ATLAS была разработана многопроцессорная версия среды реконструкции, генерации и анализа данных Athena - AthenaMP. Основная стратегия AthenaMP заключается в инициализации и выделении максимального размера доступной памяти, и затем запуск нескольких независимых рабочих процессов, которые в параллельном режиме обрабатывают события.

Выполненные в рамках данного исследования работы по переходу на новые математические библиотеки, а также внесенные изменения непосредственно в алгоритмы и модели трекинга, в том числе, призваны повысить и качество работы в среде AthenaMP. С помощью AthenaMP было продемонстрировано, что использование памяти может быть уменьшено в два раза. При этом полученные физические результаты были идентичны полученным при запуске последовательных и многопроцессных задач Athena. Таким образом, в настоящее время AthenaMP используется в эксперименте ATLAS для обработки большого объема данных на многоядерных ресурсах в среде ГРИД. Также система AthenaMP заняла центральную часть недавно разработанной инфраструктуры для обработки событий - Сервиса событий (Event Service). Сервис событий предназначен для выполнения задач на ресурсах типа суперкомпьютеров и облачных инфраструктур.

Работы, представленные в данном разделе показывают эффективность выбранных методов увеличения производительности алгоритмов реконструкции треков.

8.5 Разработка алгоритмов отбора событий распада дважды тяжелых (B_c) мезонов и тяжелых барионов.

Алгоритмы отбора распадов B_c^+ мезона в D-мезоны и мюонную пару.

В связи с растущей светимостью коллайдера потоки событий в триггере высокого уровня (HLT), отбираемых димюонными триггерами в области массы пары мюонов, соответствующей распаду $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$, оказываются слишком высокими; сохранение на диск всех таких событий оказывается невозможным. Это делает актуальной задачу разработки алгоритмов более строгого отбора более узкого класса конкретных распадов с парой мюонов в конечном состоянии, которые позволят снизить потоки событий в HLT за счёт дополнительных требований к адронным трекам этих распадов, восстановленных во внутреннем детекторе.

Для ряда распадов ранее уже были разработаны соответствующие алгоритмы триггерного отбора (см. описание в отчетах по предыдущим этапам) Триггерные цепочки HLT_2mu*_bVmu*mu* включали алгоритмы отбора таких распадов как $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- K^+$, $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- K^{*0}(K^+ \pi^-)$, $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \phi(K^+ K^-)$ и $\Lambda_b^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \Lambda^0(p \pi^-)$, в которых производится полная реконструкция 2-х или 4-х треков конечного состояния этих распадов с фитированием их общей вершины. Кроме того, был разработан алгоритм отбора распадов $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D_s^+(K^+ K^- \pi^+)$ с 5-ю треками в конечном состоянии. Во всех указанных случаях пара мюонов отбирается в широком окне инвариантной массы от 0 до 5,5 ГэВ, что позволяет исследовать как редкие распады с нерезонансным рождением мюонной пары, так и те, которые идут через промежуточные резонансы чармония J/ψ и $\psi(2S)$. Все указанные триггеры успешно работали в сеансе Run 1 (с середины 2012 г.) и в начале сеанса Run 2 в 2015 г.

Для набора данных 2016 г. был разработан ряд новых алгоритмов отбора распадов B_c^+ мезона в D-мезоны и мюонную пару. Помимо уже разработанного ранее алгоритма для распадов $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D_s^+(\phi(K^+ K^-) \pi^+)$, были подготовлены и протестированы алгоритмы для отбора распадов $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D^+(K^- \pi^+ \pi^+)$ и $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D^{*+}(D^0(K^- \pi^+) \pi^+)$.

При отборе распадов $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D^+(K^- \pi^+ \pi^+)$ производится комбинирование треков двух мюонов с тремя дополнительными треками, найденными внутренним детектором внутри областей интереса (RoI) вокруг двух мюонов. Трекам присваиваются массовые гипотезы двух заряженных пионов и каона, и производится грубый отбор комбинаций по величине инвариантной массы. Затем производится фитирование каскада из двух вершин распада B_c^+ и D^+ мезонов. При этом комбинированный импульс трёх треков,

составляющих кандидат D^+ мезона должен из его вершины указывать на вершину распада B_c^+ мезона.

Окончательные критерии отбора, применяемые в этом триггере имеют вид:

- инвариантная масса D^+ $1500 \text{ MeV} < m(D^+) < 2300 \text{ MeV}$,
- инвариантная масса B_c^+ $5450 \text{ MeV} < m(B_c^+) < 7050 \text{ MeV}$,
- поперечный импульс D^+ $p_T(D^+) > 2 \text{ GeV}$,
- поперечный импульс B_c^+ $p_T(B_c^+) > 8 \text{ GeV}$,
- χ^2 восстановленной вершины D^+ $\chi^2(D^+) < 90$,
- χ^2 восстановленной вершины B_c^+ $\chi^2(B_c^+) < 120$.

Также имеется возможность отбора по величине пробега D^+ мезона, т. е. расстояния между вершинами B_c^+ и D^+ , которая может помочь дополнительно снизить потоки отбираемых событий; однако на текущем этапе такой отбор не используется.

Разработанный алгоритм был протестирован с использованием модельных данных Монте-Карло сигнального распада $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D^+(K^-\pi^+\pi^+)$. Для наборов данных было проведено полное моделирование отклика детектора и триггера.

На рисунке 74 и 75 приведены распределения инвариантных масс кандидатов B_c^+ и D^+ , реконструированных в разработанном алгоритмом в модельных данных.

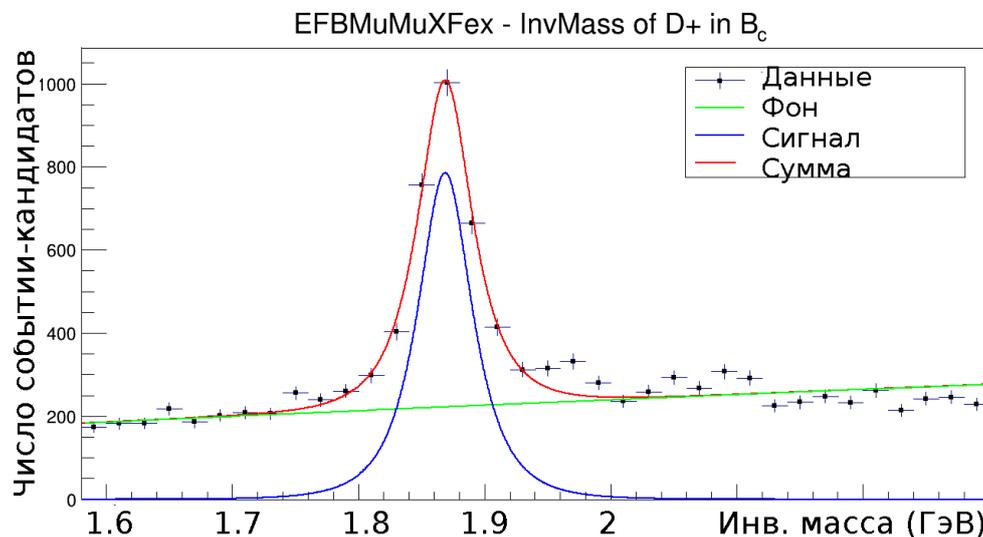


Рисунок 74 - Распределения инвариантной массы кандидатов D^+ , реконструированных разработанным алгоритмом (EFBMuMuXFex) в модельных данных.

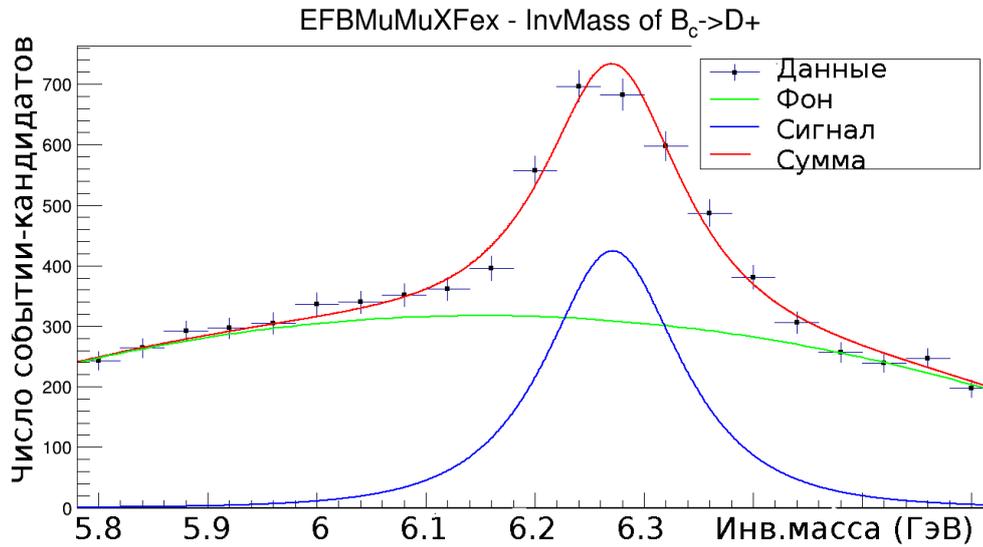


Рисунок 75 - Распределения инвариантной массы кандидатов B_c^+ , реконструированных разработанным алгоритмом (EFB Mu Mu X Fe x) в модельных данных.

Видно, что пики указанных резонансов хорошо выделяются на уровне триггера HLT.

Отбор распадов $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D^{*+} (D^0 (K^- \pi^+) \pi^+)$ следует похожей логике. Так как время жизни D^0 мезона в 2,5 раза меньше времени жизни D^+ мезона, при фитировании кандидатов данного распада не строится каскад из двух вершин, а все 5 треков фитируются в одну общую вершину. Применяются следующие критерии отбора:

$$1500 \text{ MeV} < m(D^0) < 2300 \text{ MeV},$$

$$5200 \text{ MeV} < m(B_c^+) < 7000 \text{ MeV},$$

$$\Delta m(D^0 - D^{*+}) < 180 \text{ MeV},$$

$$p_T(D^{*+}) > 2 \text{ GeV},$$

$$p_T(B_c^+) > 8 \text{ GeV},$$

$$\chi^2(D^0) < 90,$$

$$\chi^2(B_c^+) < 120.$$

На рисунке 76 приведены распределения инвариантных масс кандидатов B_c^+ и D^0 , реконструированных разработанным алгоритмом в модельных данных.

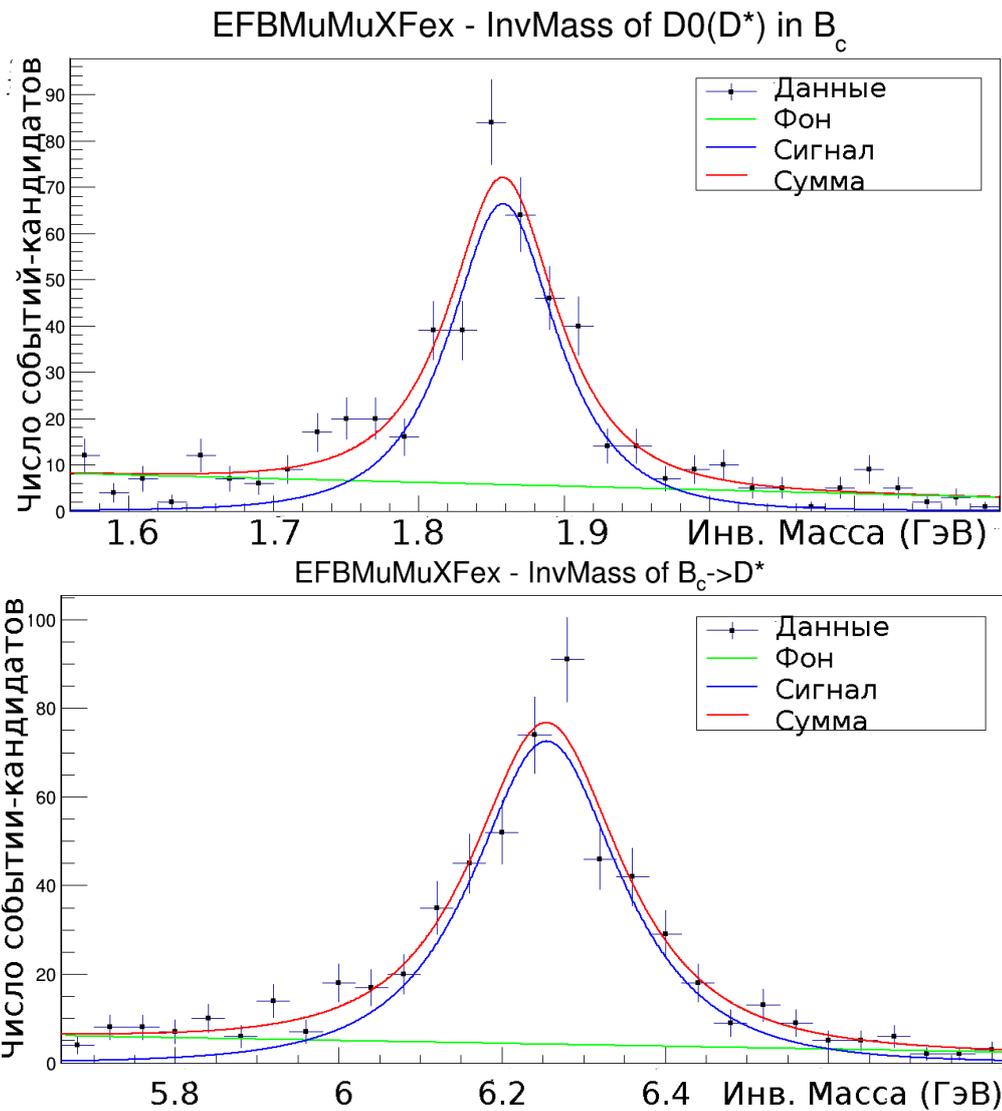


Рисунок 76 - Распределения инвариантной массы кандидатов D^0 (вверху) и B_c^+ (внизу), реконструированных разработанным алгоритмом (EFBMuMuXFex) в модельных данных.

Пики указанных резонансов также хорошо выделяются на уровне триггера HLT.

Проблемой описанного алгоритма является низкая эффективность реконструкции распадов. Она вызвана малой величиной разности масс D^{*+} и D^0 мезонов, вследствие чего мягкий пион π_s^+ от распада D^{*+} имеет невысокое значение поперечного импульса и не реконструируется алгоритмами трекинга в HLT (порог составляет 1 ГэВ). Для увеличения эффективности была подготовлена модификация описанного алгоритма, где производится частичная реконструкция распада без участия мягкого пиона π_s^+ . Таким образом, в общую вершину фитируются только 4 трека вместо 5. В результате пик в распределении инвариантной массы таких комбинаций для сигнальных событий оказывается уширенным и смещённым примерно на 200 МэВ влево от массы B_c^+ мезона.

Распределения инвариантных масс не полностью реконструированного кандидата

B_c^+ и D^0 , в модельных данных приведены на рисунке 77.

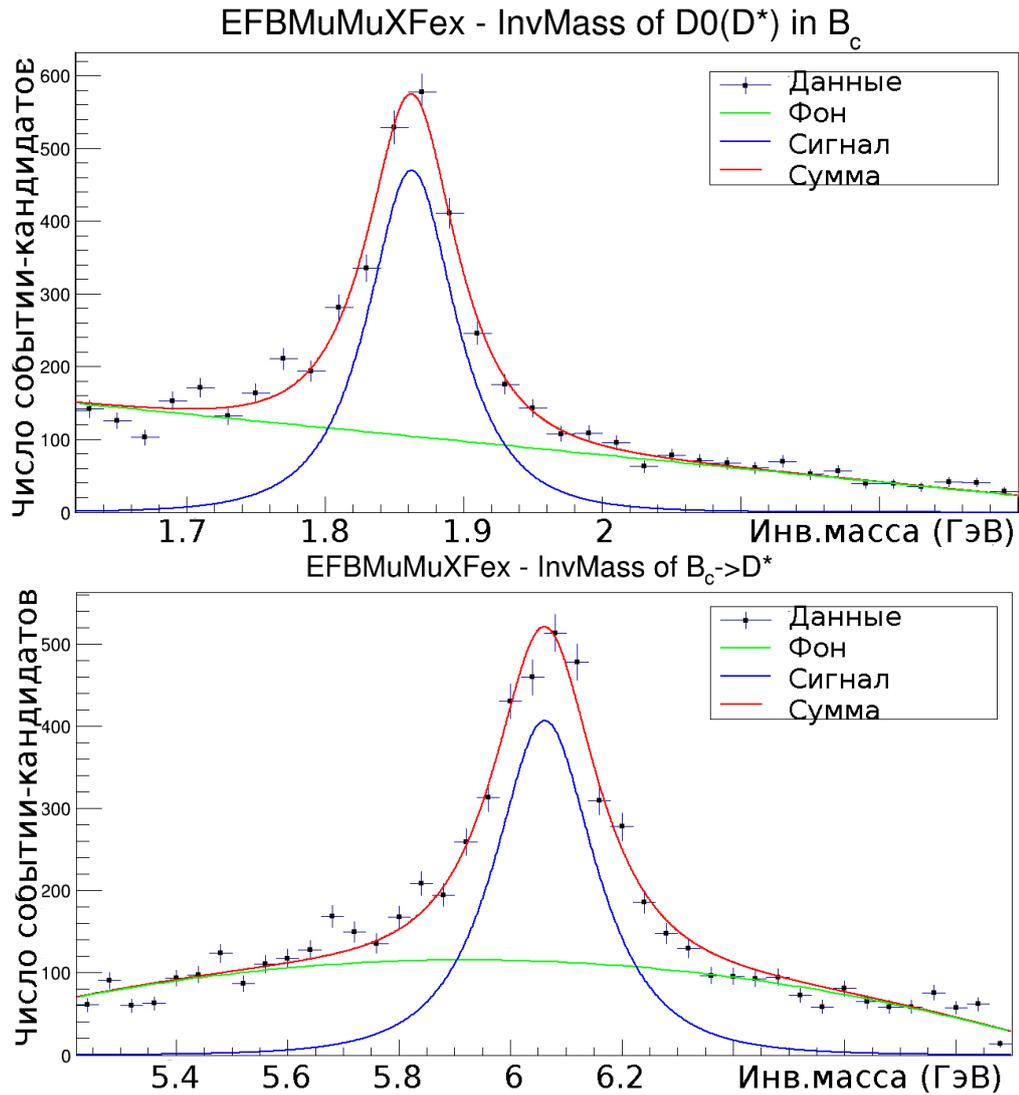


Рисунок 77 - Распределения инвариантной массы кандидатов D^0 (вверху)и B_c^+ (внизу), реконструированных разработанным алгоритмом (*EFBMuMuXFex*) в модельных данных при использовании неполной реконструкции без мягкого пиона π_s^+ .

Для полноты на рисунке 78 также приведены распределения инвариантной массы кандидатов B_c^+ и D_s^+ , реконструируемые алгоритмом отбора распадов $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D_s^+(\phi(K^+K^-\pi^+))$.

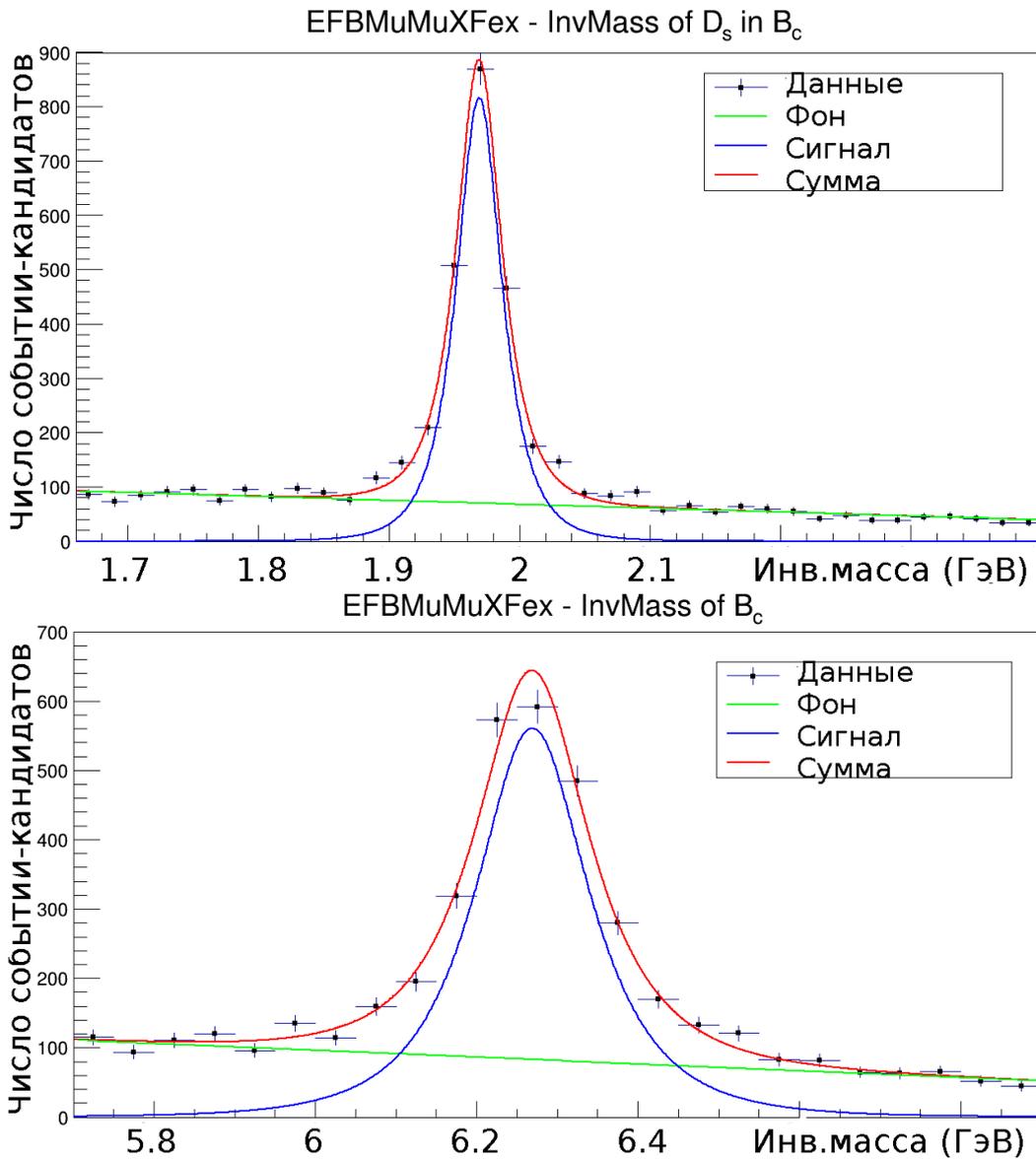


Рисунок 78 - Распределения инвариантной массы кандидатов D_s^+ (вверху) и B_c^+ (внизу), реконструированных разработанным алгоритмом в модельных данных

Логика его работы совпадает с логикой алгоритма для распада $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D^{*+} (D^0(K^- \pi^+) \pi_s^+)$ (с полной реконструкцией всех 5 треков). Каскадное фитирование не используется в связи с малым временем жизни D_s^+ мезона. Применяются следующие критерии отбора:

$$980 \text{ MeV} < m(\varphi) < 1080 \text{ MeV},$$

$$1600 \text{ MeV} < m(D_s^+) < 2400 \text{ MeV},$$

$$5450 \text{ MeV} < m(B_c^+) < 7050 \text{ MeV},$$

$$p_T(D_s^+) > 2 \text{ GeV},$$

$$p_T(B_c^+) > 8 \text{ GeV},$$

$$\chi^2(D_s^+) < 90,$$

$$\chi^2(B_c^+) < 120.$$

Из рисунка видно, что сигналы данного распада надёжно выделяются на уровнеHLT.

В таблице 5 приведены значения эффективности отбора событий в указанных каналах распада соответствующими алгоритмами HLT.

Таблица 5 - Эффективности отбора событий распадов B_c-мезонов в различных вариантах реконструкции

Канал распада	Эффективность, %
$B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D_s^+ (\phi(K^+ K^-) \pi^+)$	40,6
$B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D^+ (K^+ K^- \pi^+)$	37,2
$B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D^{*+} (D^0(K^- \pi^+) \pi^+)$, полная реконструкция	7,1
$B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D^{*+} (D^0(K^- \pi^+) \pi^+)$, неполная реконструкция	56,0

Реконструкция распадов барионов с 2- или 3-мя тяжелыми кварками.

Методы реконструкции барионов, содержащих 2 или 3 тяжёлых кварка, были проанализированы с помощью генератора событий Pythia 8.2. Для полной реконструкции Ξ_{cc}^\pm барионов представляет интерес каскадный распад

$$\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Xi_c^0 \pi^+ \rightarrow \Xi^- \pi^+ \pi^+ \rightarrow \Lambda^0 \pi^- \pi^+ \pi^+ \rightarrow p \pi^- \pi^- \pi^+ \pi^+$$

на пять заряжённых адронов в конечном состоянии.

На рисунке 79 показаны распределения по поперечному импульсу и псевдобыстроте Ξ_{cc}^\pm барионов, распадающихся на пять заряженных адронов с $p_T > 0,4$ ГэВ и $|\eta| < 2,5$, т.е. в области реконструкции треков детектора ATLAS.

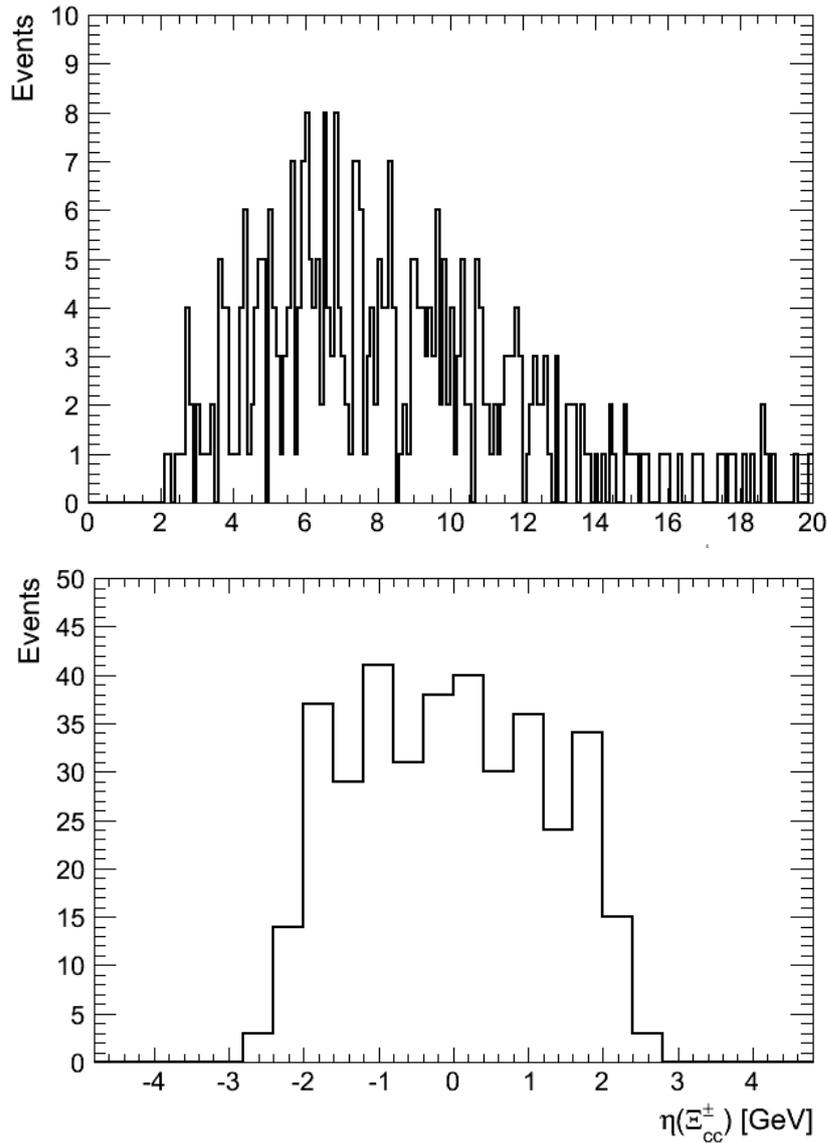


Рисунок 79 - Распределения числа событий (Events) по поперечному импульсу p_T (вверху) и псевдобыстроте η (внизу) Ξ_{cc}^{\pm} барионов, распадающихся на пять заряженных адронов с $p_T > 0.4$ ГэВ и $|\eta| < 2.5$.

Сечение такого процесса составляет $\approx (90 \text{ нб}) \cdot Br$, где Br – вероятность рассматриваемого распада. Для отбора таких событий в триггере первого уровня можно использовать мюоны, образующиеся в распадах двух дополнительных очарованных кварков.

На рисунке 80 показаны распределения по инвариантной массе двух мюонов с одинаковыми и разными зарядами в событиях с распадами Ξ_{cc}^{\pm} барионов на адроны.

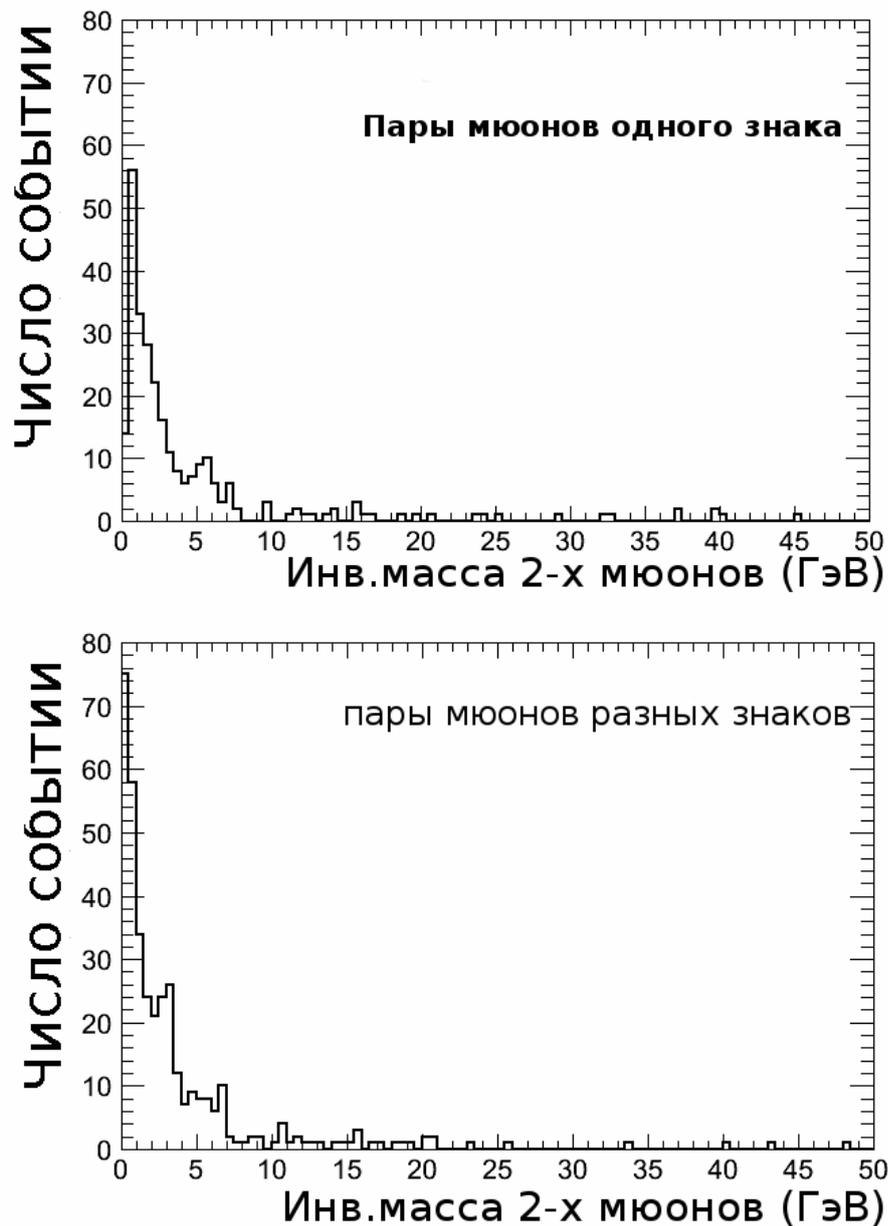


Рисунок 80 - Распределения по инвариантной массе двух мюонов с одинаковыми (вверху) и разными (внизу) зарядами в событиях с распадами Ξ_{cc}^{\pm} барионов на адроны.

Распределения содержат близкие количества событий, которые в основном сосредоточены в областях малых масс. Однако есть также значительное количество событий с массами более 10 ГэВ, особенно для мюонных пар с одинаковыми зарядами. Это позволяет использовать двух-мюонные триггерные отборы первого уровня с последующей селекцией мюонных пар по знаку и инвариантной массе для триггерного отбора событий рождения дважды-тяжёлых барионов.

Тестовый триггер высокого уровня для отбора событий с двумя мюонами с одинаковыми зарядами использовался при наборе событий в 2015 г.

Интеграция новых алгоритмов отбора событий в общую систему триггера высокого уровня супердетектора АТЛАС

Отбор в триггере В-физики опирается на поиск двухмюонной сигнатуры. Можно выделить следующие основные типы триггеров:

- Димюонные триггеры, отбирающие события с парой противоположно заряженных мюонов, исходящих из общей вершины, в узких окнах инвариантной массы, соответствующих массам J/ψ , $B^0_{(s)}$, Y мезонов.
- Триггеры распадов $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$? производящие полную реконструкцию конечного состояния ряда эксклюзивных распадов, таких как $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- K^+$, $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- K^{*0}$, $B^0_s \rightarrow \mu^+ \mu^- \phi$ и $\Lambda^0_b \rightarrow \mu^+ \mu^- \Lambda^0$. с использованием одного или двух дополнительных адронных треков, реконструированных внутренним детектором.
- Триггеры типа «мюон+трек», которые отбирают кандидаты $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$, строя их из одного мюона и второго трека, который может быть не идентифицирован как мюон. В связи с высокими потоками событий такие триггеры используются только с высокими коэффициентами деления частоты как вспомогательные для измерения эффективности димюонных триггеров.
- Трёхмюонные триггеры, требующие идентификации трёх мюонов в триггере первого уровня. Хотя бы одна пара противоположно заряженных мюонов при этом должна фитироваться в общую вершину и иметь инвариантную массу, близкую к массе J/ψ , или Y мезонов.
- Триггеры редкого распада $\tau \rightarrow 3\mu$, использующие специализированные алгоритмы поиска мюонов в узком конусе. Три мюона должны обладать инвариантной массой, совместимой с массой τ -лептона.

При наборе данных в 2015 г. триггер В-физики успешно функционировал, и отбираемые им события использовались в физическом анализе данных, в частности, [5,6]. Состав триггерного меню не претерпел принципиальных изменений по сравнению с сеансом Run 1. Основными триггерами для В-физики являются димюонные триггеры, отбирающие пары противоположно заряженных мюонов в различных окнах инвариантной массы, соответствующих распадам $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$, $B^0_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и $Y \rightarrow \mu^+ \mu^-$.

В процессе подготовки к сеансу набора данных в 2016 г. были произведены изменения в алгоритмах триггера $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ с целью сохранения всей информации об объектах, реконструированных триггером и прошедших отбор, в файлах xAOD для физического анализа. Так, теперь сохраняется информация о треках, восстановленных внутренним детектором и использованных при построении кандидата распада В-мезона.

Это обеспечивает возможность сопоставления и установления соответствия между кандидатами соответствующих распадов, найденных при оффлайн-анализе, и тех, что были построены вHLT и привели к срабатыванию триггера. Эта возможность необходима во многих физических анализах по измерению характеристик распадов b-адронов, а также при исследовании эффектов искажений, вносимых триггерным отбором.

При светимости БАК $4 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ потоки событий в триггере первого уровня L1_2MU4 стали превышать допустимые пределы, и для этих триггеров ввели использование деления частоты, а для основных димьюонных триггеров стал использоваться порог 6 ГэВ для одного мюона и 4 ГэВ для второго.

Полная статистика данных, набранная с триггерами mu6_mu4, соответствует интегральной светимости $3,2 \text{ фб}^{-1}$, тогда как эффективная статистика триггеров 2mu4 с учётом деления частоты составляет $2,7 \text{ фб}^{-1}$

В настоящее время ведётся окончательное тестирование разработанных алгоритмов с точки зрения их быстродействия (скорости работы).

8.6 Модернизация алгоритма поиска ТБХ в СПО по результатам моделирования

К настоящему времени произведена обработка 100% реальных данных, набранных в 2015 г. (около 10 млн. событий), и второй версии смоделированных событий сигнала и фона, MC15b.

Сравнение результатов моделирования событий сигнала от ТБХ при энергиях 8 и 13 ТэВ, а также анализ кинематических распределений для фона показывает, что такие характеристики как распределения лептонов по поперечному импульсу p_T , псевдобыстроте, инвариантной массе пары, азимутальному и полярному углу между ними практически не зависят от начальной энергии пучка. Аналогичная ситуация имеет место для p_T -спектров адронных струй. Однако есть тенденция к небольшому увеличению зазора по быстроте и инвариантной массе наиболее энергичных адронных струй в событии. Интересно также отметить, что с ростом энергии сталкивающихся протонов увеличивается множественность адронных струй. Что касается недостающей поперечной энергии (MET) и производных от нее величин, в частности, поперечной массы, то сравнивать их при 8 и 13 ТэВ не имеет большого смысла из-за того, что определение MET заметно поменялось с 2015 г, например, из-за перехода от расстояния между банчами БАК от 50 нс к 25 нс. Кроме того, лучше минимизировать использование этой переменной, поскольку она очень чувствительна к малейшим изменениям характеристик любой из подсистем установки АТЛАС. Кроме того, ее корреляции с остальными переменными могут быть весьма нетривиальными, как было показано нами на предыдущих этапах.

Поскольку при энергии 8 ТэВ были поставлены сильные ограничения сверху на сечение рождения ТБХ, которые фактически исключили область масс ниже 500 ГэВ, рабочей группой АТЛАС по бозону Хиггса было принято решение сосредоточиться на оптимизации поиска ТБХ в интервале масс 500-3000 ГэВ, а не от 200 до 1500 ГэВ, как было ранее. Как показали наши исследования, в таком случае напрашивается ужесточение ограничения снизу на поперечный импульс обоих лептонов, а также их инвариантную массу. Для этого группой ИТЭФ были проведены исследования корреляций всех кинематических переменных, по которым обычно делались отборы полезных событий, путем введения ограничения снизу на значения указанных переменных. Наиболее удобным типом представления таких корреляций в информационной среде ROOT являются т.н. «профильные гистограммы», которые показывают зависимость среднего значения одной переменной от неусредненного значения другой переменной. Их преимуществом является возможность одновременного визуального анализа сразу

нескольких зависимостей (например, для сигнала с разной массой и нескольких фонов) на одном рисунке, тогда как в случае двумерных гистограмм, несмотря на их другие очевидные преимущества, такой анализ проделать очень трудно. Изначально среда анализа рабочих групп АТЛАС для изучения СБХ и поиска ТБХ не позволяла работать с профильными гистограммами, поэтому нами была успешно проведена большая работа по ее модернизации. На рисунке 81 для примера показана зависимость среднего значения поперечной массы m_T от инвариантной массы лептонов m_{ll} .

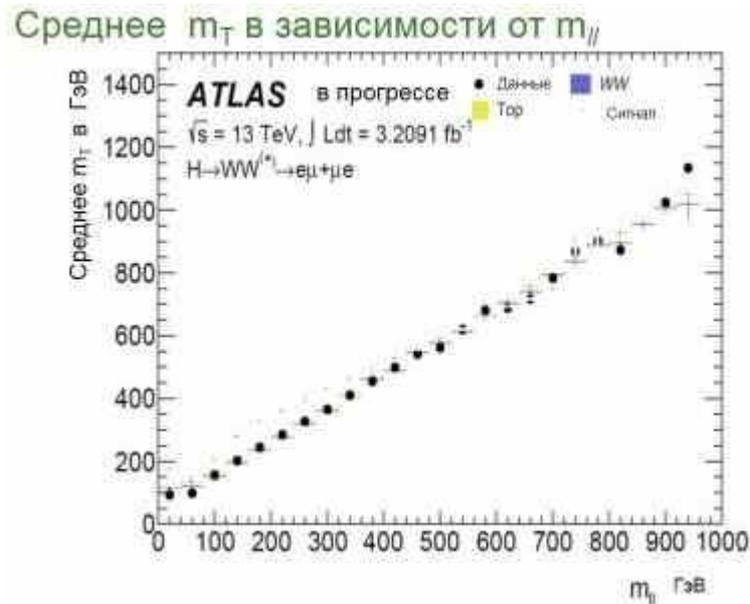


Рисунок 81 - Зависимость среднего значения поперечной массы m_T от инвариантной массы двух лептонов m_{ll} после отбора событий с двумя жесткими изолированными лептонами в сигнальной кинематической области. Показаны как реальные данные, так и результаты MC-моделирования, для сигнала показаны расчеты при массе ТБХ 750 ГэВ.

Видно, что указанные переменные на 100% коррелированы и имеются некоторые отличия в распределении для сигнала и фонов. Корреляции между импульсами лептонов и m_T тоже близки к 100%. Таким образом, ужесточение ограничений снизу на указанные переменные выглядит очень естественным, если мы хотим ограничиться поисками ТБХ при больших массах, чем это делалось нами ранее при анализе данных с энергией 8 ТэВ.

Итоговые критерии отбора приводятся в таблице 6.

Таблица 6 – Новые критерии отбора событий с ТБХ, основанные на анализе смоделированных данных при энергии 13 ТэВ [7].

Число струй/ Переменная	0	1	2
P_T лидирующего лептона	> 120 ГэВ	> 120 ГэВ	> 120 ГэВ
P_T второго лептона	> 30 ГэВ	> 40 ГэВ	> 40 ГэВ
Инвариантная масса лептонов	> 100 ГэВ	> 100 ГэВ	> 150 ГэВ
Недостающая поперечная энергия	> 40 ГэВ	> 40 ГэВ	-
Инвариантная масса двух струй	-	-	> 650 ГэВ

Более жесткие обрезания по p_T и инвариантной массе лептонов при увеличении числа адронных струй в событии связаны с необходимостью подавления фона от рождения топ-кварков, в котором характерные значения этих величин значительны.

На Рисунке 82 для примера показано распределение по поперечной массе m_T после отбора событий с двумя жесткими изолированными лептонами ($e\mu$ или μe) и двумя адронными струями в контрольной кинематической области, где измеряется фон от рождения топ-кварков, который является одним из основных.

Распределение по m_T в контрольной области

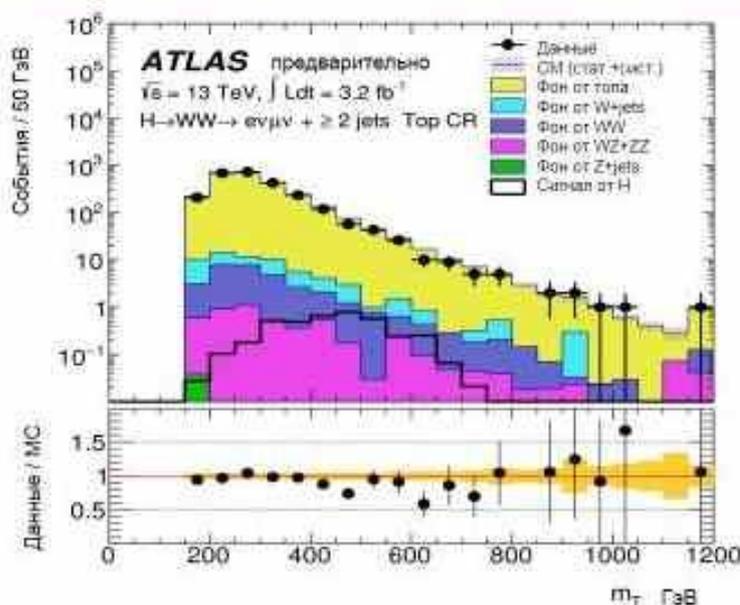


Рисунок 82 - Распределение по поперечной массе m_T [7] после отбора событий с двумя жесткими изолированными лептонами в контрольной кинематической области для измерения фона от топ-кварков (верхний рисунок). Показаны как реальные данные, так и результаты MC-моделирования, для сигнала показаны расчеты при массе ТБХ 750 ГэВ. Отношение данные/MC (нижний рисунок). Наблюдается хорошее согласие результатов эксперимента и его моделирования.

Согласие данных с результатами МС-моделирования говорит о том, что МС можно успешно использовать для пересчета данного фона в область сигнала. Аналогичная ситуация имеет место и с фоном от пар W -бозонов. Похожее распределение, но в кинематической области сигнала и после всех отборов, перечисленных в таблице 6, показано на рисунке 83. Для примера взят случай с одной адронной струей в конечном состоянии.

Распределение по m_T в области сигнала

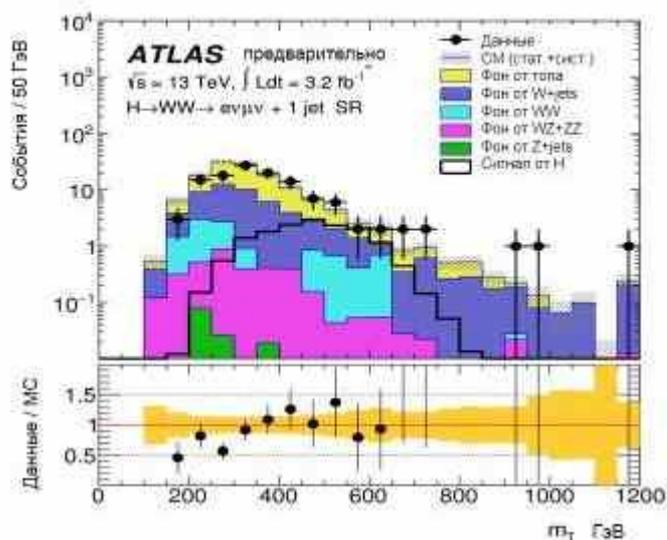


Рисунок 83 - Распределение по поперечной массе m_T [7] после отбора событий с двумя жесткими изолированными лептонами в сигнальной кинематической области (верхний рисунок). Показаны как реальные данные, так и результаты МС-моделирования, для сигнала показаны расчеты при массе ТБХ 750 ГэВ. Отношение данные/МС (нижний рисунок).

Видно, что экспериментальные данные неплохо согласуются с расчетами для фона, сигнала от бозона Хиггса не видно.

Выполненная модернизация алгоритма поиска ТБХ на основе моделированных событий позволит эффективно продолжить поисковые работы на реальных данных. Открытие ТБХ будет однозначно свидетельствовать о существовании новой физики. Если же этот бозон не будет найден в широкой области сканируемых масс, то будет существенно сужен диапазон возможных параметров многих теоретических моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сотрудники ИФВЭ совместно с соисполнителями из других Российских институтов, участвующих в эксперименте АТЛАС, на третьем этапе соглашения успешно выполнили следующие работы.

По камерам новых малых колёс АТЛАС:

- сборка и испытания лабораторных образцов ТЗК;
- изготовление лабораторных образцов МИК;
- отработка технологии сборки квадруплетов на основе МИК;
- отработка технологии интеграции квадруплетов МИК с ТЗК;
- изготовление рентгеновских сканнеров и проведение пуско-наладочных работ.

Разработаны программы и методики проведения испытаний экспериментальных образцов, проводимых на этапе.

Изготовлены экспериментальные образцы мюонных камер ДТМ с проведением испытаний на герметичность и высоковольтную стабильность.

Разработана рабочая документация на варианты прототипа миникалориметра АТЛАС.

Проведено облучение образцов сцинтиллятора для горячих зон в различных радиационных полях.

Выполнена проверка работы электронных модулей ЦКСК, включённых в общую систему сбора информации адронного калориметра.

Для модулей новой электроники ЖАК разработаны предварительные формирователи электронных сигналов ЖАК и схема подключения цифрового управляющего триггерного модуля к каналу считывания торцевого калориметра.

Выполнены следующие работы по модернизации специального программного обеспечения:

- разработка программного обеспечения для прецизионного «офф-лайн» детектирования спорадических шумовых всплесков в каналах ЖАК;
- тестирование рабочей версии СПО для РС на реальных РС, заключительная проверка методики управления РС, систем сбора и хранения информации, анализа и мониторинга данных;
- оптимизация алгоритмов идентификации электронов в условиях возросшей загрузки ТДПИ;
- анализ возможностей оптимизации алгоритмов трекинга во внутреннем детекторе с учетом данных, полученных на БАК после длительной остановки;

- разработка алгоритмов отбора событий распада дважды тяжелых (B_c) мезонов и тяжелых барионов;
- модернизация алгоритма поиска тяжёлого бозона Хиггса в СПО по результатам моделирования.

По результатам длительных работ по организации двухмюонных триггеров (см. п. 8.5 отчёта) С.М.Турчиным (МГУ) защищена кандидатская диссертация [8].

Результаты работ по ДТМ были представлены на международной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН в Дубне [9].

А.А.Солодковым на конференции в La Thuile, Aosta Valley, Италия были доложены результаты по изучению совместного рождения векторных бозонов [10], полученные с использованием системы распределённых вычислений GRID (см. отчёты по предшествующим этапам).

Зарегистрирована в режиме коммерческой тайны «ноу-хау» «Цельноблочная склейка прецизионных дрейфовых камер из дрейфовых трубок».

С использованием системы распределённых вычислений GRID (см. п. 13.1 отчёта 1 этапа и п. 10.4 отчёта 3 этапа) подготовлена журнальная публикация о сечениях рождения чармованных мезонов в pp-взаимодействиях на установке АТЛАС [11].

Работы этапа выполнены в полном соответствии с техническим заданием и планом графиком работ по четвёртому этапу соглашения, что позволит продолжать работы, запланированные на следующий этап. Эффект от использования разработок в установке АТЛАС может быть надёжно оценен после первых месяцев её работы на пучках модернизированного БАК. Рекомендуется продолжить работы в избранном направлении исследований и разработок в соответствии с планом графиком пятого этапа соглашения о субсидии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 ATLAS New Small Wheel Technical Design Report. CERN-LHCC-2013-006, ATLAS-TDR-20-2013, June, 2013.
- 2 <http://www.machsupport.com/software/mach3/>
- 3 <http://zaozmi.ru/doc/sps-doc.html>
- 4 <http://www.amptek.com/products/mini-x-ray-tube/>
- 5 The ATLAS collaboration 2015 Measurement of the differential non-prompt J/ψ production fraction in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions at the ATLAS experiment, ATLAS-CONF-2015-030.
- 6 The ATLAS collaboration 2015 B^\pm mass reconstruction in $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ decay at ATLAS at 13 TeV pp collisions at the LHC, ATLAS-CONF-2015-064.
- 7 ATLAS Collaboration, Search for a high-mass Higgs boson decaying to a pair of W bosons in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2016-021, April 2016.
- 8 С.М.Турчихин, Распады B_c^+ мезона и поиск редкого распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ в эксперименте АТЛАС, Диссертация на соискание степени кандидата физ.-мат. наук, Москва, 2016 г.
- 9 Н.И.Божко, А.А.Борисов, А.С.Кожин, Б.В.Леонтьев, Р.М.Фахрутдинов, Прецизионная дрейфовая трубка диаметром 15 мм в лавсановом корпусе, презентация на сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», 12-15 апреля 2016 г., Дубна.
- 10 А.А.Solodkov, EWK Diboson Production at ATLAS, Report at the workshop Results and Perspectives in Particle Physics, March 5-12, 2016, La Thuile, Aosta Valley, Italy.
- 11 ATLAS Collaboration, Measurement of $D^{*\pm}$, D^\pm and D_s^\pm meson production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector, Nuclear Physics B907 (2016) 717–763.

г. Гатчина

Приложение 1
25 мая 2016 г.

АКТ изготовления
лабораторных образцов ТЗК

Соглашение с Минобрнауки России
от 20.10.2014 г. № 14.610.21.005

Комиссия в составе:

Председатель	руководителя лаб. адронной физики ОФВЭ	Федин О. Л.,
члены комиссии	с.н.с ведущий инженер инженер	Малеев В. П., Патричев С. К., Сулейманов А. Т.,

назначенная распоряжением по ОФВЭ ФГБУ «ПИЯФ» от 25 мая 2015 г. № 11303/3-00-759, 25 мая 2016 г. проверила факт изготовления однослойных лабораторных образцов ТЗК камер.

1. Комиссии предъявлено:

Два изготовленных лабораторных образца ТЗК, создаваемых в рамках работ по изготовлению новых малых колес (НМК) мюонного спектрометра эксперимента.

2. В результате проверки установлено:

Собранные лабораторные образцы ТЗК камер соответствует проектным требованиям и успешно прошли испытания на герметичность и высоковольтные испытания.

3. Вывод

Два собранных лабораторных образца ТЗК удовлетворяют требованиям, предъявляемым при проведения приёмочных испытаний лабораторных образцов ТЗК и пригодны для проведения дальнейших испытаний с регистрацией частиц.

Председатель



О. Л. Федин

члены комиссии



В. П. Малеев



С. К. Патричев



А. Т. Сулейманов.

Протокол
испытаний лабораторных образцов ТЗК

Соглашение с Минобрнауки России от 20.10.2014 г. № 14.610.21.005

№1

25 мая 2016 г.

1. Объект испытания: лабораторные образцы однослойных тонкозачерненных камер для передней части мюонного спектрометра эксперимента ATLAS в количестве 2 шт.
2. Цель испытания: проверка параметров объектов испытания на соответствие техническим требованиям по программе и методике испытаний тонкозачерненных камер.
3. Дата начала испытания: 18 апреля 2016 г.
4. Дата окончания испытания: 25 мая 2016 г.
5. Место проведения испытания: лаборатория адронной физики ОФВЭ ПИЯФ.
6. Средства проведения испытаний: стенд для высоковольтных испытаний тонкозачерненных камер, микрометр, поверочная линейка,
7. Результаты испытаний

Номер образца	Исследуемый параметр	Требования к параметру		Измеренное значение
		Номинальное значение	Предельное значение	
1	Измерение плоскостности ТЗК камеры в 120 точках по ее поверхности с каждой стороны	5,9±0,1 мм	RMS<80 мкм Единичное максимальное отклонение <300 мкм	5,97±0,05 мм RMS=78 мкм Единичное максимальное отклонение 250 мкм
2				5,92±0,05 мм RMS=76 мкм Единичное максимальное отклонение 280 мкм
1	Долговременные (7 дней) высоковольтные испытания ТЗК камеры под напряжением 3,3 кВ	Отсутствие в течении периода испытаний пробоев и превышения темнового тока	Отсутствует	Высоковольтные пробои отсутствуют, темновой ток не превышает 60 нА.
2				Высоковольтные пробои отсутствуют, темновой ток не превышает 80 нА

8. Выводы

Объекты испытаний прошли испытания в соответствии с п. 4.1 и 4.2 программы и методики испытаний

Объекты испытаний соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к однослойным тонкоззорным камерам для передней части мюонного спектрометра установки АТЛАС.

Испытания проводили:

Зав. лабораторией адронной физики

научный сотрудник

инженер



О. Л. Федин

В. П. Малеев

А. Т. Сулейманов

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ОИЯИ)

АКТ

изготовления лабораторных образцов МИК

20 мая 2016 г.

г. Дубна

Комиссия в составе:

Председатель	нач. сектора ОИЯИ	Гуськов А.В.,
Члены комиссии	зам. учёного секретаря ЛЯП ОИЯИ	Госткин М.И.,
	Нач. сектора ОИЯИ	Гонгадзе А.Л.,

назначенная распоряжением по ЛЯП ОИЯИ от 6 мая 2015 г. №42, 20 мая 2016 г.

проверила факт изготовления лабораторных образцов микроячейных камер (МИК) в рамках работ по соглашению с Минобрнауки о ПНИЭР от 20.10.2014 № 14.610.21.0005.

1. Комиссии предъявлены:

Модули МИК в количестве 4 шт., изготовленные в рамках работ по созданию новых малых колёс (НМК) мюонного спектрометра АТЛАС.

2. В результате проверки установлено:

Модули МИК удовлетворяют требованиям точности сборки, предъявляемым проектной документацией.

3. Вывод:

Модули МИК полностью удовлетворяют техническим требованиям и пригодны к испытаниям.

Председатель комиссии

А.В.Гуськов

Члены комиссии

М.И.Госткин

А.Л.Гонгадзе

ПРОТОКОЛ**испытания экспериментальных образцов мюонных камер ДТМ детектора АТЛАС****№ 1 от 14 июня 2016 г.**

1. Объект испытания: экспериментальные образцы мюонных камер из дрейфовых трубок малого диаметра (ДТМ).

- Количество образцов – 2 шт.
- Каждая камера состоит из 48 дрейфовых трубок (ДТ) длиной 568 мм.
- ДТ склеены между собой в 3 слоя, в каждом слое по 16 шт.
- Расстояние между любыми соседними сигнальными проволоками – 15.5 мм.
- Корпуса камер выполнены из алюминиевого профиля.
- От механических повреждений камеры защищены экранами из прозрачного поликарбоната.

2. Цель испытания: проверка параметров объектов испытания на соответствие техническим требованиям, сформулированным в п. 4.2.2 - «Требования к техническим характеристикам ДТМ» Технического задания на выполнение ПНИЭР.

3. Программа и методика испытаний определены утвержденным Технологическим регламентом «Производство мюонных камер из дрейфовых трубок малого (15мм) диаметра» (регламент утвержден Главным инженером ФГБУ ГНЦ ИФВЭ 21.12.2015).

4. Дата начала испытания: 26 мая 2016 г.

5. Дата окончания испытания: 10 июня 2016 г.

6. Место проведения испытания: Участок больших трековых детекторов, ФГБУ ГНЦ ИФВЭ (зд.19), г. Протвино.

7. Средства проведения испытаний

Гелиевый течеискателем “Adixen ASM 310”, мультиметр CALTEK CM3212N, высоковольтный источник БПВ-5 (фирмы «Высоковольтные технологии», Россия), контролирующая станция АКТАКОМ АТЕ-9382, персональный компьютер.

8. Результаты испытания

Испытания показали соответствие параметров объектов испытаний техническим требованиям, а именно:

- течь по рабочему газу (Ar+7%CO₂) не превышает установленный предел $2 \cdot 10^{-8}$ л·бар/с;
- измеренные (индивидуально для каждой дрейфовой трубки) счетные характеристики показывают, что имеет место плато по напряжению от 250 до 300 В, шумы отсутствуют.

9. Замечания и рекомендации

Испытания показали существенное влияние герметичности электромагнитных экранов на шумовые характеристики камер. В связи с этим, для серийной партии камер, целесообразно минимизировать вырезы в экранах, предназначенные для подвода кабеля к разъемам на переходных платах регистрирующей электроники.

10. Выводы

- 10.1 Экспериментальные образцы мюонных камер ДТМ выдержали испытание.
- 10.2 Технические характеристики соответствуют предъявленным техническим требованиям.
- 10.3 Для серийной партии камер целесообразно минимизировать вырезы в экранах, предназначенные для подвода кабеля к разъемам на переходных платах регистрирующей электроники.

Испытание проводили

Ведущий научный сотрудник



А.С. Кожин

Ведущий инженер

Н.И. Божко

Федеральное Агентство Научных Организаций
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской Академии Наук

Базовое и расширенное руководство по использованию ПО для прецизионного «офф-лайн» детектирования спорадических шумовых всплесков в каналах ЖАК.

Пакет программ FindNoiseBurstCells предназначен для «офф-лайн» обработки данных узким кругом экспертов и поэтому руководство по нему не выкладывается на общий информационный ресурс АТЛАС.

Сборка и установка пакетов

Программы данного пакета написаны на языке C++ с широким использованием библиотек STL, Boost и Root. Исходные коды находятся на кластере lxplus в папке /afs/cern.ch/user/v/victorb/Development/FindNoiseBurstCells.

Для сборки и установки достаточно скопировать исходный код и собрать пакет стандартной командой make.

Запуск программ и аргументы

Для запуска программ не требуется выполнять предварительные настройки переменных окружения специальными скриптами.

Работа с пакетом в конечном итоге сводиться к запуску команды findNoiseBurstCells в командной строке на линуксовом кластере lxplus. В качестве входных параметров команда принимает следующий набор аргументов:

- -f имя текстового файла содержащего описание калибровочных сеансов для анализа;
- -t тип калибровочной компании, daily или weekly;
- -w установка «А» или «С» колеса/стороны ЖАК;
- -l задание индекса для слоя ЖАК;
- -b работать в тихой моде без вывода информации на экран;
- -d рисовать основные графики;
- -a выводить на экран дополнительный графики;
- -s сохранять результаты в текстовый файл, а графики в pdf файл;

- -v выводить на экран подробную информацию о ходе обработки;
- -h вывод на экран справки о программе.

Составил



В.С.Бобровников