

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

№ госрегистрации 114111740013

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

д-р физ.-мат. наук, проф.

 Н.Е. Тюрин

19.12.2015



ОТЧЕТ
О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАЗРАБОТКАХ

Проведение исследований в интересах оптимизации компонентов усовершенствованных детекторных устройств супердетектора АТЛАС, изготовление испытательных стендов и проведение испытаний лабораторных образцов, разработка методов контроля достижения требуемых характеристик компонентов усовершенствованных детекторных устройств

по теме:

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

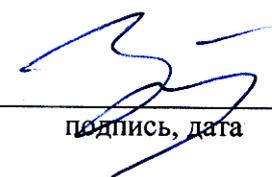
(промежуточный)

Этап 3

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

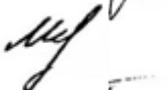


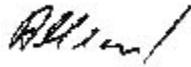
подпись, дата

А.М.Зайцев

Протвино, 2015

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>раздел 1, подразделы 1.1, 2.1</p>
<p>Инж.-конструктор</p>		<p>В.П.Малеев ФГБУ ПИЯФ</p>	<p>подраздел 2.1</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</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>Ст. инженер</p>		<p>А.П.Чеплаков ОИЯИ</p>	<p>подраздел 2.2</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>Г.А.Шелков ОИЯИ</p>	<p>подраздел 2.2</p>
<p>Ст. инженер</p>		<p>А.Л.Гонгадзе ОИЯИ</p>	<p>подраздел 2.2</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>Е.А. Ладыгин ОИЯИ</p>	<p>подраздел 8.1</p>
<p>Руководитель группы канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>С.П.Денисов ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>раздел 4, Приложение 1</p>
<p>Ст. преподаватель Начальник сектора, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>А.В.Козелов ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>раздел 4, Приложение 1</p>
<p>Ст. научн. сотрудник</p>		<p>А.С.Романюк НИЯУ МИФИ</p>	<p>подраздел 2.3</p>
<p>Ст. преподаватель Начальник сектора, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник</p>		<p>С.Ю.Смирнов НИЯУ МИФИ</p>	<p>подраздел 2.3</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</p>
<p>Мл. научн. сотрудник Гл. научн. сотрудник</p>		<p>А.С.Кожин ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>раздел 3</p>
<p>Д-р физ.-мат наук, профессор</p>		<p>И.С.Плотников ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>раздел 3</p>
<p>Д-р физ.-мат наук, профессор</p>		<p>В.И.Рыкалин ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>	<p>подраздел 2.4</p>

Ст. научн. сотрудник канд. физ.-мат. наук.		А.Н.Карюхин ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	подраздел 2.4
Глав. Научн. сотрудник, д-р физ.-мат наук, профессор		В.А.Сенько ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	подраздел 7.1
Ст. научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук.		Е.А.Старченко ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	подраздел 7.1
Нач. сектора, канд. физ.-мат. наук.		А.Г.Мягков ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	подраздел 10.7
Научн. сотрудник		О.В.Соловьянов ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	подраздел 7.1
Ст. научн. сотрудник канд. физ.-мат. наук.		В.И.Николаенко ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	подраздел 10.7
Вед. научн. сотрудник, д-р физ.-мат. наук, профессор		Л.Н.Смирнова МГУ	подраздел 10.3
Ст. научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук.		С.Ю.Сивоклоков МГУ	подраздел 10.3
Нач. сектора, канд. физ.-мат. наук.		А.В.Багуля ФГБУ ФИАН	раздел 6
Вед. научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник.		В.О.Тихомиров ФГБУ ФИАН	подраздел 10.6
Зам. директора института, д-р физ.- мат. наук, профессор		Ю.А.Тихонов БИЯФ СО РАН	подразделы 10.1, 10.2
Ст. научн. сотрудник		А.Л.Масленников БИЯФ СО РАН	подразделы 10.1, 10.2
Ст. научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук.		И.И.Цукерман ФГБУ ИТЭФ	подраздел 10.8
Нормоконтролёр		Е.Е.Савина ФГБУ ГНЦ ИФВЭ	весь отчёт

РЕФЕРАТ

Отчет 99 стр., 51 рис., 4 таблицы, 11 источников, 3 приложения.

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.

Разработана технология сборки тонкоззорных камер для новых малых колёс мюонного спектрометра, изготовлены стенды для проверки тонкоззорных камер, микроячеистых камер, стенд контроля камер на основе рентгеновского сканера и стенд для испытаний сцинтилляционных счётчиков для горячих зон.

Разработана технология сборки мюонных камер из дрейфовых трубок малого диаметра, предназначенных для размещения в опорах АТЛАС.

Разработана и согласована с другими участниками работ по миникалориметру эскизная документация на варианты прототипа этого детектора.

Разработаны программы и методики проведения испытаний лабораторных образцов детекторов и их компонентов, проводимых на третьем этапе проекта.

Выполнены измерения оптических свойств - прозрачности и световыходов лабораторных образцов новых сцинтилляторов для горячих зон установки АТЛАС.

Продолжены работы по цезиевой системе калибровки сцинтилляционного калориметра, в частности, разработаны принципиальных схем и разводка печатных плат модулей контроля давления в системе и датчиков движения источника, выполнена

настройка и испытания модулей управления помпами и клапанами, разработаны и изготовлены специальные печатные платы для проведения радиационных испытаний компонентов электроники.

В ходе работ по жидкоаргоновому калориметру изготовлен стенд проверки электроники ЖАК на базе корзины АТСА стандарта, изготовлена и испытана партия лабораторных образцов оптических кабелей для ЖАК.

Выполнены следующие работы по модернизации специального программного обеспечения:

- разработка программного обеспечения для непрерывного мониторинга в режиме «онлайн» времени прихода сигналов в каналах ЖАК;
- разработка программного обеспечения для быстрого детектирования каналов ЖАК с «нестандартной» формой импульса;
- отладка программ контроля на базе прототипа РС с использованием реальных данных измерений и подготовка рабочей версии программ для первых образцов РС;
- развитие пользовательского интерфейса управления программами информационной системы АГИС в условиях высоких нагрузок.
- разработка алгоритма идентификации электронов для ТДПИ при повышенной светимости БАК;
- оптимизация алгоритмов трекинга во внутреннем детекторе с учетом изменяющихся условий, таких как добавление нового слоя кремниевых детекторов, использование различных газовых смесей в различных модулях ТДПИ;
- оптимизация критериев выделения контрольных областей для поиска новой физики в процессах парного образования калибровочных бозонов при высоких светимостях;
- разработка алгоритма моделирования событий с рождением тяжелого бозона Нигтса;

СОДЕРЖАНИЕ

	Определения, обозначения и сокращения	8
	Введение	9
	Основная часть	11
1	ПНИЭР в обеспечение изготовления новых малых колёс.....	11
1.1	Разработка технологии сборки ТЗК.....	11
2	Работы по изготовлению стендов.....	19
2.1	Изготовление стенда проверки ТЗК.....	19
2.2	Изготовление стенда проверки МИК.....	22
2.3	Изготовление стенда контроля камер на основе РС	25
2.4	Изготовление стенда испытаний сцинтилляционных счетчиков для «горячих зон» СЦС.....	35
3	Разработка технологии сборки мюонных камер ДТМ из рабочих трубок.....	38
4	Работы по переднему миникалориметру.....	41
4.1	Разработка эскизной документации на варианты прототипа миникалориметра и согласование её с другими участниками работ по миникалориметру и с Сотрудничеством АТЛАС	41
5	Разработка программ и методик проведения испытаний лабораторных образцов, проводимых на этапе	43
6	Испытания оптических свойств, прозрачности и световыхода лабораторных образцов сцинтилляторов для горячих зон.....	44
7	Работы по цезиевой системе калибровки сцинтилляционного калориметра (ЦКСК)	50
7.1	Разработка принципиальных схем и разводка печатных плат модулей контроля давления в ЦКСК и датчиков движения источника в системе.....	50
7.2	Настройка и испытания плат управления помпами и клапанами электроники ЦКСК.....	51
7.3	Разработка и изготовление специальных печатных плат для проведения радиационных испытаний компонентов электроники ЦКСК.....	52
8	Работы по жидкоаргоновому калориметру	55
8.1	Изготовление стенда проверки электроники ЖАК на базе корзины АТСА стандарта	55
9	Работы по оптическим кабелям ЖАК	57
9.1	Изготовление и испытания партии лабораторных образцов оптических кабелей для ЖАК с распечаткой рефлектограмм по каждому волокну	60
10	Работы по модернизации специального программного обеспечения:.....	64
10.1	Разработка программного обеспечения для непрерывного мониторинга в режиме «он-лайн» времени прихода сигналов в каналах ЖАК.....	64
10.2	Разработка программного обеспечения для быстрого детектирования каналов ЖАК с«нестандартной» формой импульса	65

10.3	Отладка программ контроля на базе прототипа РС с использованием реальных данных измерений. Подготовка рабочей версии программ для первых образцов РС	66
10.4	Развитие пользовательского интерфейса управления программами информационной системы АГИС в условиях высоких загрузок.....	69
10.5	Разработка алгоритма идентификации электронов для ТДПИ при повышенной светимости БАК.....	71
10.6	Оптимизация алгоритмов трекинга во внутреннем детекторе с учетом изменяющихся условий, таких как добавление нового слоя кремниевых детекторов, использование различных газовых смесей в различных модулях ТДПИ.....	77
10.7	Оптимизация критериев выделения контрольных областей для поиска новой физики в процессах парного образования калибровочных бозонов при высоких светимостях.....	79
10.8	Моделирование событий с рождением ТБХ.....	84
	Заключение	87
	Список использованных источников	89
	Приложение 1. Эскизная документация на варианты прототипа минакалориметра	90
	Приложение 2. Протокол испытаний однородности светосбора образцов сцинтилляторов для горячих зон АТЛАС	97
	Приложение 3. Протокол испытания партии пробных оптических кабелей 4 типов для модернизированной электроники жидкоаргонового калориметра (ЖАК) детектора АТЛАС	98

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. ἄδρός «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
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», является Соглашение о предоставлении субсидии от 20 октября 2014 г. № 14.610.21.0005 и дополнение №1 к нему от 25.05.2015.

Тема соглашения: «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 запуска 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 – «Проведение исследований в интересах оптимизации компонентов усовершенствованных детекторных устройств супердетектора АТЛАС, изготовление испытательных стендов и проведение испытаний лабораторных образцов, разработка методов контроля достижения требуемых характеристик компонентов усовершенствованных детекторных устройств» 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

1.1 Разработка технологии сборки ТЗК

На данном этапе работы совместно с зарубежными институтами и университетами, участвующими в создании ТЗК камер, была разработана технология их сборки в ПИЯФ. Разработанная технология базируется на опыте сотрудничества АТЛАС, накопленном при сборке ТЗК камер старой конструкции, использовавшейся для их сборки в начале 2000-х годов. Основные требования, которые необходимо было в новой технологии учесть, связаны, во-первых, с точностью относительного расположения стрипов в каждой камере квадруплета ~ 40 мкм. В старой конструкции камер катодная плоскость не имела стрипов и данное требование отсутствовало. Во-вторых, из-за уменьшения газового промежутка с 28,0 мм до 21,4 мм, усилено требования на точность газового промежутка со 100 мкм до 50 мкм. В третьих, из-за ограниченности пространства, где будут размещаться ТЗК камеры, была уменьшена толщина стеклотекстолита (FR4), используемого для катодных плоскостей с 1,6 мм до 1,32 мм.

Конструкция НМК

Предварительная конструкция механической структуры (Новые Мюонные Колеса – НМК), на которую устанавливаются ТЗК камеры в детекторе установки АТЛАС, представлена в работе [1] и схематично показана на рисунке 1.

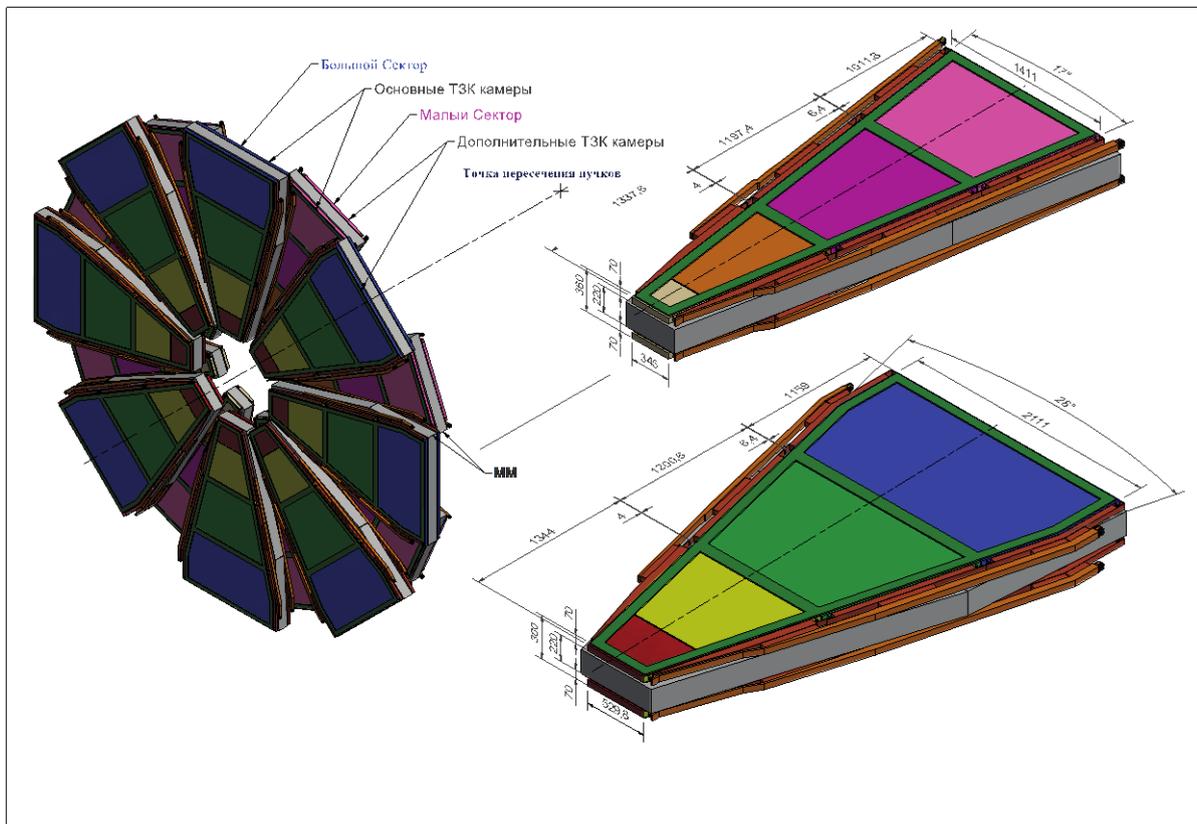


Рисунок 1 - Новые Мюонные Колеса (НМК) – структура на которую устанавливаются ТЗК камеры в детекторе установки АТЛАС.

Всего устанавливается две одинаковых структуры симметрично по отношению к точке пересечения протонных пучков. Каждая структура содержит 8 больших и 8 малых секторов оснащенных мюонными камерами. Большие и малые сектора расположены в два слоя со сдвигом по углу, так чтобы сектора немного перекрывали друг друга. Это необходимо для устранения слепых зон, которые образуются вследствие того, что по радиусу каждого сектора расположены системы считывания информации с камер, системы охлаждения, системы подачи высокого и низкого напряжения и другие системы, необходимые для работы камер. Каждый сектор содержит три слоя камер. Во внешних слоях расположены ТЗК камеры, между которыми располагаются микро ячеистые камеры (МИК). ТЗК камеры образуют таким образом три диска. Камеры, которые расположены в двух внешних дисках, называются подтверждающими (Confirmation). ТЗК камеры расположенные во внутреннем диске называются базовыми (Pivot). В базовых камерах размер площадок на катодной плоскости (пады), предназначенных для регистрации сигнала, меньше чем в подтверждающих камерах. Каждый сектор разделен на четыре типа ТЗК камер, которые отличаются размером (показаны на рисунке 1 разным цветом). Каждый тип ТЗК камер состоит из четырех однослойных камер и называется квадруплет. Каждая однослойная камера содержит анодные проволоки расположенные радиально и две

катодные плоскости. Одна из катодных плоскостей разделена на площадки (пады), размер которых меняются в зависимости от псевдобыстроты, а другая на полосы (стрипы). Электронные сигналы считываются с анодных проволок, падов и стрипов.

Подготовка к нанесению графита на катодные плоскости

Катодные плоскости изготовлены из листов металлизированного с двух сторон стеклотекстолита (типа FR4 класс 3), который используется для изготовления печатных плат. Для катодных плоскостей, на которых фрезеровкой формируются стрипы/пады, используется стеклотекстолит толщиной 1,3/1,1 мм. На стороне листа стеклотекстолита, на котором изготовлены стрипы и пады, путем прессования с использованием TEDLAR (поливинил флюорид) фиксируется дополнительный лист стеклотекстолита толщиной 200 мкм. Катодные плоскости изготавливаются промышленным способом и доставляются в ПИЯФ для сборки камер из Европейского Центра Ядерных исследований (ЦЕРН). В качестве примера на Рисунок 2 показан чертеж одной из катодных плоскостей с падами.

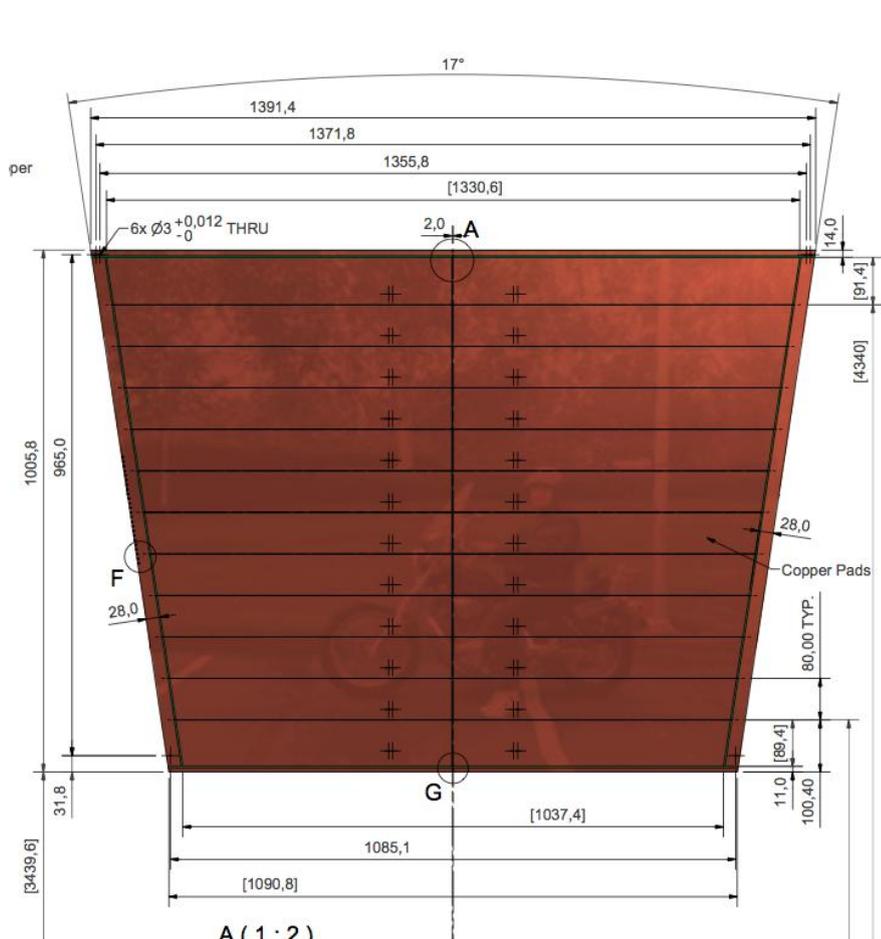


Рисунок 2 - Чертеж катодной плоскости с падами.

На данном этапе выполняется подготовка катодных плоскостей к напылению на них графита. Графит напыляется на сторону, к которой присоединён 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 затем очищается с помощью изопропилового спирта. Гранитный стол оснащен специальной вакуумной системой, которая позволяет прижать катодную плоскость к столу. Очистка катодной плоскости выполняется в перчатках, предназначенных для выполнения работ в чистых помещениях. Плоскостность катодной плоскости проверяется с помощью поверочной линейки и щупа толщиной 50 мкм. Места, на которые будет насыпаться 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, одна за другой удаляются временные рамки. После удаления каждой временной рамки место, на котором она была расположена, закрывается также самоклеющейся лентой.

Напыление графита на катодные плоскости

Напыление графита на катодные плоскости осуществляется с помощью специализированной машины, которая расположена в закрытом помещении, где поддерживается постоянная температура 25 ± 1 °С и влажность $25 \pm 1\%$. Два компонента графитовой смеси лак и графит, непрерывно перемешиваются в течение 24 часов. Качество полученной смеси проверяется путем напыления на небольшой тестовый лист стеклотекстолита. После напыления тестовый лист обдувается сухим воздухом для ускорения процесса сушки и затем измеряется сопротивление нанесенного графитового слоя. Сопротивление должно составлять 100 кОм/см^2 с точностью $\pm 10\%$. Затем производится напыление графита на катодную плоскость. После напыления катодная плоскость сохнет не менее 12 часов.

Полировка катодных плоскостей

Катодная плоскость размещается на столе с плоскостностью ~ 100 мкм. С катодной плоскости удаляется самоклеющаяся лента, защищавшая от напыления места, на которые приклеиваются поддержки для анодных проволок. После этого приступают к измерению поверхностного сопротивления. Величина сопротивления должна колебаться в пределах 90-110 кОм/см^2 . Если есть точки, где сопротивление выше, то в этих точках дополнительно полируют поверхность с помощью ручной шлифовальной машинки, пока не будет достигнуто номинальное значение сопротивления. Если сопротивление меньше 90 кОм/см^2 , но больше, чем 80 кОм/см^2 , и это наблюдается только в одной точке, то катодная плоскость может быть использована для дальнейших операций. Если сопротивление ниже 80 кОм/см^2 в более чем одной точке, то графитовое покрытие удаляется с помощью изопропилового спирта и процедура напыления повторяется. Окончательные результаты измерения поверхностного сопротивления заносятся в базу данных.

Катодная плоскость фиксируется на прецизионном гранитном столе, стороной на которую нанесен графит кверху, 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 с помощью пылесоса удаляется пыль. Эпоксидную смолу и отвердитель, используемые для приклейки рамок и поддержек анодных проволок, смешивают и откачивают в течении 5 минут. Клей наносится на рамки и 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 (см. Рисунок 3), из-под которой откачивается воздух.



Рисунок 3 - Прецизионный гранитный стол, закрытый вакуумной пленкой из-под которой откачивается воздух.

Таким способом обеспечивается прижим рамок и поддержек к катодной плоскости. Образец клея оставляется на столе, чтобы можно было проверить его затвердение. Через 10 часов проверяется затвердение образца клея и снимается вакуум под пленкой. Для катодной плоскости со стрипами далее необходимо запаять перемычки между соответствующими стрипами. Толщина рамки приклеенной к катоду измеряется в 19 точках по периметру катода. Толщина не должна изменяться более чем на 50 мкм.

Намотка анодных проволок

В качестве анодной проволоки используется золоченая проволока из вольфрама диаметром 50 мкм. Две катодные плоскости помещаются на специализированный

вращающий стол и прижимаются к столу с помощью вакуумной системы. Для намотки используется специально разработанная машина, которая обеспечивает натяжение проволоки 400 грамм. Намотка происходит в течении 8÷12 часов. После намотки анодные проволоки припаиваются с помощью специального припоя и водорастворимого флюса и обрезаются. Для удаления 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. Производится визуальный осмотр всех проволок на предмет провисания, замыкания с катодом, изломов и других дефектов. Поврежденные проволоки заменяются.

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 проволоками помещается на прецизионный гранитный стол в специальном зажимном приспособлении. С помощью вакуума катод прижимается к столу. На группы анодных проволок распаиваются высоковольтные резисторы. Места распайки очищаются с помощью изопропилового спирта и сушатся с помощью воздуха под давлением. Измеряется сопротивление между входом высокого напряжения и площадкой, на которую припаяна группа проволок с противоположной стороны относительно входа высокого напряжения. Сопротивление должно быть $10 \text{ МОм} \pm 1\%$. Измеряется также сопротивление между соседними группами проволок, которое должно быть не менее 20 МОм. Распаянные участки покрываются защитным высоковольтным лаком. После этого на проволоки подается напряжение 2,9 кВ и только после того, как визуально убедились в отсутствии пробоев (искр) между проволоками, выполняются дальнейшие операции. На катодную плоскость с падами, зафиксированную на столе помещается с помощью направляющих штифтов вторая катодная плоскость со стрипами. Поверх второй катодной плоскости с помощью подъемного механизма опускается 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 и из-под резины удаляется рабочий газ, а плоскости разбираются. Выполняется визуальное обследование плоскостей и проволок на предмет высоковольтных пробоев. Места, в которых наблюдались пробои, 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 течение 12 часов. Затем удаляется вакуумная резина и верхняя плита. Один слой камеры по-прежнему остается прижатым к гранитному столу за счет вакуумного прижима. Теперь приступают к измерению плоскостности, которое выполняется в 19 точках по периметру камеры. Толщина одного слоя должна быть равна $5,95 \pm 0,05$ мм. После этого однослойная камера снимается с гранитного стола и устанавливается на специальной тележке.

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 углекислый 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. При большем падении давления, ищется причина и место утечки и повторяется операция проклейки в месте утечки газа.

Испытания однослойной камеры

Однослойная камера продувается не менее 12 часов рабочей газовой смесью. Затем на камеру подается напряжение 3,3 кВ, которое сохраняется в течении 7 дней. В течении этого времени не должно наблюдаться превышения тока и пробоев. После этого на камеру подается напряжение 2,9 кВ и измеряется темновой ток. Величина тока записывается в базу данных. После этого приступают к сканированию камеры с помощью рентгеновской трубки или радиоактивного источника. Это делается для измерения однородности коэффициента газового усиления в камере. Сканирование выполняется при напряжении 2,5 кВ.

Сборка квадруплета.

Данная операция выполняется в два этапа. Сначала собираются два дублета, а затем они склеиваются вместе. Каждый дублет собирается так, чтобы катодные плоскости с падами были снаружи, для того чтобы иметь симметричные структуры.

На первом шаге к одной из катодных плоскостей приклеивается сотовый материал, сделанный из картона (хоникомб). Для этой операции используется гранитный стол, на который устанавливается однослойная камера под вакуумным прижимом. На плоскость устанавливают штифты, на которые надевается рамка, расположенная по периметру камеры. Штифты обеспечивают позиционирование отдельных слоев камеры. Внутри рамки кладется хоникомб. С помощью линейки проверяется, что хоникомб лежит ниже рамки на 100 мкм. После проверки рамка и хоникомб удаляются. Поверхность однослойной камеры очищается

с помощью изопропилового спирта. На поверхность камеры с помощью валика наносится клей. После этого снова устанавливаются штифты, на которые надевается рамка и внутрь кладется лист хоникомба. Сверху лист хоникомба закрывается листом из пластика. Поверх этой конструкции устанавливается плита из алюминиевого хоникомба и все закрывается вакуумной резиной, из под которой откачивают воздух до достижения давления 50 мбар. Таким же образом собирается второй дублет. Один из дублетов помещается на гранитный стол и прижимается к нему вакуумным прижимом. Специальный кондуктор помещается на гранитный стол, впритык к направляющим штифтам. Штифты должны располагаться строго вертикально. Верхняя поверхность квадруплета очищается изопропиловым спиртом и далее повторяется процедура приклеивания рамки и хоникомба. После этого сверху устанавливается второй дублет, на который устанавливается алюминиевый хоникомб, к которому присасывается верхний дублет. Дублет, расположенный сверху, прижимается к направляющим штифтам с помощью пружин. Контакт латунных вставок в катодных платах к направляющим штифтам проверяется с помощью омметра. Сверху всей конструкции помещается алюминиевый хоникомб, совпадающий по размерам с камерой, у которого по периметру наклеена резина. Это даёт уверенность, что давление сверху будет равномерно распределяться по периметру камеры. Далее всё закрывается вакуумной резиной, из-под которой откачивают воздух до давления 20 мбар. Полимеризация клея происходит в течении 12 часов.

Контроль собранного квадруплета.

После склейки квадруплета удаляются вакуумная резина и алюминиевый хоникомб. Квадруплет остается на гранитном столе под вакуумным прижимом к нему. С помощью омметра проверяется контакт между штифтами и латунными вставками в катодных платах. Используя поверочную линейку и индикатор проверяется плоскостность квадруплета в 120 точках. По результатам измерения вычисляется среднеквадратическое отклонение, которое не должно превышать 80 мкм, при этом не должно быть ни одной точки с отклонением превышающим 300 мкм. Затем квадруплет переворачивается, прижимается к столу с помощью вакуумного прижима и измерения повторяются. После измерения плоскостности измеряется толщина квадруплета в 19 точках по его периметру. По результатам измерений вычисляется среднеквадратичное отклонение. Результат заносится в базу данных. На завершающем этапе с помощью микроскопа выполняются измерения пяти последних стрипов в каждой плоскости на длинной и короткой стороне трапеции. По результатам измерения вычисляется параллельность стрипов, которая должна быть не хуже 100 мкм.

Технологический регламент для изготовления ТЗК представлен в виде отдельного документа в комплекте отчетной документации третьего этапа соглашения.

2 Работы по изготовлению стендов

Процедуры поэтапного контроля при изготовлении и проверка работоспособности уже изготовленных детекторов АТЛАСа являются крайне важными для обеспечения их надёжной безаварийной работы в сеансах БАК. Во время сеанса доступ к детекторам для ремонта сильно затруднён либо, для некоторых, вообще невозможен. Стендовые испытания детекторов обеспечивают возможность их проверки в условиях максимально приближённых к реальной работе в установке АТЛАС.

2.1 Изготовление стенда испытаний ТЗК

Для проведения высоковольтных испытаний ТЗК камер разработан и создан испытательный стенд, который состоит из системы высоковольтного питания, стапеля для установки камер и вспомогательного оборудования (высоковольтные кабели и т.д.).

Высоковольтные испытания ТЗК камер выполняются после окончательной сборки квадруплета. Для проведения высоковольтных испытаний используется рабочая газовая смесь 55% CO₂+45% n-пентан и напряжение 3,3 кВ. Каждая ТЗК камера сохраняется под таким напряжением не менее 7 дней. За время проведения долговременного высоковольтного испытания не должно быть зарегистрировано ни одного высоковольтного пробоя.

ТЗК камера представляет собой модуль из четырёх плоскостей с независимыми газовыми объёмами и независимыми линиями подачи высокого напряжения. Высоковольтное тестирование собранных модулей подразумевает также измерение вольт-амперных характеристик каждой плоскости. Одновременно может испытываться несколько модулей. Планируемая загрузка высоковольтного стенда – до 6 модулей, при этом модули могут находиться на разных стадиях испытаний.

Структура системы высоковольтного питания (ВП) стенда высоковольтных испытаний ТЗК представлена на рисунке 4.

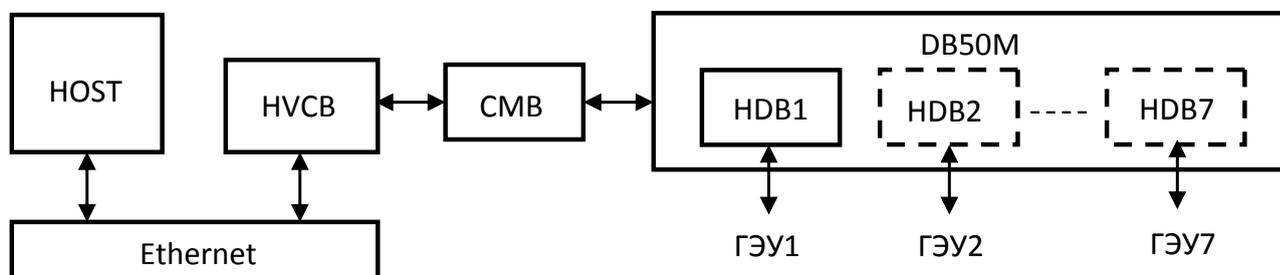


Рисунок 4 - Структура системы высоковольтного питания стенда высоковольтных испытаний ТЗК.

Система ВП состоит из трех основных частей: модуля распределения высоковольтного напряжения DB50M, блоков делителей-регуляторов HVD и модуля управления HVCSB. Принцип работы системы заключается в регулировании выходного напряжения первичного высоковольтного источника, входящего в состав модуля DB50M. Особенностью системы является измерение тока и напряжения для каждого канала высоковольтного питания. Каждый блок делителя регулятора HVD, обеспечивающий регулируемым высоковольтным напряжением группу ТЗК камер, состоит из субплат, каждая из которых обслуживает один слой ТЗК камеры.

Система ВП работает под управлением компьютера. Главный компьютер (HOST) использует сеть Ethernet для соединения с системным модулем управления HVCSB. Модуль HVCSB имеет 4 пары разъемов RJ-45 для подключения четырех магистралей контроля и мониторинга (СМВ). Магистраль СМВ реализована с помощью сетевого кабеля Cat5 с четырьмя парами проводов. Две пары используются для загрузки управляющих констант системы ВП и две пары – для контроля высоковольтного напряжения, приложенного к каждому слою ТЗК камеры и его тока. 16 модулей DB50M с блоками HVD (или до 112 слоев ТЗК камер) могут быть соединены к одной магистрали СМВ.

Модуль распределения высоковольтного питания DB50M лабораторного образца системы ВП питается от сети 220 В. Модуль имеет встроенный высоковольтный источник с выходным напряжением 4000 В и выходной мощностью 10 Вт. В модуле предусмотрен интерфейс для связи с модулем HVCSB через магистраль СМВ. Устанавливаемый пользователем переключатель адреса модуля дает возможность выбора одного из 16 возможных адресов. Модуль имеет 49 выходных каналов регулируемого высоковольтного напряжения, сгруппированных по 7 каналов. Блок делителя-регулятора HVD, установленный в модуль DB50M, обеспечивает 7 номинальных напряжений для однослойной мюонной камеры:

- напряжение 1: - 3760 В
- напряжение 2: - 2860 В
- напряжение 3: - 2410 В
- напряжение 4: - 2060 В
- напряжение 5: - 1620 В
- напряжение 6: - 920 В
- напряжение 7: - 500 В

Система ВП обеспечивает следующие характеристики:

- диапазон понижающего регулирования по выходам не менее 500 В;
- разрешение по регулированию напряжения не хуже 1 В;

- выходной ток не менее 40 мкА;
- диапазон измерения выходного напряжения не менее 4000 В;
- разрешение по измерению напряжения не хуже 1 В;
- диапазон измерения выходного тока не менее 40 мкА;
- разрешение по измерению тока не хуже 0,1 мкА.

Для управления системой ВП подготовлено программное обеспечение, которое позволяет устанавливать заданное напряжение по каждому каналу и записывать измеренное значение тока. На Рисунок 5 показана панель интерфейса пользователя для управления системой ВП.

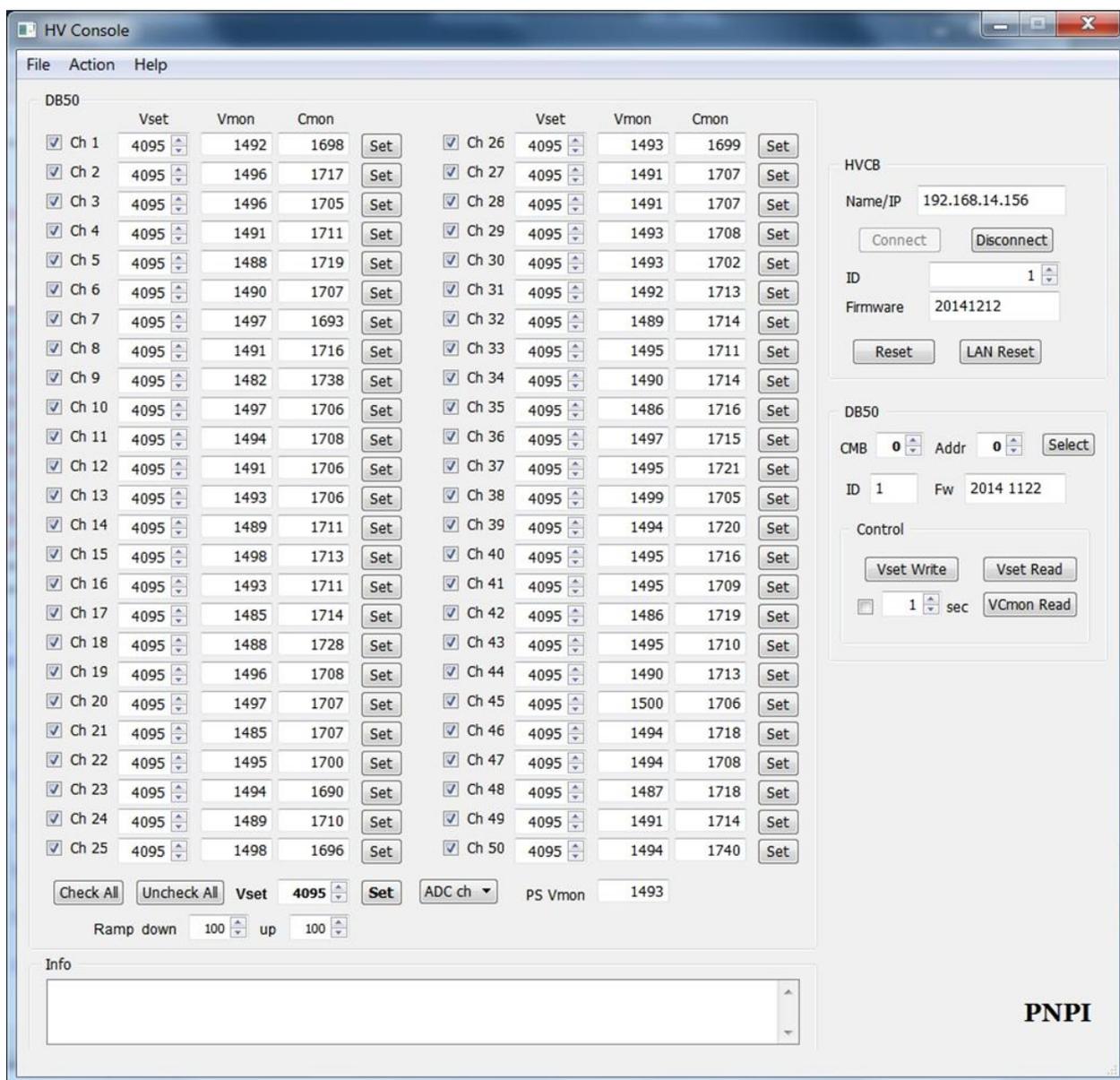


Рисунок 5 – Вид интерфейса пользователя для управления системой ВП.

На следующем этапе планируется запустить основное оборудование, необходимое для сборки камер и приступить к сборке и испытаниям первых образцов.

2.1 Изготовление стенда проверки МИК

Создание начатого на предыдущем этапе работ комплекса стендов для проверки микроячейных камер было завершено изготовлением стенда для проверки эффективности регистрации ими заряженных частиц с минимальной ионизацией – мюонов. Комплекс стендов также включает три подсистемы, предназначенные для тестирования газовой герметичности детектора, искрения и проверки качества изоляции, как между резистивными и анодными стрипами, так и между дрейфовыми и считывающими частями/панелями детектора.

По мере сборки камер МИК проводится паспортизация собранных квадруплетов, при которой исследуется равномерность газового усиления и эффективность регистрации заряженных частиц. Для этой цели был разработан и собран стенд проверки МИК на космических мюонах (см. рисунок 6).



Рисунок 6 - Стенд для проверки МИК с помощью космических мюонов

Основу стенда составляют изготовленные с использованием мониторирующих дрейфовых трубок (МДТ) две большие координатные камеры типа BMS эксперимента АТЛАС, собранные в Дубне, размером 2,16 м×3,2 м. Исследуемая МИК размещается между двумя МДТ камерами.

Расположение сигнальных проволочек в МДТ камерах было измерено на прецизионном рентгеновском сканере в ЦЕРН с точностью около 20 мкм, что обеспечивает высокую точность восстановления координат частицы, регистрируемой в

квадруплете. Конструкция стенда дает возможность варьировать расстояние между МДТ камерами от 40 см до 80 см. Стенд планируется дополнить триггерной системой на основе сцинтилляционного годоскопа.

В процессе сборки должна быть обеспечена герметичность детекторов. Оговорен предел на величину максимальной утечки газа из объема детектора, который соответствует падению давления примерно 0,6 мбар в час для квадруплета емкостью 50 л. Контроль утечек проводится на специальном стенде (см. рисунок 7) как с помощью дифференциального манометра (по времени, $\Delta P/\Delta t$), так и при заполнении камер рабочей смесью газа.

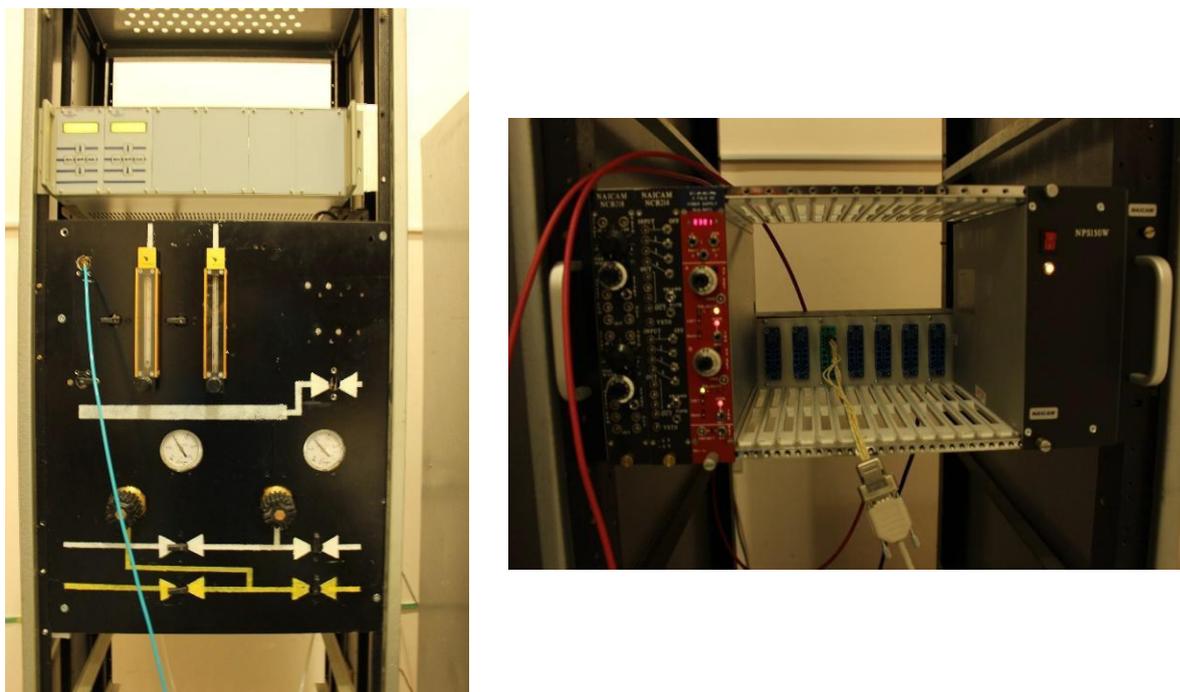


Рисунок 7 - Газовый стенд (слева) и стенд для проверки МИК на искрение (справа).

Для создания стенда были использованы регуляторы расхода газа компании Bronkhorst серии F-201CV с максимальной чувствительностью порядка $2 \cdot 10^{-9}$ бар л/с. Стенд также дает возможность смешивать компоненты рабочего газа в нужных пропорциях: 93% Ar и 7% CO₂.

Проверка на искрение проводится как при заполнении камер рабочим газом Ar:CO₂ (93:7) на номинальных напряжениях (550 В), так и на воздухе при напряжениях ~1000 В. Для контроля величины «теневого» тока (не более 1 нА/м² и 40 нА/м² соответственно) используется 2-х канальный высоковольтный источник питания CAEN N471 в корзине стандарта NIM NC150_5U. Отладка методики контроля проведена при замерах на малых микроячейных камерах НМК.

Измерение величин токов и сопротивлений для контроля качества изоляции между резистивными и анодными стрипами и между дрейфовыми и считывающими частями/панелями ведется при каждой сборке квадруплета с помощью малошумящего прецизионного мультиметра Keithley 6517B со встроенным источником питания ($\pm 1\text{kV}$).

Стенд обеспечивает надежный контроль качества изоляции при измерении как малых токов с высоким разрешением, так и больших сопротивлений пета- и экса-омного диапазонов.

2.3 Изготовление стенда контроля камер на основе РС

В результате активных обсуждений конструкции рентгеновского сканера с потребителями (изготовителями мюонных камер), было выработано две основных конструкции рентгеновского сканера. Один из вариантов представлен в отчете по предыдущему этапу и реализован в прототипе РС. Другой вариант появился из соображений легкости транспортировки в отдаленные регионы, где требуется перевозка морем, а также гибкости конструкции, когда речь идет о встраивании сканера в специализированное помещение с ограниченным объемом, как того требуют правила техники безопасности некоторых стран, а также наличие соответствующих площадей. При этом, реализованная в прототипе конструкция РС очень хорошо себя зарекомендовала, поэтому для производства мюонных детекторов будут использованы оба варианта, в зависимости от нужд стороны-производителя.

Для создания первого лабораторного образца РС, как в предварительных эскизах, использовался вариант конструкции с применением алюминиевых экструдированных профилей. Такая конструкция также является более удобной с точки зрения возможного размещения на раме сканера дополнительного оборудования. Согласно ранее разработанному техническому заданию лабораторный образец РС (рисунки 8 – 10) был изготовлен ЗАО «Сервотехника».

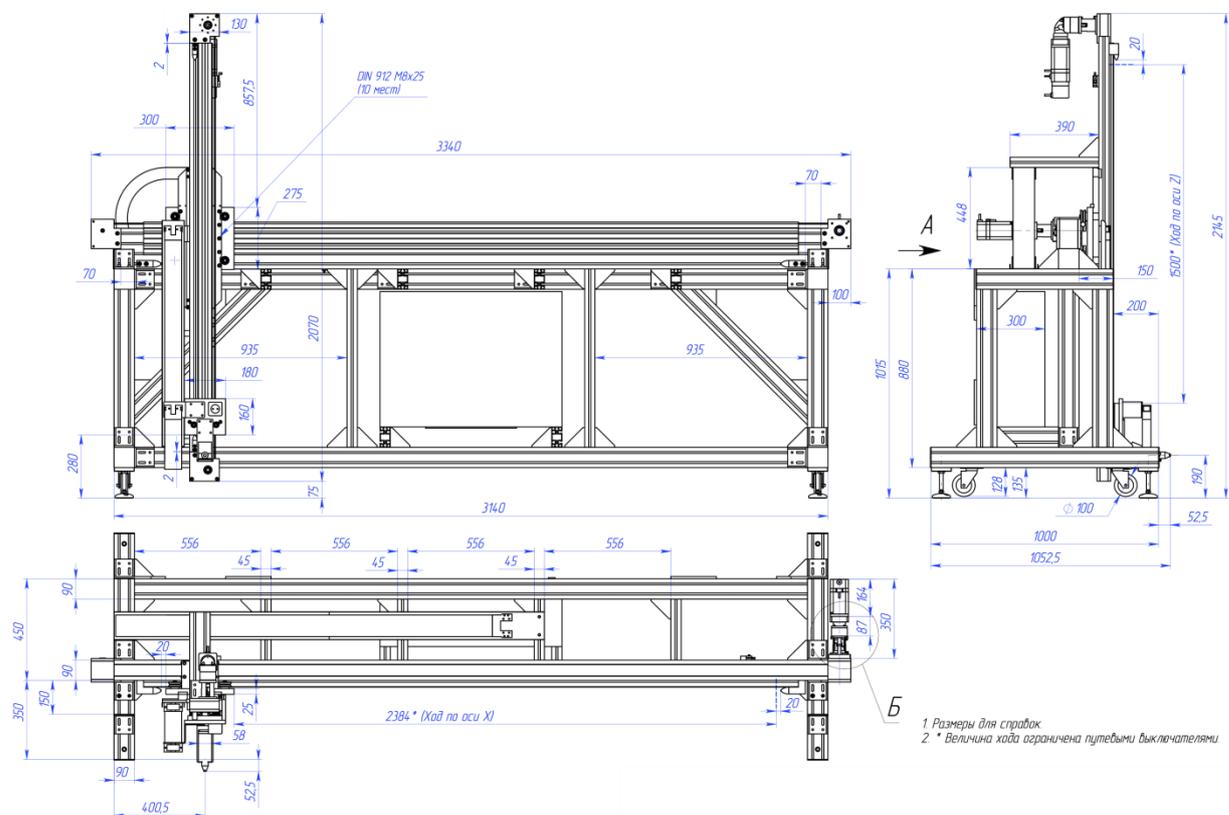


Рисунок 8 - Чертеж лабораторного образца РС в сборе

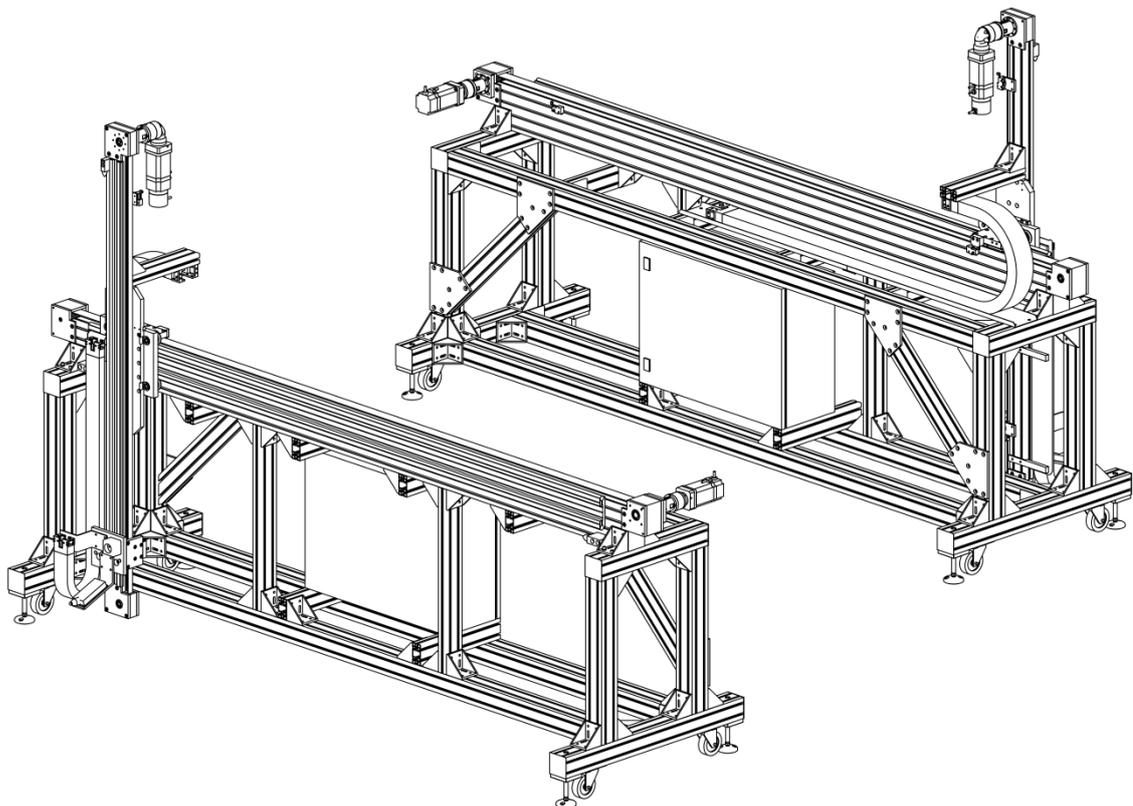


Рисунок 9 - Изометрическое изображение лабораторного образца РС на раме из алюминиевого экструдированного профиля.



Рисунок 10 - Фотография лабораторного образца РС на раме из алюминиевого экструзионного профиля.

Данный сканер работает на основе сервоприводов, которые обеспечивают плавность хода и низкий уровень шума. К недостаткам сервоприводов можно отнести сравнительную сложность систем управления и их программирования.

Прототип РС создан на основе шаговых двигателей, контроллер которых может соединиться с компьютером как через USB, так и через Ethernet и параллельный порт. Для удобства программирования и работы был выбран параллельный порт, драйвер для которого был успешно написан и встроен в общий интерфейс. Также были реализованы два режима сканирования – непрерывный, когда измерения происходят непосредственно во время перемещения, и пошаговый, когда для произведения измерений происходит остановка. Запись каждой координаты, соответствующей измерению, записывается в файл. Таким образом, прототип сканера теперь способен работать в полностью автоматическом режиме.

- Разработка программного обеспечения для РС

Для работы с прототипом рентгеновского сканера, был существенно улучшен программно-аппаратный комплекс, разрабатывавшийся на предыдущих этапах настоящей работы (рисунок 11). Комплекс разрабатывался с использованием среды LabVIEW [2].

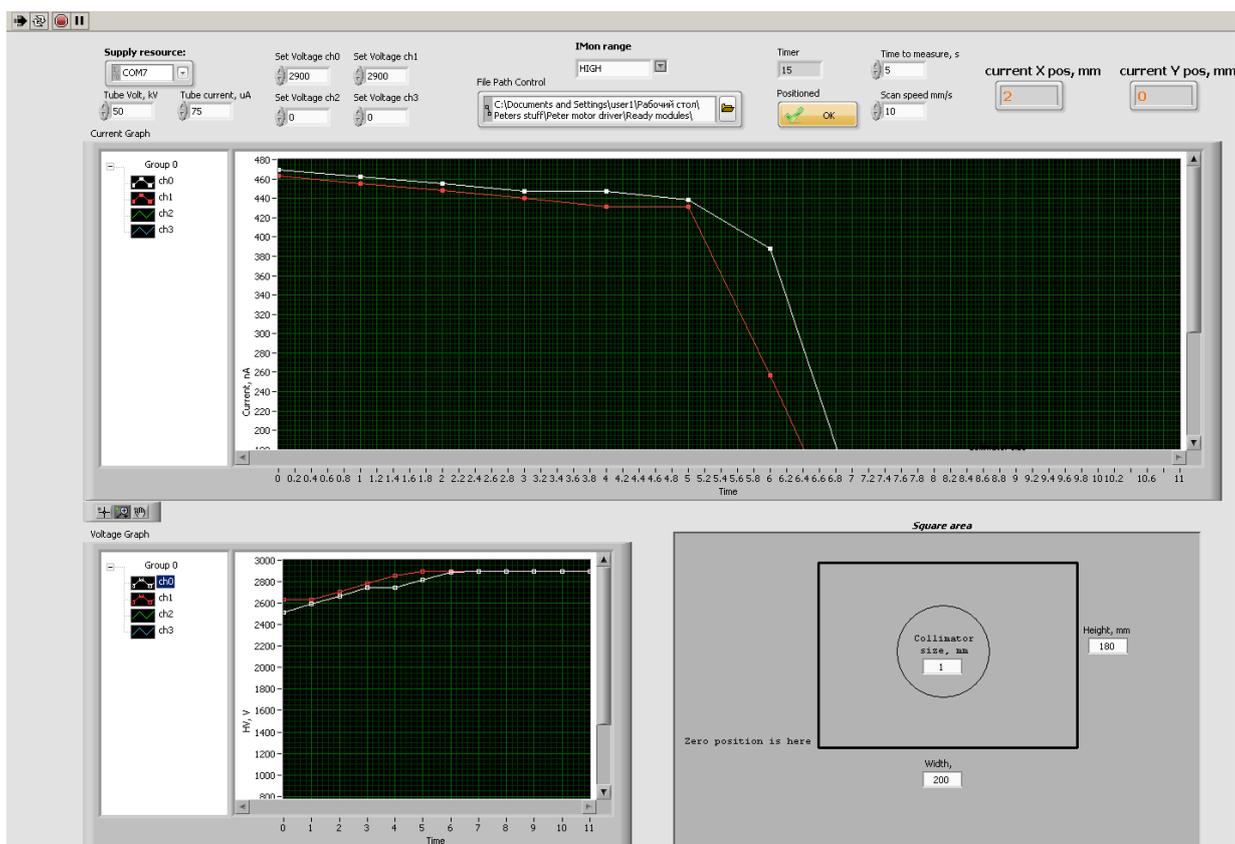


Рисунок 11 - Вид панели интерфейса пользователя программы по сбору данных и управлению высоковольтным блоком и рентгеновским сканером

- Исследование работы системы контроля качества на базе рентгеновского сканера

С целью подготовки дальнейшей работы с системой рентгеновского сканирования были поставлены следующие задачи:

- а) определение полного времени сканирования детекторов ТЗК и МИК;
- б) исследование точности позиционирования каретки.

Полное сканирование будет осуществляться при тестировании полноразмерных детекторов, которые будут использоваться для Малого Мюонного Колеса, поэтому важно определить время, которое потребуется для осуществления одного теста. Для управления движением каретки сканера использовалась программа Mach3 компании ArtSoft. Данная программа позволяет осуществлять сканирование по любой траектории, а также производить калибровку осей сканера.

Было выполнено сканирование по траектории «змейка» из левой нижней точки сканера в верхнюю правую (рисунок 12) так, чтобы с учетом размеров коллиматора покрыть всю площадь исследуемого образца.



Рисунок 12 - Траектория непрерывного сканирования.

Ниже представлены полученные данные для различных режимов сканирования и скоростей. На рисунке 12 начальная точка А соответствует координатам (0;0) в программе Mach3 и (3350мм; 5400мм) в координатах наклеенной на раму сканера линейки (рис.1.4). Каретка движется в точку Б, координаты которой в программе Mach3 (2215,125мм; 1440мм), а по линейке (1130мм; 3962мм).

Время полного непрерывного сканирования при скорости 9,3 см/сек составило 60 минут. Время полного непрерывного сканирования при скорости 1,86 см/сек составило 4 часа 50 минут.

Аналогично были проведены эксперименты для пошагового сканирования (рисунок 13).

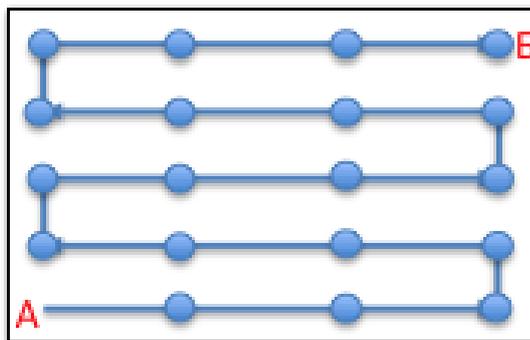


Рисунок 13 -Схема поточечного сканирования

Каретка движется из точки А с координатами (0; 0) в программе Mach3 и (3350мм; 5400мм) по линейке со скоростью 9,3 см/сек. шагами по 30 мм. и длительностью остановки – 1 сек. и приходит в точку Б с координатами (2190мм; 1440мм) в программе Mach3 и (1154мм; 3958мм) по линейке.

Время полного поточечного сканирования с шагом 30 мм и задержкой 1 сек при скорости 9,3 см/сек составило 6 часов. Таким образом, непрерывный режим сканирования дает существенный выигрыш по времени.

При определении времени сканирования были обнаружены неточности в позиционировании каретки. Соответственно, чтобы проверить точность позиционирования каретки при её перемещении на большие расстояния, была проведена серия тестов. Проходимые расстояния для горизонтальной оси Ох – около 222 см, для вертикальной оси Оу – около 144 см. Перемещение каретки измерялось с помощью линеек наклеенных вдоль движения каретки соответственно по горизонтали вертикали.

Как показали предварительные испытания прототипа сканера, позиционирование каретки при пошаговом режиме не дает желаемой точности в 1 мм после большого количества последовательных перемещений с небольшим шагом (30 мм), тогда как единовременное перемещение на аналогичное сумме всех шагов расстояние такую точность обеспечивает. Такие отклонения могут негативно сказаться на работе сканера в качестве системы дефектоскопии на производстве мюонных камер и, кроме того, не вписывается в технические требования к сканерам. Для решения этой проблемы – как в данном случае, так и с последующими конструкциями сканеров, была разработана схема испытаний с последовательными перемещениями каретки, на основании которых были проведены исследования.

Для устранения таких больших отклонений при исследовании позиционирования было принято решение увеличить электрический ток, подаваемый на шаговые двигатели и увеличить дробление шага. Ток увеличен по ОХ с 2,0 до 3,14 А, по ОУ с 4,28 до 4,86 А. Дробление соответственно с 400 до 1600 для обеих осей.

На данном этапе были достигнуты желательные результаты – точность позиционирования каретки не хуже 1 мм.

Все отклонения по перемещениям имели как систематический (т.е. постоянное увеличение фактической дистанции с каждым перемещением), так и хаотический характер. Хаотические отклонения могли быть связаны с люфтами, поэтому с помощью инженеров компании-производителя системы перемещения были выявлены недотянутые шкивы, которые могут ослабиться при транспортировке системы. Поэтому проверка этих систем будет включена в список необходимых мер диагностики сканирующей системы при установке её у производителя мюонных детекторов, т.к. разбалтывание шкивов неизбежно при транспортировке. Систематические отклонения устранены с помощью тщательной и многократной калибровки осей, после которой было вновь измерена точность позиционирования каретки сканера. Полученные результаты показаны на рисунках 14 и 15.

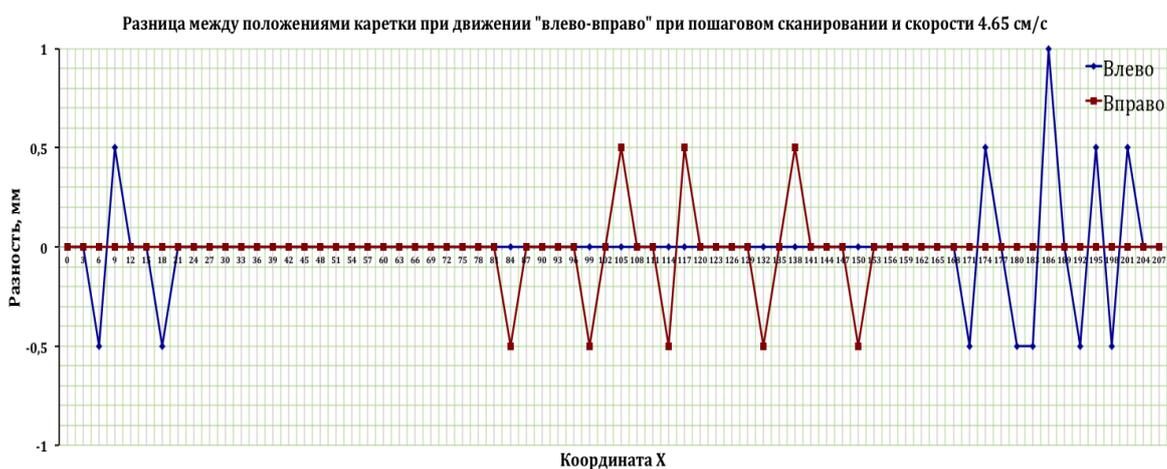


Рисунок 14 - Разница в положениях каретки для O_x при скорости 4,65 см/сек.

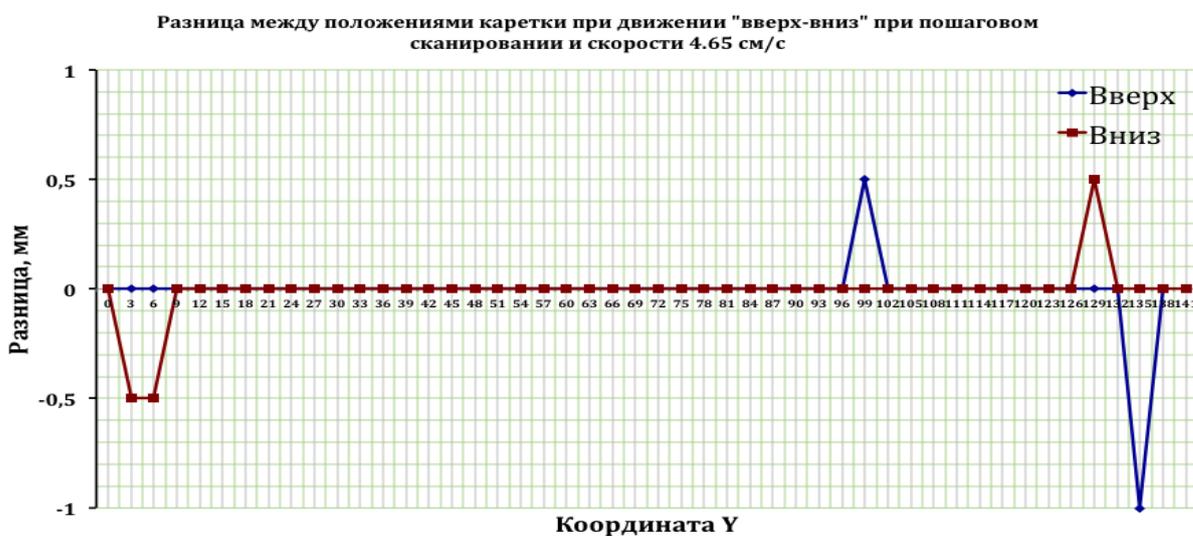


Рисунок 15 - Разница в положениях каретки для O_y при скорости 4,65 см/сек.

Максимальное отклонение после калибровки составило менее 1 мм для обеих осей.

Было проведено исследование работы РС при сканировании дублета ТЗК.

На предыдущих этапах выполнения настоящего проекта были показаны результаты с ручным сканированием. На настоящем этапе отработана и продемонстрирована автоматизированная система сканирования и сбора данных с прототипа ТЗК. Для отработки методики рентгеновского сканирования использовался прототип рентгеновского сканера, рентгеновская трубка Amptek Mini-x, Ag с круглым коллиматором, $d=30$ мм и щелевым коллиматором 30×1 мм; 50 кэВ / 75 мкА . В качестве источника высокого напряжения был взят Caen NIM HV 4ch supply N1471H. В качестве исследуемой камеры был взят дуплет ТЗК (20×12 см) с CO_2 в качестве рабочей смеси. Сбор данных осуществлялся при помощи усовершенствованного программно-аппаратного комплекса на базе LabVIEW и ПК.

На прототипе рентгеновского сканера были проведены эксперименты по автоматизированному сканированию имеющегося в НИЯУ МИФИ прототипа ТЗК – дублета размером 135×118 мм. Результаты общего сканирования образца в пошаговом режиме показаны на рисунке 16.

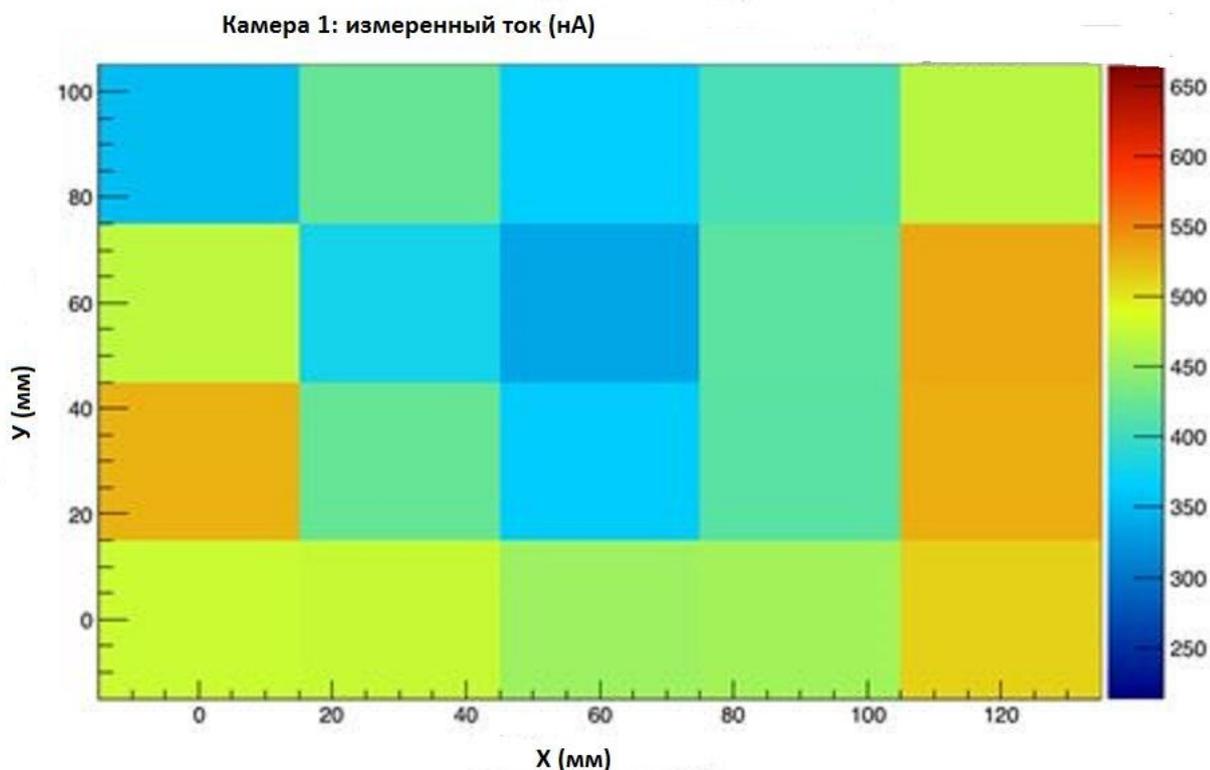


Рисунок 16 - Карта тока прототипа камеры sTGC размером 135×118 мм, полученная с помощью рентгеновского сканера. Параметры рентгеновского излучения – 50 кэВ , 75 мкА , круглый коллиматор $d=30$ мм, шаг – 30 мм, время сканирования – 30 сек, частота съема сигнала – 1 Гц . Рабочая смесь – CO_2 .

Прецизионное сканирование провололочек (по направлению вдоль стрипов) с шагом 0,1 мм позволяет определить расстояние между стрипами с точностью до величины шага. Результаты такого сканирования показаны на рисунке 17.

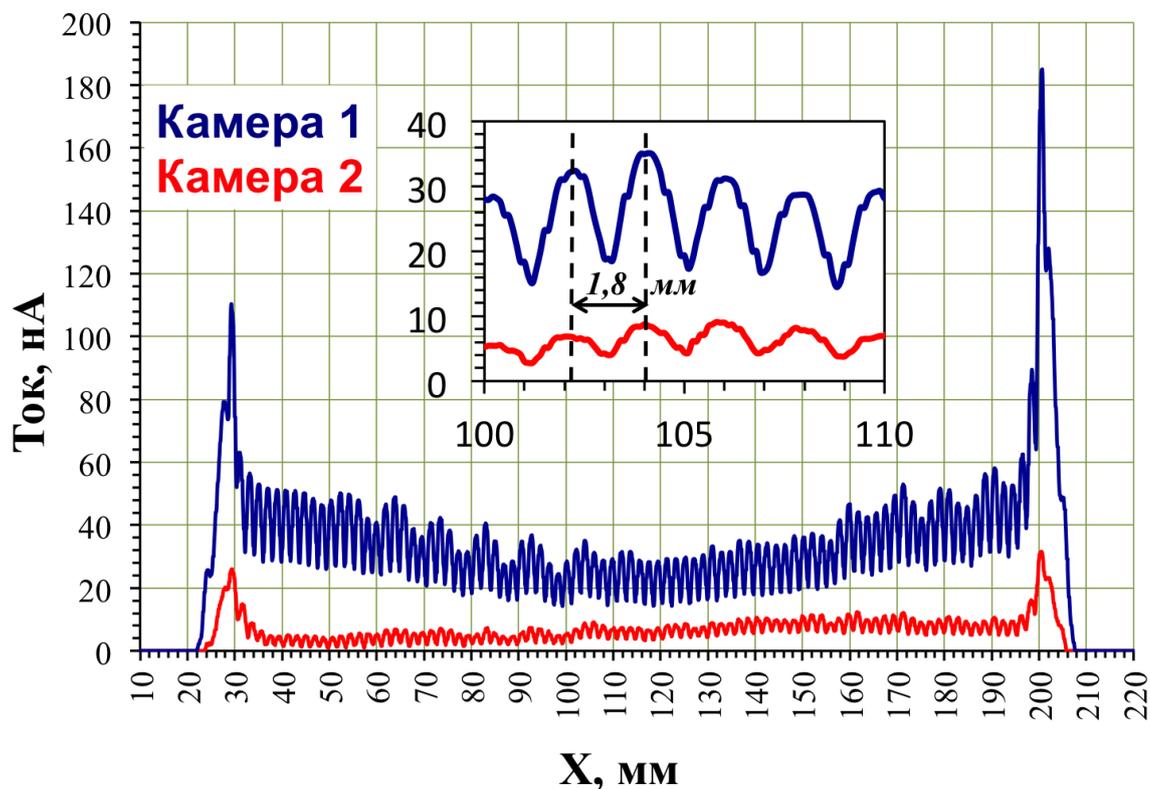


Рисунок 17 - Амплитуда тока при сканировании стрипов в непрерывном и пошаговом режимах для камеры 1. Непрерывный режим: коллиматор 1x30 мм, скорость сканирования 0,5 мм/с, частота измерения тока – 1 Гц. Пошаговый режим: коллиматор 1x30 мм, шаг сканирования 0,4 мм, 5 измерений в каждой точке усреднялись. Параметры рентгеновского излучения – 50 кэВ, 75 мкА, рабочая смесь – CO₂. На вставке-увеличенная часть той же зависимости.

Определенное по результатам измерения расстояние оказалось равным 1,8 мм, что отвечает конструкции камеры. Полученные при помощи РС результаты отличаются гораздо более высокой точностью, чем аналогичные результаты ручного сканирования, при этом они могут быть получены гораздо быстрее. Видно, что на имеющемся прототипе проблемными являются краевые области, что может быть связано с дефектами изготовления прототипов камер, а также распределением электрического поля на краях.

Исследуемые камеры имеют два типа стрипов: шириной 4 мм и 3 мм. Метод рентгеновского сканирования позволяет точно и однозначно идентифицировать ширину стрипа – с точностью до величины шага. Результаты сканирования показаны на рисунках 18 и 19.

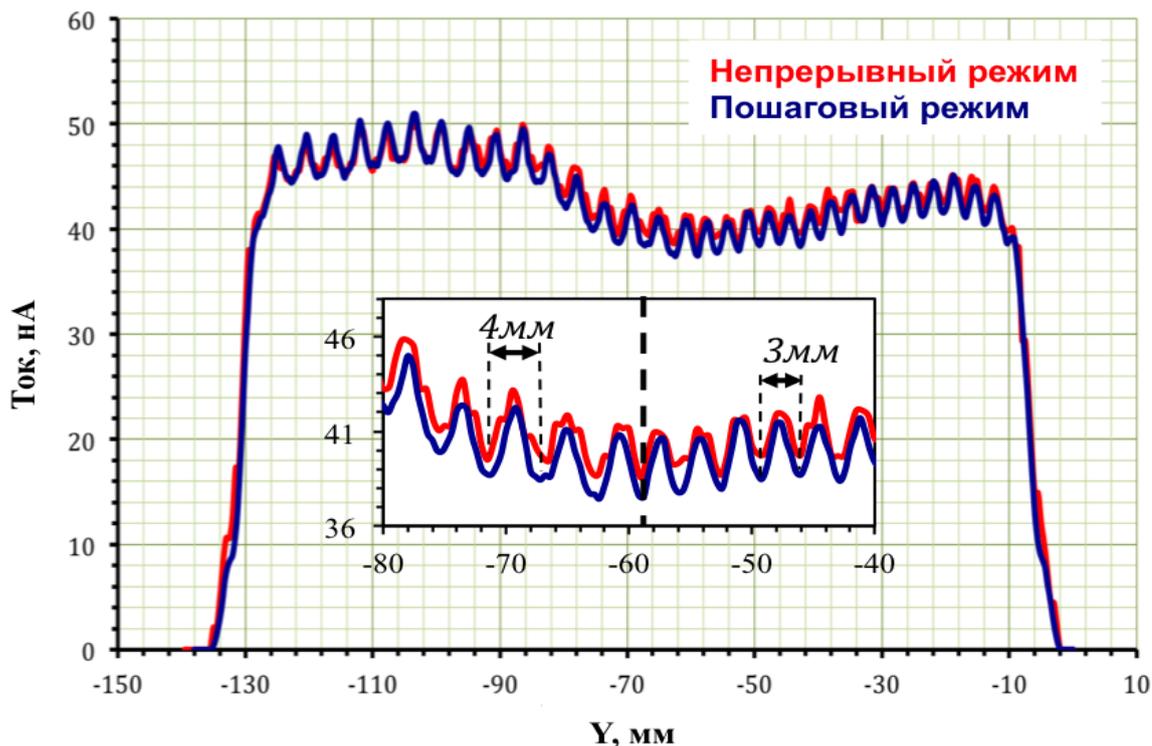


Рисунок 18 - Амплитуда тока при сканировании стрипов в непрерывном и пошаговом режимах для камеры 1. Непрерывный режим: коллиматор 1x30 мм, скорость сканирования 0,5 мм/с, частота измерения тока – 1 Гц. Пошаговый режим: коллиматор 1x30 мм, шаг сканирования 0,4 мм, 5 измерений в каждой точке усреднялись. Параметры рентгеновского излучения – 50 кэВ, 75 мкА, рабочая смесь – CO₂. На вставке-увеличенная часть той же зависимости.

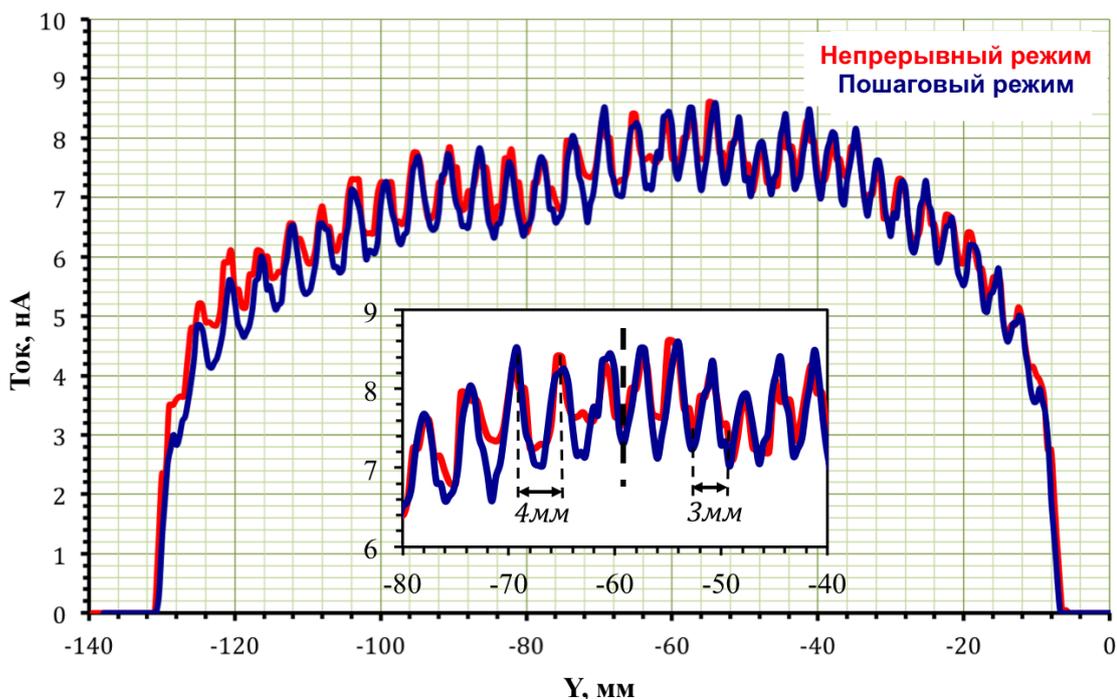


Рисунок 19 - Амплитуда тока при сканировании стрипов в непрерывном и пошаговом режимах для камеры 2. Непрерывный режим: коллиматор 1x30 мм, скорость сканирования 0,5 мм/с, частота измерения тока – 1 Гц. Пошаговый режим: коллиматор 1x30 мм, шаг сканирования 0,4 мм, 5 измерений в каждой точке усреднялись. Параметры рентгеновского излучения – 50 кэВ, 75 мкА, рабочая смесь – CO₂. На вставке-увеличенная часть той же зависимости.

Для непрерывного режима точность определяется расстоянием, проходимым рентгеновской трубкой за секунду, т.е. 0,5 мм в данном случае. Сканирование в пошаговом режиме является более точным, т.к. шаг сканирования составил 0,4 мм, и данные на каждом шаге усреднялись по 5 точек. Тем не менее, результаты, полученные с помощью обоих методов – непрерывного и пошагового – очень хорошо согласуются. Скорость сканирования 0,5 мм/с является достаточной для получения информации о стриповой структуре камеры.

Во время сканирования данные собирались с обеих камер дублета, поэтому аналогичные результаты представлены и для второй камеры, ток в цепи которой ввиду поглощения рентгеновских квантов существенно ниже, однако и здесь наблюдается совпадение результатов непрерывного и пошагового измерения, что говорит о пригодности метода для сканирования по меньшей мере двух камер sTGC одновременно.

Основные выводы:

- Автоматическое сканирование камер sTGC позволяет быстро собрать данные для построения карты токов, индуцируемых в камере sTGC рентгеновской трубкой
- Прецизионное сканирование с узким щелевым коллиматором позволяет исследовать положение, размер и дефекты стрипов, а также проволочек камер sTGC
- Непрерывный режим сканирования не уступает пошаговому по точности, однако является существенно более быстрым

2.4 Изготовление стенда испытаний сцинтилляционных счетчиков для «горячих зон» СЦС

Стенд испытаний сцинтиллятора для горячих зон предназначен для автоматизированного измерения таких свойств сцинтилляционных пластин как световыход, его однородность по площади и прозрачность к собственному излучению. Стенд изготовлен в соответствии с рабочим проектом, фото общего вида показано на рисунке 20

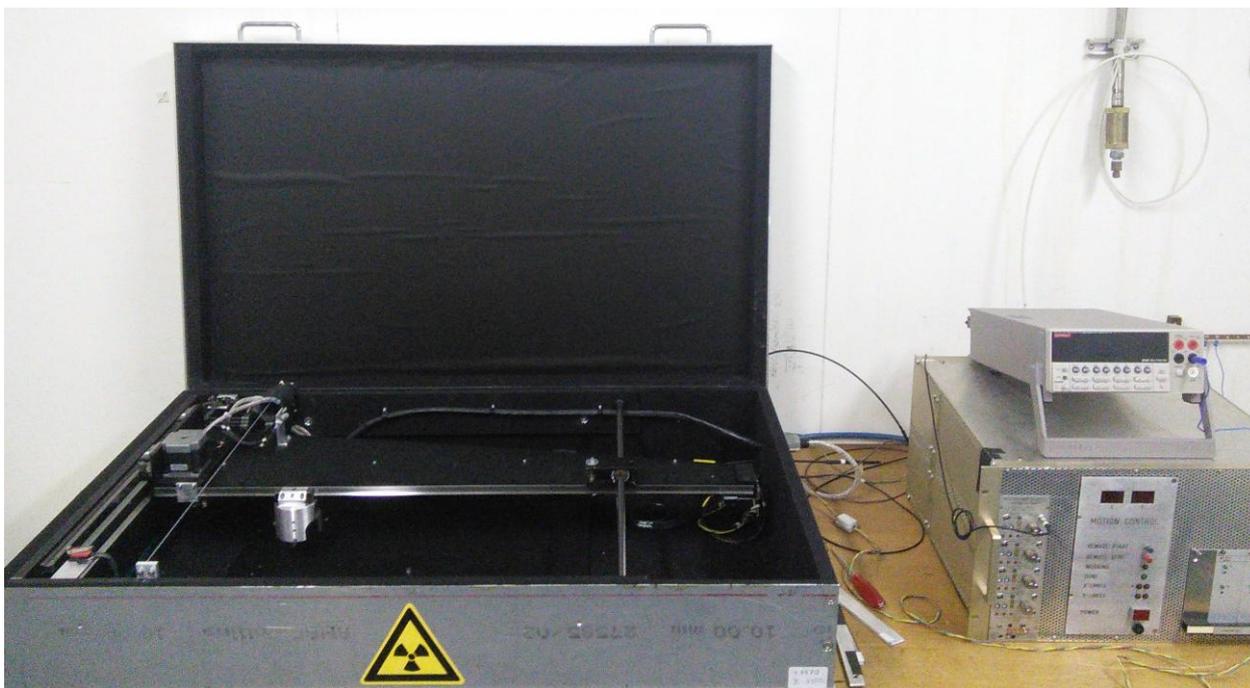


Рисунок 20 – Общий вид стенда для измерения световыхода и прозрачности сцинтилляционных пластин.

Стенд состоит из следующих основных частей: светонепроницаемого корпуса с двухкоординатной системой перемещения, бета источника и фотоприемника, прецизионного цифрового мультиметра, каркаса с источниками питания и модулями управляющей электроники и персонального компьютера со специализированным программным обеспечением (на фото не показан).

Светонепроницаемый корпус, показанный на рисунке 21, включает в себя следующие компоненты:

1. Измеряемая сцинтилляционная пластина.
2. Бета источник стронций-90 с активностью 25 МБк.
3. Двухкоординатная система перемещения.
4. Спектросмещающие волокна (Y11, Kuraray).
5. Фотоприемник (ФЭУ Hamamatsu R7877).
6. Эталонные образцы сцинтиллятора.

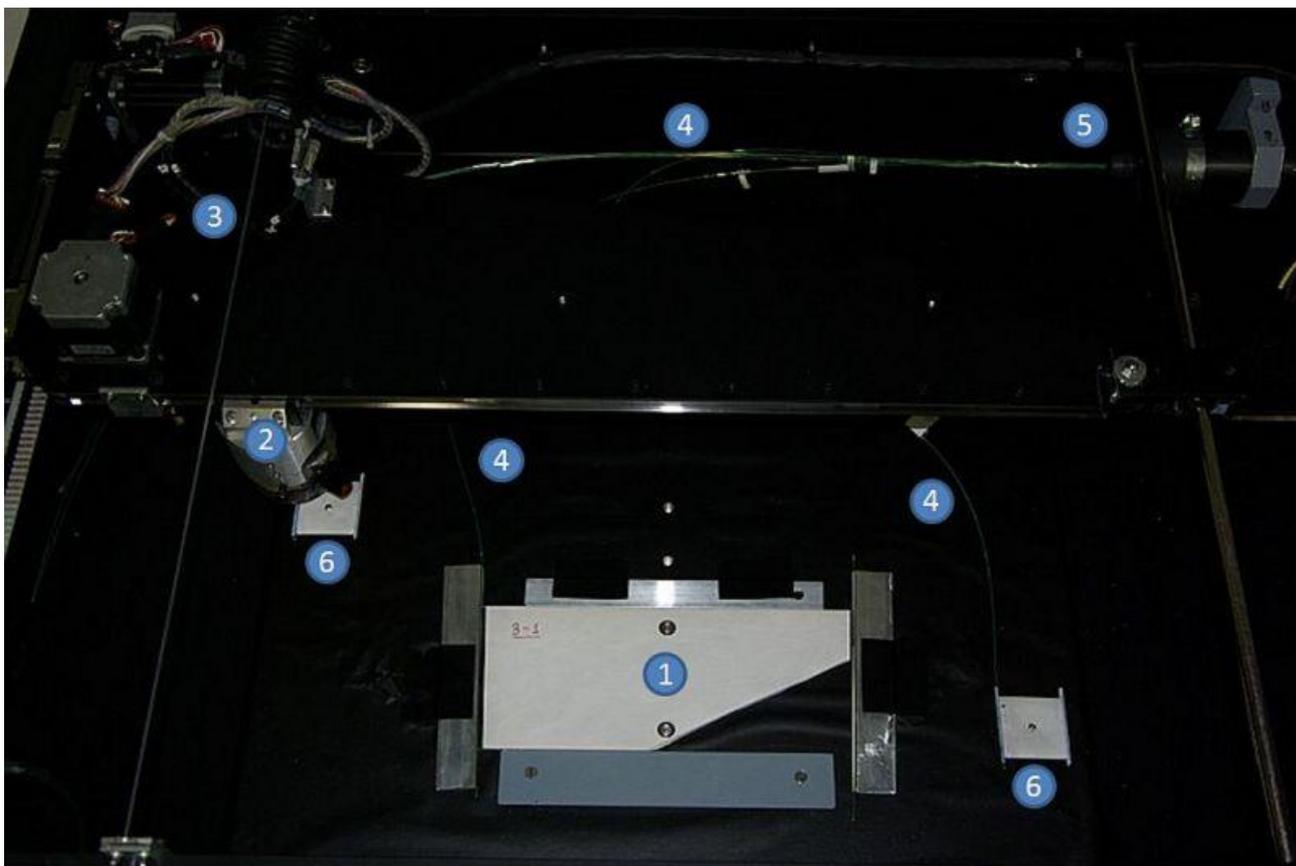


Рисунок 21 – Светонепроницаемый корпус (вид сверху).

Процедура измерения представляет собой облучение исследуемого образца сцинтиллятора по заданному маршруту с помощью радиоактивного источника (стронций-90), закрепленного на каретке системы перемещения. При этом в сцинтилляторе возбуждается свет, который собирается оптическими волокнами и транспортируется к ФЭУ, сигнал с которого измеряется цифровым вольтметром Keithley KUSB-488A и далее передаётся в компьютер через GPIB-USB интерфейс.

Двухкоординатная система перемещения собрана на шаговых моторах Trinamic QMOT QSH5718, управляемых через модули Scientific Pacific MA6420(10), установленные в блоке управления перемещением каретки, управляемом через последовательный порт RS232. Область сканирования ограничена концевыми выключателями. Шаг сканирования составляет 1 мм.

Программное обеспечение написано на языке Python с использованием библиотек tkinter для графического интерфейса, pySerial для контроля движения через последовательный порт, linux-gpib для чтения данных с мультиметра через GPIB интерфейс. Также используются программы Gnuplot для визуализации данных и программа ROOT для сохранения и анализа данных.

По окончании скана в компьютер записывается набор данных, в котором каждой точке маршрута источника соответствует измеренный отклик со сцинтилляционной пластины. На рисунке 22 показана типичная картина измерений. По осям отложено положение источника, а уровень отклика исследуемого образца (измеряемого в милливольтках) характеризуется цветовой шкалой справа.

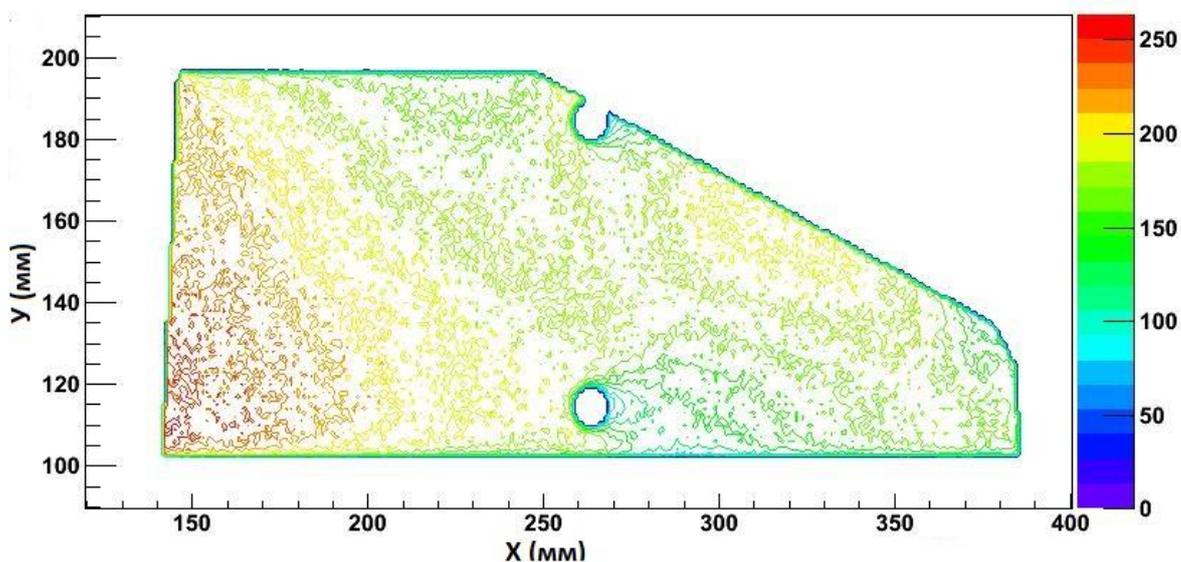


Рисунок 22 – Типичная картина сырых данных, получаемых при сканировании пластины.

Для последующего определения световыходов и прозрачности используется закон Бугера-Ламберта-Бера распространения монохроматического пучка света в поглощающей среде:

$$I(l) = I_0 \exp(-l/\lambda), \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность входящего пучка (искомый световыход, в данном случае – это отклик с торца образца, где осуществляется светосбор), l – толщина слоя, через который проходит пучок света (здесь – расстояние между положением источника и торцом, с которого осуществляется светосбор), λ – длина затухания или прозрачность (искомое расстояние, на котором измеряемый отклик с образца падает в e раз). Процедура обработки заключается в выделении узкой полосы данных (например, при фиксированной координате Y) с их дальнейшей аппроксимацией по вышеприведенной формуле (1) (вычисление I_0 и λ при заданной l и измеренной $I(l)$).

3 Разработка технологии сборки мюонных камер ДТМ из рабочих трубок

Подробно технология изложена во включённом в отчётную документацию по третьему этапу соглашения Технологическом регламенте, который прошёл все необходимые согласования и утвержден директором ФГБУ ГНЦ ИФВЭ.

Технологический регламент предусматривает два процесса. Первый – это технологический процесс склейки регистрирующих блоков из дрейфовых трубок, второй – технологический процесс сборки мюонных камер из регистрирующих блоков.

Технологический процесс склейки регистрирующих блоков разбит на 7 следующих стадий: 1) комплектация; 2) подготовка технологического стапеля; 3) входной контроль дрейфовых трубок – высоковольтные испытания; 4) входной контроль дрейфовых трубок на герметичность; 5) входной контроль дрейфовых трубок - измерение натяжения сигнальной проволоки; 6) входной контроль комплектующих (в дополнение к дрейфовым трубкам); 7) склейка регистрирующего блока из прошедших входной контроль дрейфовых трубок. Заключительная стадия первого процесса выполняется в специальном сборочном стапеле (см. рисунок 23).



Рисунок 23 - Фотография склеенного блока дрейфовых трубок в сборочном стапеле.

Склеенный блок дрейфовых трубок после извлечения из сборочного стапеля показан на рисунке 24.



Рисунок 24 - Фотография блока дрейфовых трубок после извлечения из сборочного стапеля

Технологический процесс сборки мюонных камер из регистрирующих блоков включает в себя следующие 8 стадий: 1) монтаж газовых соединителей; 2) монтаж газовых переходников; 3) проверка герметичности блока дрейфовых трубок; 4) приклеивание регистрирующих блоков к несущему конструктиву 5) монтаж электромагнитных экранов ; 6) съем камеры со сборочного стола; 7) оформление паспорта изделия; 8) маркировка готового изделия.

В ГНЦ ИФВЭ уже изготовлены пилотные образцы несущего конструктива мюонной камеры (см. рисунок 25) и электромагнитных экранов (см. рисунок 26).

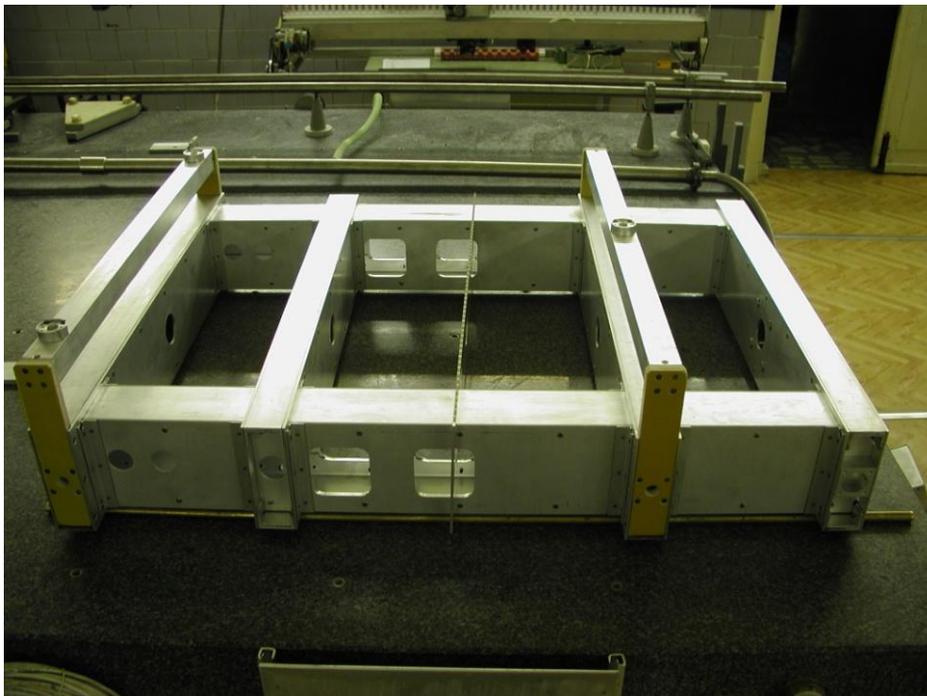


Рисунок 25 - Фотография несущего конструктива камеры.

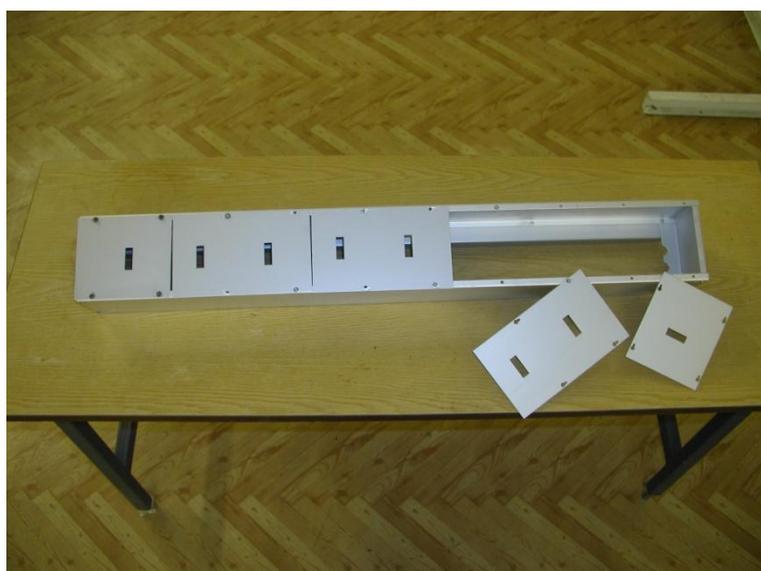


Рисунок 26 - Фотография сборного электромагнитного экрана регистрирующего блока.

Изготовление экспериментальных образцов мюонных камер в соответствии с разработанной технологией, с проведением испытаний на герметичность и высоковольтную стабильность будет выполнено на следующем (4-м) этапе, как это предусмотрено планом-графиком работ по соглашению.

4 Работы по переднему миникалориметру

Основываясь на результатах аналитического обзора (см. Отчёт за 2014 г., этап 1) и проведенного моделирования методом Монте-Карло с использованием пакета программ Geant4 (см. Отчёт за первое полугодие 2015 г., этап 2), Сотрудничество по переднему миникалориметру эксперимента АТЛАС решило принять, в качестве основного, жидкоаргоновый вариант переднего миникалориметра с цилиндрической геометрией электродов, с размерами зазоров между электродами 150 и 200 мкм и во второй половине 2015 г. разработать эскизную документацию на прототипы миникалориметра, включая криостаты и систему криогенного обеспечения, необходимые для испытаний прототипов в пучке протонов.

Ответственность за выполнение этой работы была возложена на группу из ИФВЭ.

4.1 Разработка эскизной документации на варианты прототипа миникалориметра и согласование её с другими участниками работ по миникалориметру и с Сотрудничеством АТЛАС

В течение июля-сентября указанная в заголовке раздела документация была разработана под руководством г.н.с. Денисова С.П., главного инженера установки Левина А.В., с.н.с. Васильева И.А. и ведущего конструктора Суздалева В.И. и в начале октября 2015 г. была представлена на совещаниях Сотрудничества по переднему миникалориметру в ЦЕРН. На совещаниях присутствовали представители групп из России (ИФВЭ, ОИЯИ, ФИ РАН), Канады (TRIUMF) и Германии (MPI, Мюнхен). От ИФВЭ участвовали Васильев И.А., Денисов С.П. и Стоянова Д.А.. Большинство выступивших отметили, что представленные эскизные проработки в целом следуют ранее принятым рекомендациям и решениям Сотрудничества и удовлетворяют требованиям эксперимента АТЛАС в условиях повышенной светимости БАК. В то же время был сделан ряд замечаний и предложений, направленных на улучшение конструкции прототипа миникалориметра и оборудования для его испытания. В частности, было предложено использовать для вывода сигналов из криостатов герметичные разъемы с вакуумным уплотнением на кольцах из тефлона и включить в схему криогенного обеспечения и изготовить резервный криостат на случай выхода из строя одного из рабочих криостатов во время сеансов с пучком протонов. Эти и другие замечания и предложения были учтены при доработке эскизной документации в октябре-ноябре 2015 года и окончательный вариант был представлен руководителю Сотрудничества по жидкоаргоновым калориметрам Мартину Алекса, который от имени и по поручению руководства АТЛАС его утвердил.

Ниже, в приложении 1 представлены эскизы прототипов миникалориметра, криостатов и системы криогенного обеспечения и соответствующие пояснительные записки.

Ведётся подготовка технического проекта вариантов прототипа миникалориметра и работы по подготовке исследования его характеристик на протонном пучке с применением ускорителя У-70 и имеющегося в ИФВЭ в галерее канала меченых нейтрино уникального научного оборудования (протонный канал, криогенное оборудование и контрольная аппаратура).

5 Разработка программ и методик испытаний лабораторных образцов, проводимых на этапе

На подотчётном этапе соглашения проводились испытания следующих компонентов детекторов установки АТЛАС:

- образцы сцинтилляторов для горячих зон установки;
- образцы оптических кабелей для жидкоаргонового калориметра;
- образцы модулей управления помпами и клапанами электроники ЦКСК.

Методика испытаний сцинтилляторов кратко описана в разделе 3.6 настоящего отчёта и представлена в виде отдельного документа в составе отчётной документации 3 этапа.

Методика испытаний оптических кабелей для жидкоаргонового калориметра представлена в виде отдельного документа в составе отчётной документации 3 этапа.

Методика испытаний модулей электроники представлена в отчёте по первому этапу соглашения (см. п. 9.1 и Приложение К в отчете по первому этапу).

Разработана также методика испытаний ТЗК, представленная в виде отдельного документа в составе отчётной документации 3 этапа.

6 Испытания оптических свойств, прозрачности и световыхода лабораторных образцов сцинтилляторов для горячих зон.

Целью испытаний является проверка параметров образцов новых сцинтилляторов и подтверждение соответствия их характеристик заданным требованиям. Испытания образцов проводятся в помещении, паспортизованном для работы с радиоактивными источниками. В помещении поддерживаются стабильными температурный режим и влажность. Требования безопасности определяются использованием радиоактивных источников в процессе испытаний образцов сцинтилляторов. При проведении испытаний в помещении могут находиться только сотрудники, аттестованные для работы в радиационно-вредных условиях (РВУ) труда.

Программа испытаний включает в себя измерение длины затухания образцов сцинтилляторов, измерение однородности светосбора и зависимости светосбора от количества спектросмещающих волокон. Во всех измерениях используются спектросмещающие волокна компании *Kuraray* с двойной оболочкой. При проведении испытаний образец сцинтиллятора со вставленными в специальные канавки или расположенными на торце спектросмещающими волокнами и фотоэлектронный умножитель размещаются в светоизолированном ящике. Бета-источник ^{90}Sr располагается внутри того же ящика и закреплен на подвижной платформе. Перемещение платформы производится по команде от компьютера. Фотография образца сцинтиллятора внутри светоизолированного ящика приведена на рисунке 26.

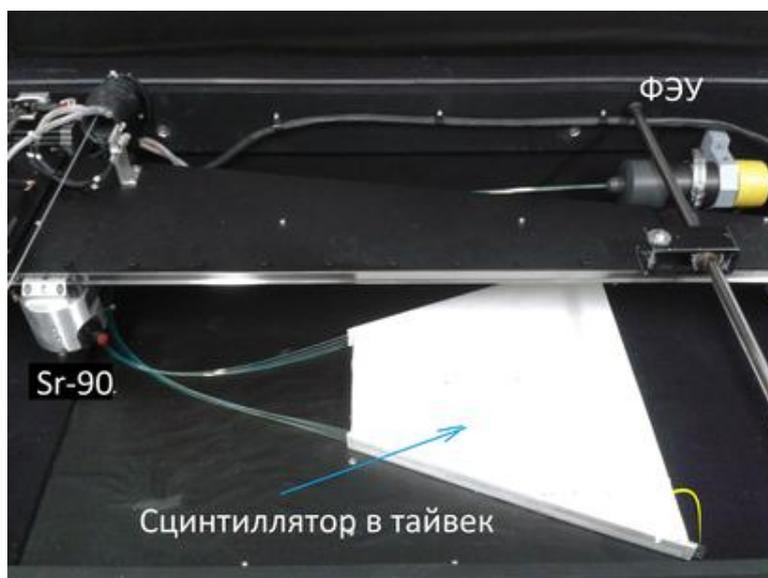


Рисунок 26 - Внешний вид образца сцинтиллятора перед испытанием с β -источником ^{90}Sr .

Сцинтиллятор обернут светорассеивающей бумагой *Tyvek*, спектросмещающие волокна на данном образце располагаются на торце сцинтиллятора, другие их концы подсоединяются к фотокатоду ФЭУ. Свет, образованный в сцинтилляторе в результате прохождения через него ионизирующих частиц, распространяется в объеме сцинтиллятора и частично захватывается спектросмещающими волокнами. Переизлученный в волокнах свет поступает на фотокатод ФЭУ, где происходит преобразование светового сигнала в электрический и его усиление. ФЭУ работает с усилением около $5 \cdot 10^5$. При проведении испытаний образца сцинтиллятора вся его поверхность сканируется β -источником. Источник движется на платформе над сцинтиллятором и в каждой точке через 1 см производится измерение сигнала с ФЭУ. Таким образом, получается двумерное распределение (X-Y) сигналов с образца сцинтиллятора. Аналогичные измерения проводятся для образцов со спектросмещающими волокнами, размещенными в канавках. Полученные значения позволяют определить длину затухания образца и однородность световыхода по всей поверхности. Зависимость светосбора от количества спектросмещающих волокон исследуется путем помещения различного количества волокон в канавке и использованием только одной канавки из двух, имеющих на образце.

Однородность светосбора и световыход определялись при расположении волокон в канавках. Старые пластины отличаются от новых своей геометрией и формой канавок для волокон. Каждый октант старых пластин составлен из двух половинок. Канавки для волокон на этих двух частях прорезаны с противоположных сторон и выполнены в форме С или S. Двумерное распределение сигналов ФЭУ при сканировании поверхности старых счетчиков β -источником показано на рисунке 27.

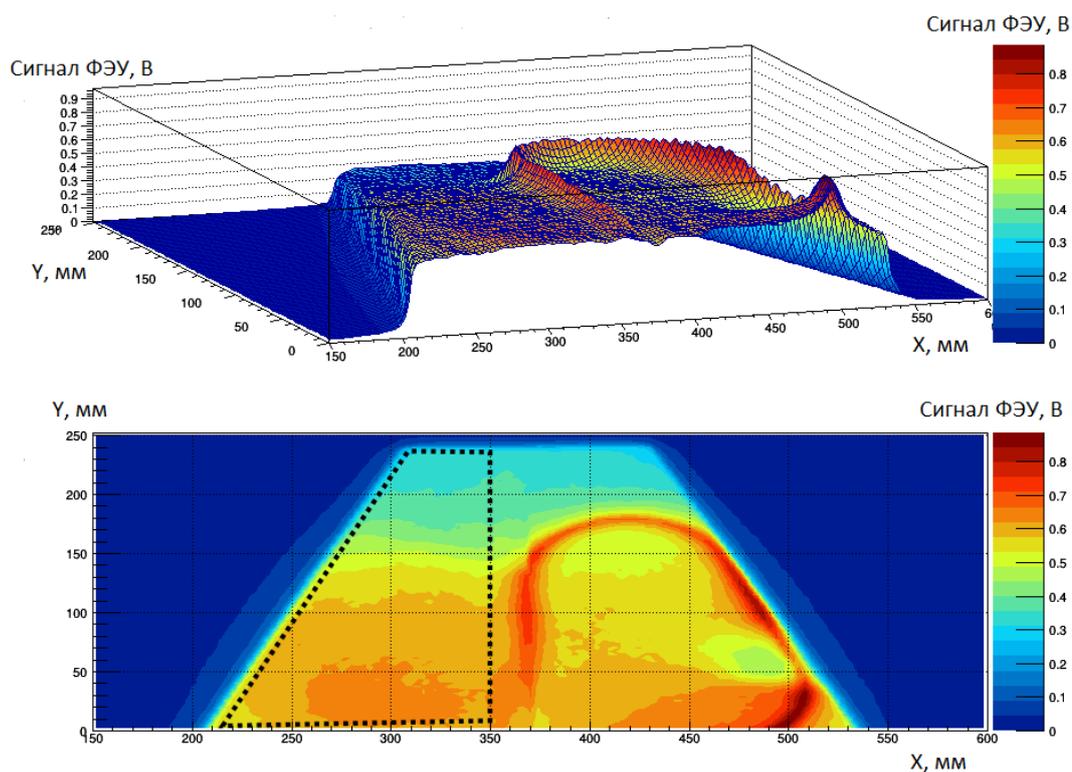


Рисунок 27 - Распределение сигналов с ФЭУ при сканировании старого счетчика β -источником ^{90}Sr

Видно, что распределения существенно неоднородны. Наибольший светосбор происходит для частиц, проходящих вблизи канавок с волокнами и внутри зоны, окруженной волокнами. За пределами канавок с волокнами светосбор падает. Однородность светосбора, определяемая как отношение среднеквадратичного отклонения распределения RMS к среднему значению распределения $\langle \text{mean} \rangle$, составляет около 20% для зоны $10 \text{ мм} < Y \leq 230 \text{ мм}$.

По техническим требованиям к модернизации установки АТЛАС новые пластины должны иметь однородность светосбора по площади 5-8%, а предельное значение не должно превышать 10%. В новых СТМС октанты выполнены не из двух, а из одной части с канавкой для волокон σ -образной формы, а сами канавки приближены к краям образцов. Такие улучшения дали свои результаты. Двумерное распределение сигналов ФЭУ при сканировании поверхности одного из образцов бета источником показано на рисунке 28.

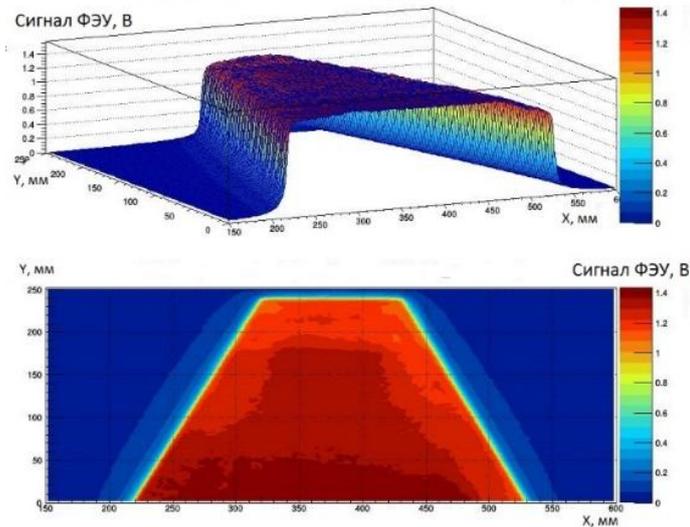


Рисунок 28 - Распределение сигналов с ФЭУ при сканировании нового образца β -источником ^{90}Sr

Видно, что на большей части образца сигналы ФЭУ различаются лишь на несколько процентов. Однородность светосбора равна 5.4%. Следует отметить, что новые сцинтилляторы имеют световыход в три раза выше старых образцов и значительно лучшую однородность светосбора. Протокол испытаний однородности светосбора образцов новых сцинтилляторов представлен в комплекте отчётной документации этапа отдельным документом.

При исследовании длины затухания сцинтиллятора использовался образец со съемом света спектросмещающими волокнами только с одного торца. Проводилось сканирование всей поверхности образца β -источником. Распределение сигналов ФЭУ для такого съема света показано на рисунке 29 (слева).

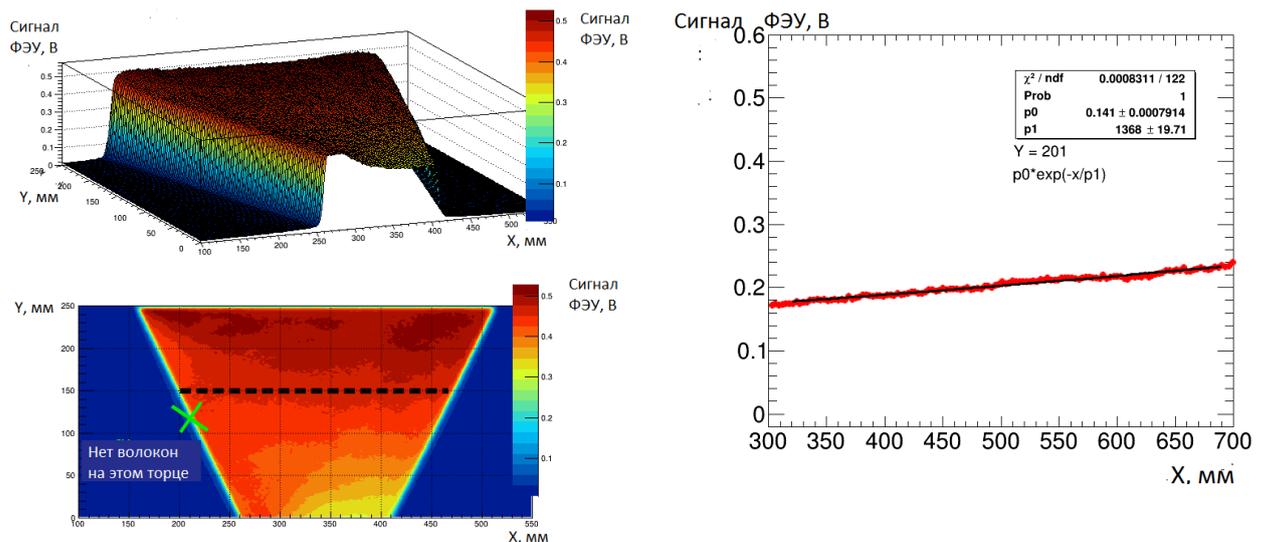


Рисунок 29 - Двумерный плот распределения сигналов ФЭУ по всей поверхности нового образца (слева) и сигналы ФЭУ при $Y=150$ мм (справа). Спектросмещающие волокна расположены только на одном торце образца.

Длина затухания сцинтиллятора определялась при фиксировании координаты Y , при которой определялась зависимость сигнала ФЭУ от расстояния до волокон. На правой части рисунка 29 такая зависимость показана для одного из образцов при $Y=201$ мм. Фитирование результата экспоненциальной функцией дает оценку длины затухания $L_{att} \approx 140$ см. Длина затухания сцинтилляторов, использовавшихся в установке АТЛАС, составляет около 80 см. Таким образом, новые образцы существенно превосходят старые сцинтилляторы и по длине затухания.

Исследование влияния количества спектрсмещающих волокон на световыход было проведено путем сравнения «стандартного» образца с канавкой на одной стороне с образцом с двумя канавками, по одной на каждой стороне. Сцинтилляторы сканировались β -источником по всей поверхности образцов.

Спектр сигналов ФЭУ при сканировании образца с 4-мя спектрсмещающими волокнами, помещенными в одну канавку, показан на рисунке 30 (слева).

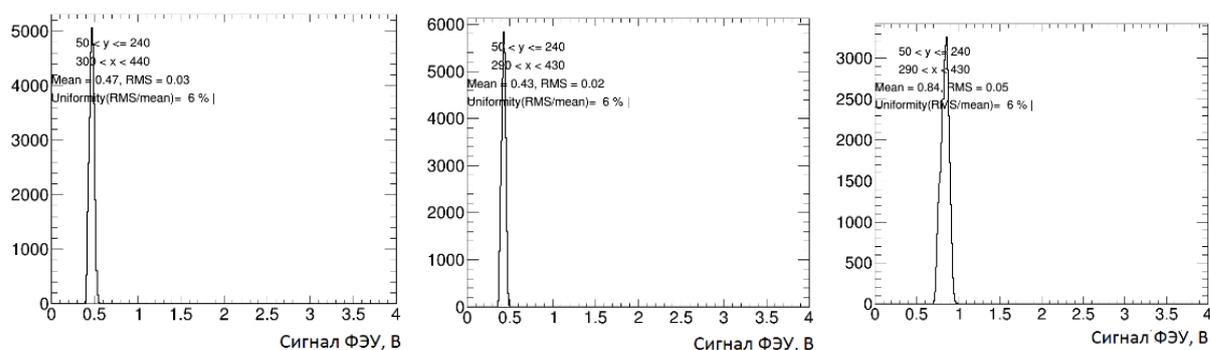


Рисунок 30 - Сигналы ФЭУ при использовании 4-х волокон в верхней канавке (слева); при использовании 4-х волокон в верхней канавке и 4-х волокон в нижней канавке без съема света (центр); при использовании 4-х волокон в верхней канавке и 4-х волокон в нижней канавке (справа).

Среднее значение равно 0,47 В. Спектр сигналов ФЭУ с образца с двумя канавками (с двух сторон образца) также приведен на рисунке 30 в центре. При этом съем света происходил только с 4-х волокон с одной стороны, свет с волокон с противоположной стороны не снимался. Видно, что сигнал ФЭУ с 4-х волокон стал равен 0,43 В (среднее значение), понизившись менее, чем на 10% по сравнению с образцом с одной канавкой. Это связано с рассеянием и захватом света на второй канавке. При съеме света со спектрсмещающих волокон в обеих канавках (общее число волокон равно 8) средний сигнал с ФЭУ увеличился практически в 2 раза (см. рисунок 30, справа), до 0,84 В, как и ожидалось. Таким образом, наличие дополнительной канавки снижает световыход с волокон менее, чем на 10%. В то же время, добавление второй канавки и удвоение числа волокон практически удваивает световыход образцов.

Проведенные испытания продемонстрировали соответствие параметров образцов новых сцинтилляторов для «горячих зон» в установке АТЛАС заданным требованиям.

- 7 Работы по цезиевой системе калибровки сцинтилляционного калориметра (ЦКСК)
- 7.1 Разработка принципиальных схем и разводка печатных плат модулей контроля давления в ЦКСК и датчиков движения источника в системе.

6U-ADC - плата АЦП

Плата предназначена для измерения давления в магистрали цезиевой системы калибровки сцинтилляционного калориметра установки ATLAS.

Плата АЦП построена на основе микроконтроллера фирмы STMicroelectronics ARM Cortex™-M3 STM32F205VG с встроенным 12 разрядным АЦП и интегрированным контроллером CAN-bus. Плата имеет 8 аналоговых входов, выполненных на инструментальных усилителях фирмы Analog Devices AD623AR. Входной сигнал поступает с датчика давления фирмы Motorola MPX5700D, который измеряет давления до 7 атм. Функциональная схема платы АЦП показана на рисунке 31.

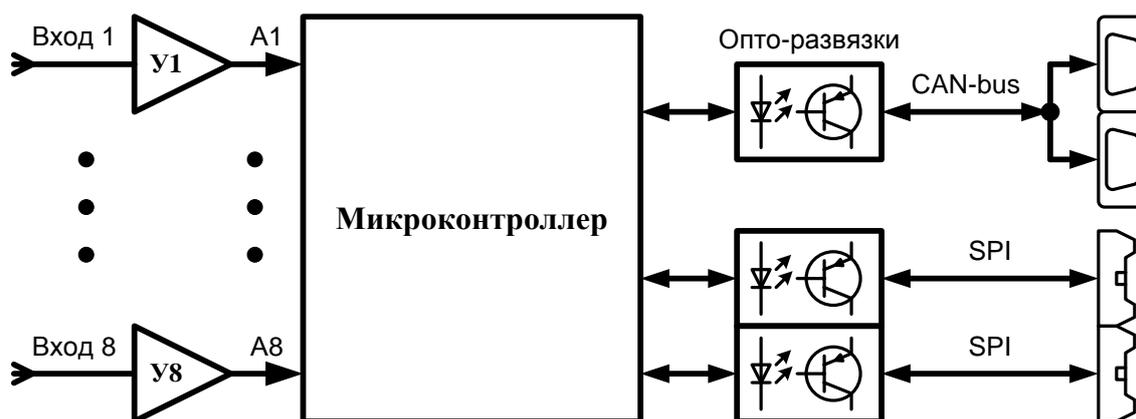


Рисунок 31 - Плата 6U-ADC, У1-У8 – инструментальные усилители AD623AR, микроконтроллер STM32F205VG, опто-развязки FOD060L.

SIN-CAN - 16-ти канальная плата индуктивных датчиков

Плата предназначена для детектирования прохождения алюминиевой капсулы в нержавеющей трубке методом измерения изменения индуктивности датчика в цезиевой системе калибровки сцинтилляционного калориметра установки ATLAS.

Плата состоит из 16 генераторов, частота которых измеряется микроконтроллером фирмы STMicroelectronics ARM Cortex™-M3 STM32F205VG, в котором реализованы 16 каналов 16-ти разрядных счётчиков. Генераторы построены по схеме LC-генератора на двух транзисторах, конденсатор располагается на печатной плате модуля, а катушка индуктивности находится в датчике, одеваемом на трубку, внутри которой проходит капсула. Частота генераторов находится в пределах 30 – 40 кГц, а её изменение – от 1% до

5%. Микроконтроллер сравнивает число импульсов за фиксированное время с опорными значениями, принимает решение о срабатывании датчика и передаёт соответствующую посылку по CAN-bus в компьютер. По каналам связи SPI аналогичная посылка передаётся в электронику приёма данных с фотоумножителей, где она интегрируется в общий поток данных. Функциональная схема платы индуктивных датчиков показана на рисунке 32.

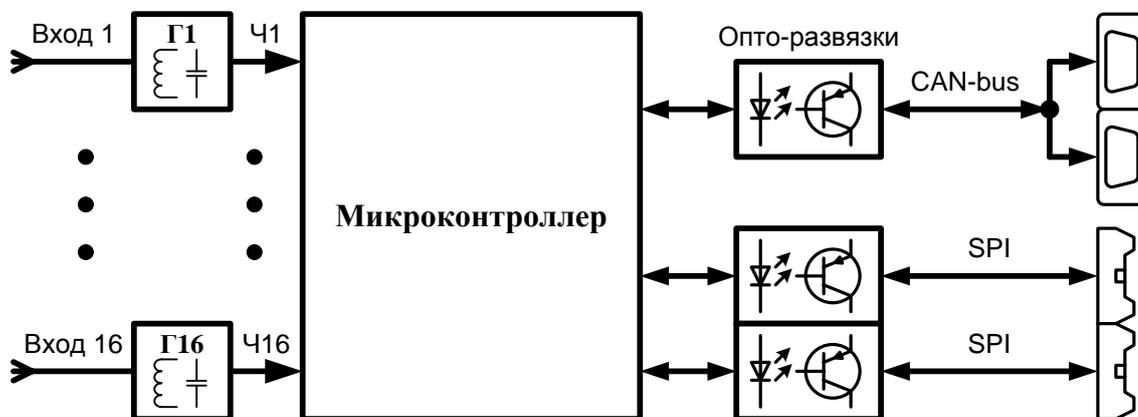


Рисунок 32 - Плата 6U-SIN, Г1-Г16 – генераторы индуктивных датчиков, микроконтроллер STM32F205VG, опто-развязки FOD060L

У обеих плат одинаково построена цифровая часть, состоящая из микроконтроллера, интерфейсов CAN-bus и SPI, а аналоговые части соответствуют назначению плат.

Проведена разработка принципиальных схем обеих плат и завершена разводка печатных плат.

7.2 Настройка и испытания плат управления помпами и клапанами электроники ЦКСК

В апреле 2015г. были проведены первичные испытания плат управления помпами и клапанами, которые показали соответствие работы лабораторных образцов и связи с периферийным оборудованием условиям функционирования цезиевой системы калибровки сцинтилляционного калориметра. Для проверки долговременной надежности и доработки математического обеспечения в рамках общего развития системы было принято решение о том, чтобы оставить лабораторные образцы плат управления в ЦЕРНе. В сентябре-ноябре 2015г. проведены долговременные испытания плат управления помпами и клапанами, а также платы связи с периферийным оборудованием и компьютерами по протоколам стандартов Canbus, USB и Ethernet.

Эти испытания показали, что платы управления помпами и клапанами пригодны для использования в составе цезиевой системы калибровки сцинтилляционного калориметра АТЛАС.

7.3 Разработка и изготовление специальных печатных плат для проведения радиационных испытаний компонентов электроники ЦКСК.

Плата RadTest предназначена для проведения радиационных тестов радиоэлектронных компонентов в рабочих условиях. На ней собраны все основные компоненты, используемые в платах ЦКСК.

Ядром платы является микроконтроллер фирмы STMicroelectronics ARM Cortex™-M3 STM32F207VG, который используется в контроллерах 3U-Eth, а также в модулях 6U-Garage, 6U-ADC и 6U-SIN. Микроконтроллер включает в себя контроллеры CAN-bus и Ethernet. Контроллер CAN-bus через оптические приёмо-передатчики FOD060L и интерфейсной схемы (ИС) MAX3051ESA передаёт и принимает данные. Связь с Ethernet осуществляется посредством микросхемы DP83848C - приёмо-передатчика физического уровня 10/100 Мб/с. Функциональная схема платы показана на рисунке 33.

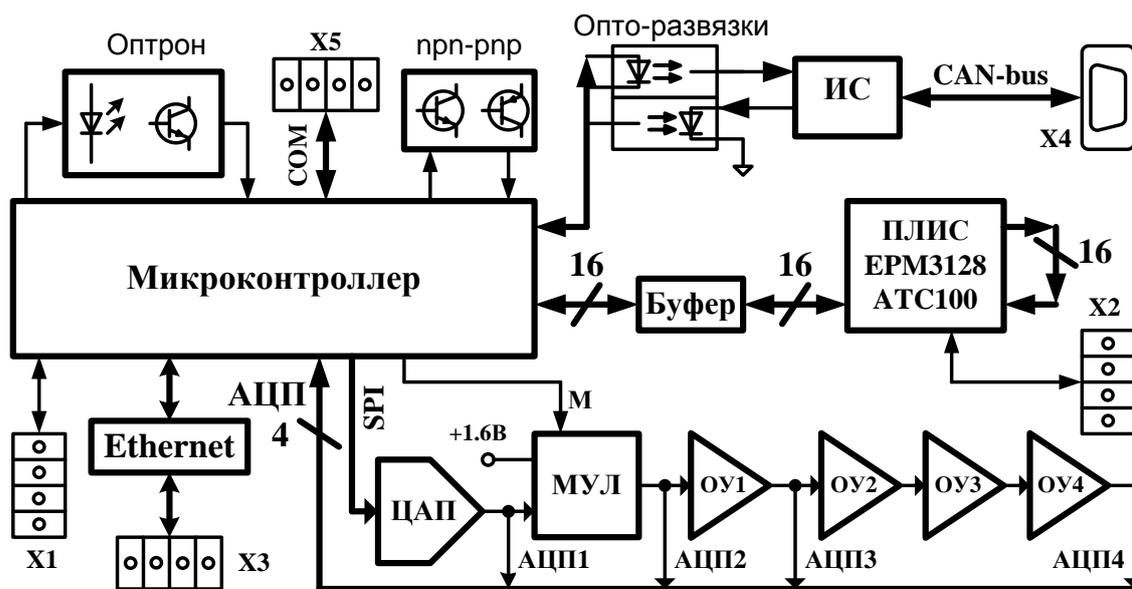


Рисунок 33 – Функциональная схема платы RadTest

Фотография готовой платы показана на рисунке 34.

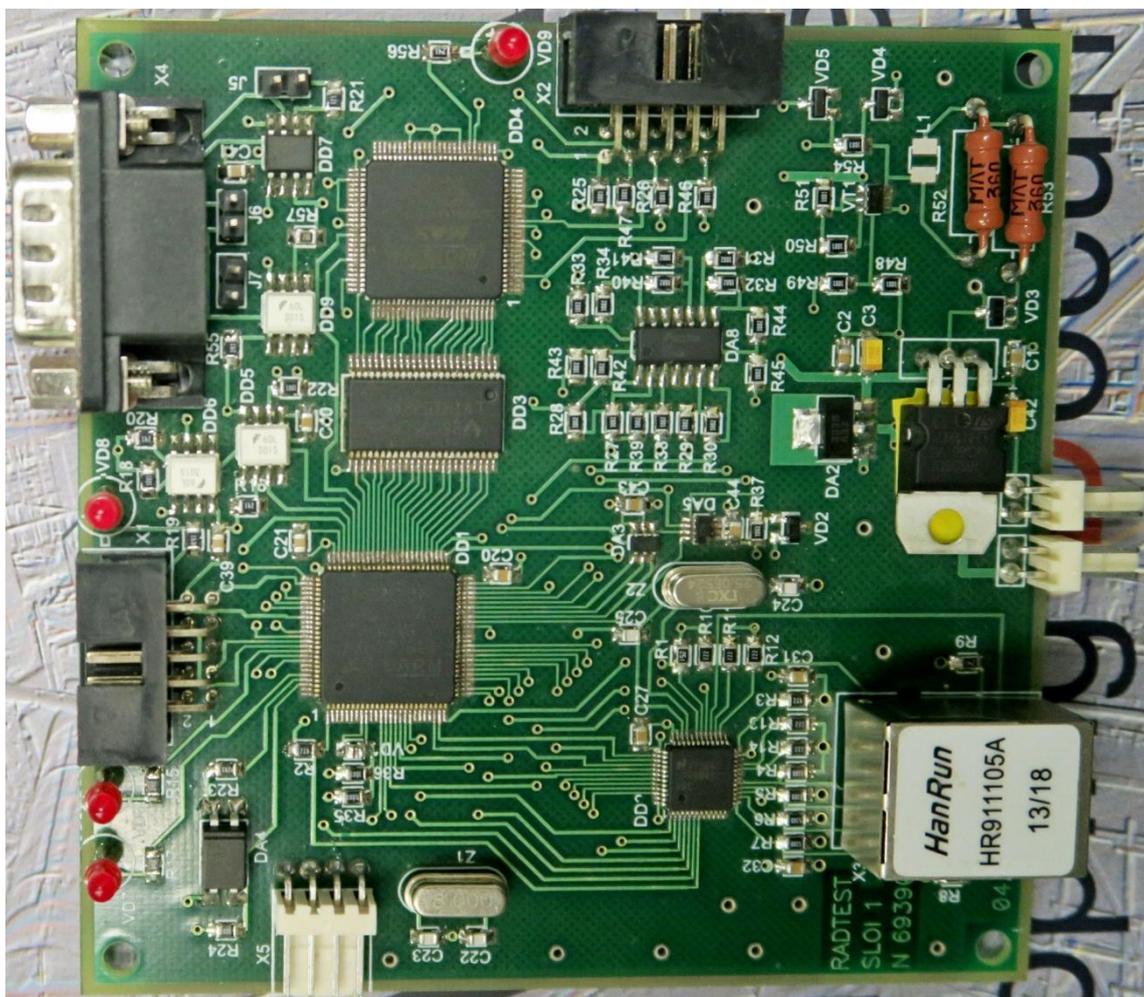


Рисунок 33 - Внешний вид смонтированной платы RadTest

Управляющие и тестируемые компоненты, расположенные на плате модуля RadTest.

1.	STM32F207VGT6	1	Микроконтроллер
2.	DP83848C	1	Ethernet Transceiver
3.	EPM3064ATC100-15	1	ПЛИС Altera
4.	SN74LVTH162245DL	1	Буферный приёмопередатчик
5.	ADP3338AKC-3.3-RL	1	Стабилизатор напряжения на 3,3В
6.	L78S05CV	1	Стабилизатор напряжения на +5В
7.	SFH6156-1T	1	Оптрон Vishay
8.	DAC7512N	1	Цифро-аналоговый преобразователь
9.	FOD060L	3	Оптроны CAN-bus
10.	MAX3051ESA	1	CAN-bus transceiver

11.	ADG1219BRJZ-R2	1	Мультиплексор
12.	LM324AM	1	Операционный усилитель
13.	PBSS4140DPN	1	Транзисторы pnp-pnp
14.	BAV99	1	Диодная пара
15.	BAV70	3	Диодная пара
16.	LED (3mm)	4	Светодиоды

Работоспособность всех задействованных микросхем проверяется подачей с микроконтроллера цифрового сигнала на выбранный объект, а с выхода оптрона инвертированный сигнал принимается в обратно в контроллер и сравнивается с поданным. Микроконтроллер также, обеспечивает включение - выключение тока в цепи нагрузки, которая имитируется двумя полуваттными резисторами и следит за результатом работы выбранного компонента схемы.

Размер платы составляет 10x10 см², что определяется апертурой предполагаемой системы облучения.

К настоящему моменту изготовлено и смонтировано два опытных образца специальной печатной платы RadTest для проведения радиационных испытаний компонентов, разрабатывается соответствующее математическое обеспечение для будущих тестов. Время, порядок и место проведения тестов должно быть согласовано с Сотрудничеством АТЛАС в следующем году.

8 Работы по жидкоаргоновому калориметру

На третьем этапе плана-графика соглашения проводились работы по двум направлениям:

- разработка и изготовление стенда для автоматизированных измерений электрических характеристик аналоговой электроники ЖАК;
- разработка концепции предварительного формирователя как блока интегральной схемы, общей для всех детекторов ЖАК.

Спроектирован и собран стенд, позволяющий проводить испытания ЖАК электроники с помощью АТСА стандарта. Предварительные исследования показали, что использование цифрового стандарта АТСА не является оптимальным для аналоговых измерений. Было принято решение разработать и изготовить стенд на основе стандартных лабораторных приборов, позволяющих автоматизировать измерения через интерфейсы GPIB или USB. Опыт работы с этими интерфейсами был приобретен на втором этапе проекта при измерениях на стенде проверки прототипа предварительного формирователя.

В настоящее время сотрудничеством АТЛАС-ЖАК принято, что все элементы аналогового тракта ЖАК (предусилитель, предварительный формирователь, фильтр и аналого-цифровой преобразователь) будут собраны в единую интегральную микросхему. Предварительный формирователь будет функциональным блоком этой микросхемы.

Требование интеграции привело к необходимости изменить некоторые характеристики предварительного формирователя.

8.1 Изготовление стенда проверки электроники ЖАК на базе корзины АТСА стандарта

Ниже приведён перечень выполненных работ:

- разработана схема стенда и проведена детализация последовательности измерений для тестирования аналоговой части цифрового триггера;
- разработана программа управления и мониторинга измерений (совместно с коллегами из Канады (ТРИУМФ, Ванкувер);
- первая версия программы была использована для проведения температурных измерений опытных образцов базовой платы, в настоящее время ведутся работы по созданию второй версии программного обеспечения;
- собран упрощенный вариант стенда и проведено тестовое измерение 8-канального прототипа предварительного формирователя, подготовленного для использования в эксперименте HiLum2;

- заказано дополнительное оборудование (LRC-meter) для измерения импедансов аналоговых схем в составе разрабатываемого стенда.

На рисунке 34 показана фотография стенда проверки электроники ЖАК, в правой части снимка температурная камера.



Рисунок 34 - Проведение измерений температурных циклов образцов базовой платы ЖАК (ТРИУМФ, Канада). Слева – измерительный стенд управляемый первой версией программы контроля и мониторинга. Справа – образец базовой платы в температурной камере.

Акт изготовления стенда проверки электроники ЖАК представлен в составе отчетной документации 3-го этапа.

9 Работы по оптическим кабелям ЖАК

После дополнительного анализа и обсуждения, как техническими специалистами ЦЕРНа, так и участниками сотрудничества АТЛАС, включая группу ФИАН, техническим руководством, отвечающим за проведение фазы 1 модернизации электроники ЖАК эксперимента АТЛАС, было принято решение о внесении некоторых изменений в технические детали запланированных работ. Часть этих изменений касается конструктива патч-кордов, которые группа ФИАН должна собрать и протестировать в рамках настоящего проекта. С учетом принятых изменений был разработан комплект рабочих чертежей, в соответствии с которыми далее производилась сборка тестовых патч-кордов.

Вместо ранее запланированного к использованию радиационнстойкого волокна Draka RadHard MMF оптического класса OM3 решено использовать радиационнстойкое волокно Corning ClearCurve MMF оптического класса OM4 с теми же геометрическими параметрами (волокно 50/125 мкм, внешний диаметр волокна в буфере - 0,9 мм) [3]. Волокно Corning прошло углубленное тестирование и было сертифицировано ЦЕРНом для применения в экспериментах на LHC.

Изменение коснулось патч-кордов длиной 350 мм и 140 мм обоих типов, которые представляет собой соединительный оптический шнур с разъемом MPO с одной стороны и 8-ю или 10-ю пигтейлами, оконцованными LC разъемами с другой. В целях экономии пространства в зоне соединения LC коннекторов было принято решение использовать их без внешних корпусов (рисунок 35), а само соединение выполнять с помощью специально разработанных блочных розеток (рисунок 36).

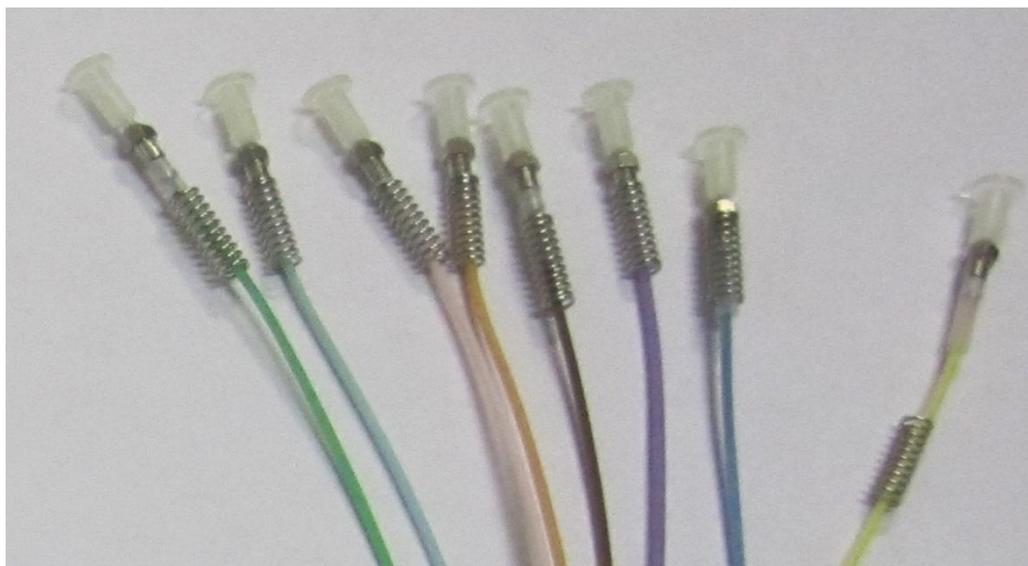


Рисунок 35 – LC коннекторы со снятыми корпусами

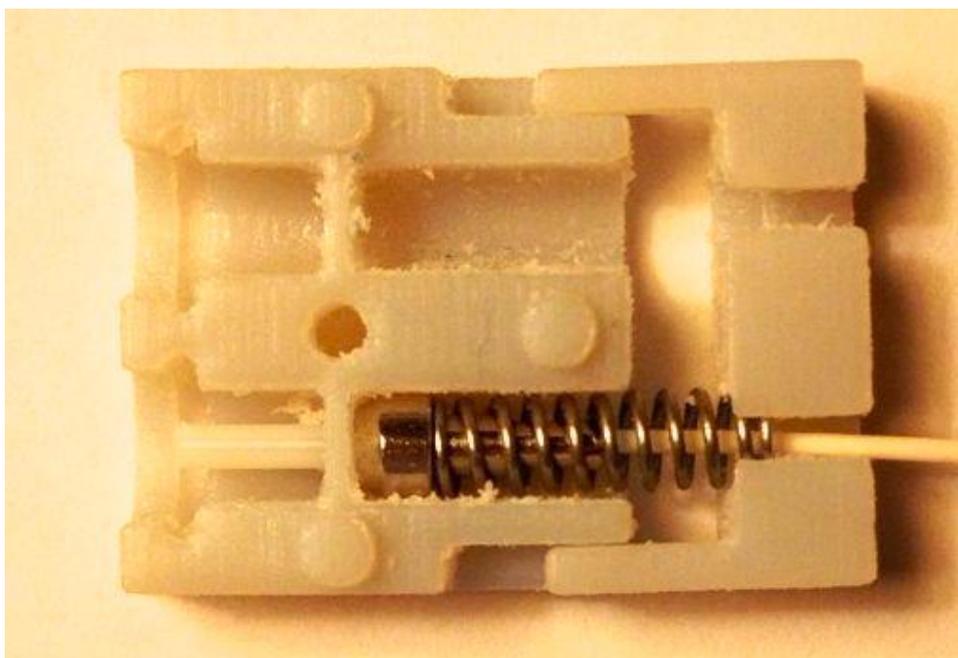


Рисунок 36 – Блочные розетки под модернизированные LC коннекторы.

Контрольно-измерительное оборудование для проверки оптических кабелей ЖАК должно иметь в своем составе оптический рефлектометр, компенсационные катушки и микроскоп с возможностью оцифровки изображения. Микроскоп нужен для визуального исследования точек оптического контакта разъемов типов МТР и LC. В условиях отсутствия на рынке предложений специализированного микроскопа, удовлетворяющих необходимым требованиям, был приобретен универсальный микроскоп «Микромед 2 вар. 3-20» характеристики которого приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики универсального микроскопа «Микромед 2 вар. 3-20»

Наименование	Значение
Увеличение микроскопа, крат	40 - 1000 (1600*/2000*)
Револьверное устройство	на 4 объектива
Объективы, крат/апертура ахроматы	4x/0,1; 10x/0,25; 20x/0,4*; 40x/0,65; 60x/0,85*; 100x/1,25 ми
Визуальная насадка	тринокулярная
Регулируемое межзрачковое расстояние, в пределах, мм	55-75
Увеличение насадки	1
Окуляры, крат/поле	10/18; (5/18*; 12,5/15*; 16/15*; 20/11*)

Центрируемый конденсор Аббе, наибольшая числовая апертура	1,25
Предметный столик, мм	135x153
Диапазон перемещения препарата, мм	80x50
Источник света - галогеновая лампа, В/Вт	6/20
Источник питания - сеть переменного тока, В/Гц	220+-22/50
Габаритные размеры, мм	220x360x470
Масса, не более, кг	8,2

Для оцифровки получаемого в микроскопе изображения и дальнейшего детального его анализа дополнительно был приобретен видеоокуляр TourCam 9.0 Mr, характеристики которого приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Характеристики видеоокуляра TourCam 9.0 Mr

Модель сенсора	Цветной CMOS-сенсор Artina MT9T001
Развертка	Прогрессивная
Максимальное разрешение	3488 x 2616
Количество фотоприемных элементов	9 МП
Размер сенсора	1/2.4" (5.825 мм (H) x 4.369 мм (V), Диагональ 7.281 мм)
Размер пикселя	1,67 x 1,67 мкм
Чувствительность к излучению длины волны 550 нм	0,31 В/люкс-сек
Динамический диапазон	65,2 дБ
Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)	12 бит параллельный, 8 бит RGB -> ПК
Сигнал/шум	34 дБ
Спектральный диапазон	380-650 нм (с ИК-фильтром)
Формат видео и частота кадров	1.9 кадров в секунду (3488 x 2616), 8 кадров в секунду (1744 x 1308), 27 кадров в секунду (872 x 654)
Бининг	1x1, 2x2, 4x4
Экспозиция	0.38 - 2000 мс Автоматическая/Ручная. Электронный

	вращающийся затвор ERS
Баланс белого	Автоматический режим/ ручной режим
Вывод изображения, скорость передачи данных	USB2.0, 480 Мбит/с
Электропитание	USB2.0
Программно управляемые характеристики	размер изображения, яркость, коэффициент усиления, время экспозиции
Рабочая температура, град. по Цельсию	-10 - +50
Корпус камеры	анодированный металлический корпус, окрашенный в черный цвет
Кабель USB	длина 2м
Операционная система	Microsoft® Windows® XP/Vista/7/8 (32 и 64 бит), OS X (Mac OS X), Linux
Программное обеспечение	программа обработки изображений "TourView "; драйвер устройства, поддерживающий стандарты интерфейса DirectShow и TWAIN

Для проведения оптических измерений с помощью рефлектометра МТР 6000 была заказана и приобретена «компенсационная катушка», основным предназначением которой является компенсация мертвой зоны оптического рефлектометра. Она изготовлена на основе многомодового оптического волокна Corning ClearCurve 50/125, идентичного используемому в тестируемых патч-кордах. Она укомплектована оптическими разъемами: с одной стороны – типа FC(m), с другой стороны – типа LC(f).

9.1 Изготовление и испытания партии оптических кабелей для ЖАК с распечаткой рефлектограмм по каждому волокну

Были изготовлены пробные оптические кабели (патч-корды) 4-х типов для передачи данных модернизированной электроники жидкоаргонового калориметра детектора АТЛАС в следующем количестве:

- патч-корды МТР-10 LC (350 мм) – 16 штук;
- патч-корды МТР-8 LC (350 мм) – 4 штуки.
- патч-корды МТР-10 LC (140 мм) – 1 штука;
- патч-корды МТР-8 LC (140 мм) – 1 штука.

Акт изготовления указанной партии оптических кабелей включён в состав отчётной документации по 3-му этапу.

Измерения величины потерь в каждом из волокон оптических кабелей (показаны на рисунке 37) проводилось в соответствии с методикой, представленной в отчете 2-го этапа выполнения проекта, и программой и методикой испытаний оптических кабелей ЖАК, представленной в составе отчётной документации 3 этапа.

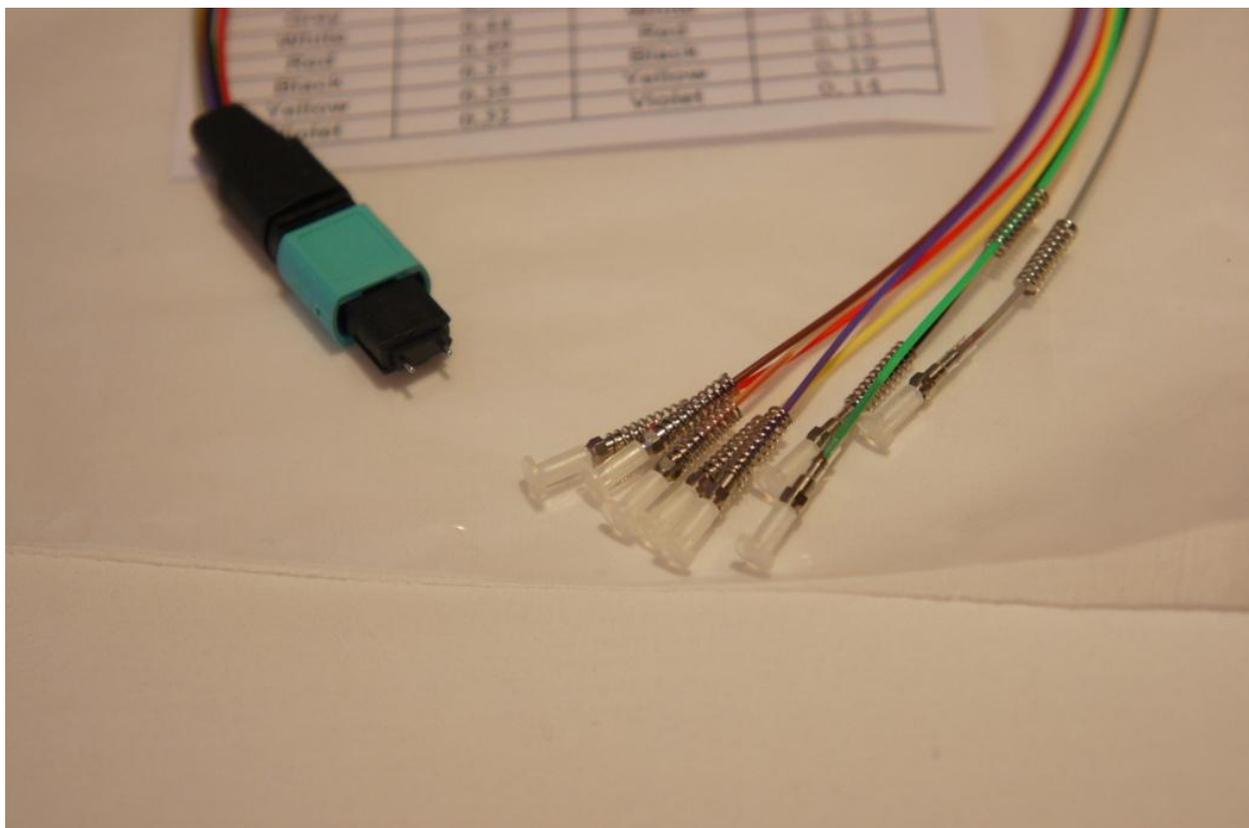


Рисунок 37 – Образец подготовленного для проведения измерений оптического кабеля (патч-корда), укомплектованного оптическими разъемами.

Результаты измерений по каждому из кабелей сводились в таблицу (см. таблицу 3). Аналогичные таблицы в распечатанном на бумаге виде прилагаются к каждому из патч-кордов, а в электронной форме хранятся в специальной базе данных.

Таблица 3 - Пример фрагмента результатов измерений для одного кабеля с переводом информации на русский язык.

Fiber Optic Patchcord S/N: 150924045			
Оптическое волокно патч-корда Сер/№: 150924045			
MTP-10LC-013		Production #013 / Номер #013	
Fiber / Волокно	Color / Цвет	Loss at 850 nm / Потери на 850 нм	
		Total / Суммарные	LC side
1	Blue / Голубой	0,33	0,14
2	Orange / Оранжевый	0,27	0,17
3	Green / Зеленый	0,31	0,07
4	Brown / Коричневый	0,33	0,19
5	Gray / Серый	0,28	0,16
6	White / Белый	0,18	0,06
7	Yellow / Желтый	0,34	0,08
8	Purple / Фиолетовый	0,29	0,11
9	Pink / Розовый	0,25	0,15
10	Aqua / Бирюзовый	0,32	0,09

Кроме того, по каждому из волокон была снята и записана рефлектограмма в файл в формате SOR. Данные файлы являются файлами-хранилищами измерений (рефлектограмм). Пример рефлектограммы показан на рисунке 38.

Отчет OTDR

Параметры трассы	
Начало: 0	Конец: 100
Кабель:	Волокно: Corning Импульс: 6 нс
Диапазон: 0,50 км	Кэфф. преломления: 1,4960
Длина волны: 850 нм (многомод)	Порог отражения: -65,000 дБ
Порог потерь: 0,020 дБ	Файл: MTP-10LC-013-8.sor
Дата измерения: 18.11.2015 12:08:07	
Рефлектометр: MTP 6000 S/N:	
Оптический модуль: MM850 S/N: 151615	
Комментарий:	

Результаты измерений	
Длина волокна: 99,33 м	Полные потери: 0,98 дБ
Затухание: 7,48 дБ/км	

Трасса OTDR

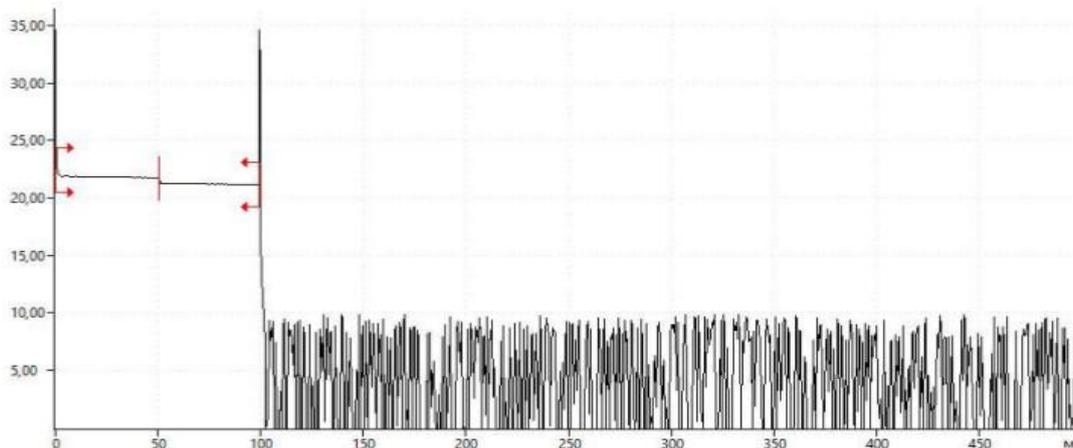


Таблица событий					
№	Тип события	Дистанция	Потери	Отражение	Затухание
1	Начало	0,00 м	0,31 дБ	-21,00 дБ	- - -
2	Неотраж. дефект	50,64 м	0,44 дБ	-47,02 дБ	2,82 дБ/км
3	Конец	99,33 м	0,23 дБ	-21,17 дБ	2,82 дБ/км

Рисунок 38 – Рефлектограмма №03 патч-корда №012.

На распечатке представлена в текстовом виде информация о дате и времени проведенных измерений, имени файла, типе и номере прибора и об основных параметрах измерений. Результаты измерений, а именно: общая длина волокна, полные потери и измеренное затухание представлены отдельно.

Графическая часть рефлектограммы в наглядной форме представляет информацию о распределении потерь вдоль оптической линии. При необходимости, меняя масштаб по оси X (длина), можно в деталях изучить требуемый участок волокна. Также отдельно отмечаются точки начала, конца линии, мест с особенностями и основные параметры этих точек.

Все рефлектограммы по каждому из волокон каждого из оптических кабелей распечатываются и анализируются на соответствие требованиям технического задания. Анализ проводится с помощью программы OTDRView (версия 2.026), обладающей широким набором возможностей. Исходные файлы в формате SOR хранятся на диске с данными о параметрах и результатах контроля качества специальных оптических кабелей.

10 Работы по модернизации специального программного обеспечения

10.1 Разработка программного обеспечения для непрерывного мониторинга в режиме «он-лайн» времени прихода сигналов в каналах ЖАК

С целью автоматизации мониторинга времен прихода сигнала по всем каналам ЖАК был написан пакет программ «LAr Time Monitoring» (LTM). Данный пакет автоматически отслеживает появление в соответствующей Базе Данных записей о набранных экспериментальных сеансах. После обнаружения новых данных вызывается программа анализа полученных значений времени прихода сигнала по всем каналам ЖАК. Полученные значения времен используются, например, для поправки (на уровне аппаратуры) среднего временного сдвига в FEB (см. рисунок 39).

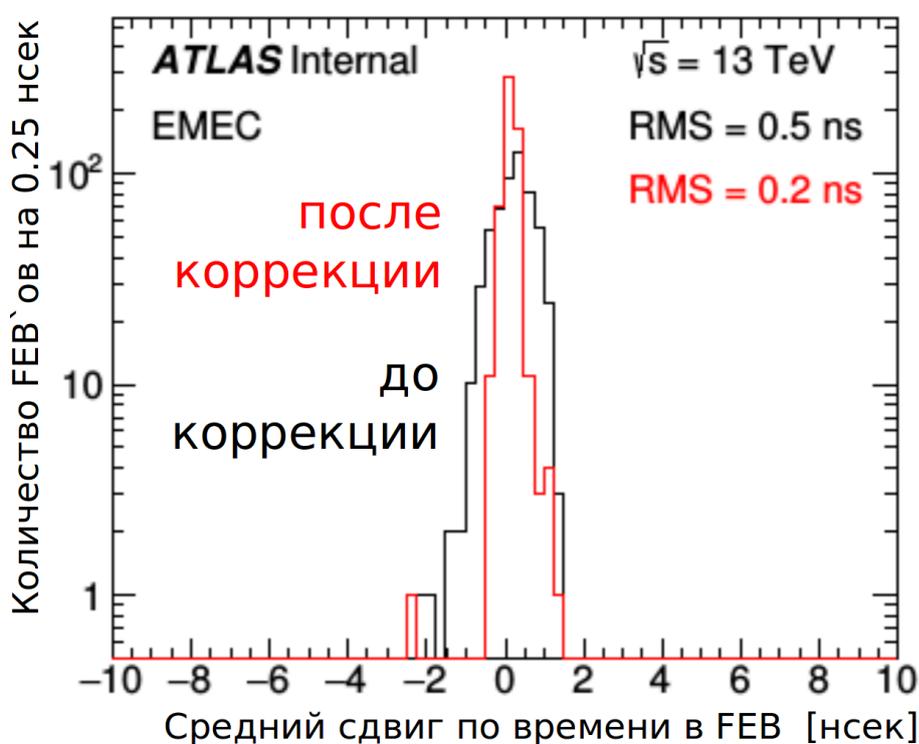


Рисунок 39 - Пример использования коррекции времени для улучшения разброса среднего времени прихода сигналов в платах камерной электроники (FEB) торцевого электромагнитного калориметра (EMEC).

Работа пакета LTM не требует участия оператора, результаты анализа (текстовые файлы) помещаются в определенное место для последующего рассмотрения экспертами. Контроль работоспособности пакета осуществляется узким кругом экспертов, данная информация не предназначена для дежурных в сменах.

10.2 Разработка программного обеспечения для быстрого детектирования каналов ЖАК с «нестандартной» формой импульса.

Для определения формы сигнала в каналах жидкоаргонового калориметра (далее ЖАК) используются калибровочные сеансы, имеющие тип Delay. Результатом данной калибровки является отклик (форма импульса) для каждого канала близкий к экспериментальным данным. Такие сеансы проводятся, как правило, с периодичностью один раз в неделю и регистрируют следующую информацию для каждого канала: максимальная амплитуда сигнала (A_{\max}), ширина сигнала (Width) и время прихода сигнала соответствующее значению A_{\max} .

Каждый канал соответствует определенной ячейке ЖАК. Алгоритм работы программы «Fast Finder of Bad Channels» (FFBC) построен на сравнении параметров ячеек имеющих одинаковые размеры и расположенных симметрично по азимутальному углу (φ) в ЖАК. Предполагается, что такие ячейки имеют параметры близкие друг другу. Таким образом, из каждого калибровочного сеанса типа Delay мы получаем распределение параметров A_{\max} и Width для ряда групп ячеек в ЖАК. В дальнейшем происходит анализ полученных распределений, в котором для каждого из трех параметров определяются их среднее положение (mean) и среднеквадратическое отклонение (sigma). Если один из трех параметров выходит за пределы $\text{mean} \pm 5\text{sigma}$, ячейка помечается как «плохая». В итоге получается список «плохих» ячеек, который содержит всю необходимую информацию, позволяющую точно идентифицировать данные каналы в ЖАК. Полученная информация используется для проведения финального анализа, как правило, он состоит в сравнении непосредственно формы сигнала конкретного «плохого» канала с эталоном (получаемым усреднением сигналов в «хороших» каналах).

Использование данной программы позволяет значительно сократить время на анализ данных, так как нет необходимости вручную просматривать большое количество каналов (около 180 тысяч), а сосредоточить внимание только на определенных каналах. В настоящее время программа запускается вручную для определенных калибровочных сеансов, выбранных оператором. Пример работы программы, определение «плохих» каналов, амплитуда либо форма сигнала в которых отлична от стандартной, показан на рисунке 40. Всего найдено около 120 «плохих» каналов, ведется работа по ремонту и замене неисправных элементов электроники.

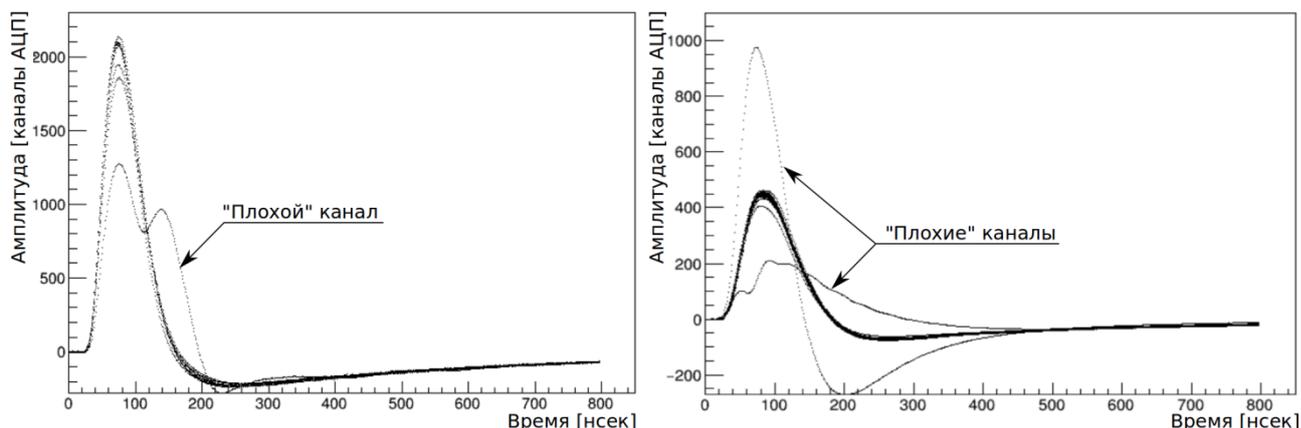


Рисунок 40 - Результат работы программы FFBC. Показаны найденные «плохие» каналы, которые имеют отличные от других каналов значения максимальной амплитуды и ширины сигнала.

Программа FFBC, как правило, запускается экспертами, но также возможен запуск ее дежурным. Для этого в командной строке на линуксовом кластере lxplus нужно набрать ffbc. Данная команда имеет следующий набор аргументов:

- -N номер калибровочного захода типа Delay;
- -L задание индекса для слоя ЖАК;
- -р печатать информацию об анализируемом заходе;
- -v выводить на экран подробную информацию о ходе обработки;
- -h вывод на экран справки о программе.

10.3 Отладка программ контроля на базе прототипа РС с использованием реальных данных измерений. Подготовка рабочей версии программ для первых образцов РС

Для контроля качества производимых камер Новых Малых Колес (НМК) создается стенд на основе автоматизированного рентгеновского сканера (РС). Важным компонентом стенда является его программное обеспечение (ПО). К настоящему времени создана тестовая версия ПО для рентгеновского сканера. Разрабатываемое ПО представляет собой графический пользовательский интерфейс, с помощью которого оператор может управлять работой сканера и представлять полученные результаты сканирования мюонных камер в удобном для пользователя виде. Общий вид графического интерфейса представлен на рисунке 41. ПО написано на основе библиотек пакета ROOT и может работать на компьютерах с операционными системами Windows или Linux.

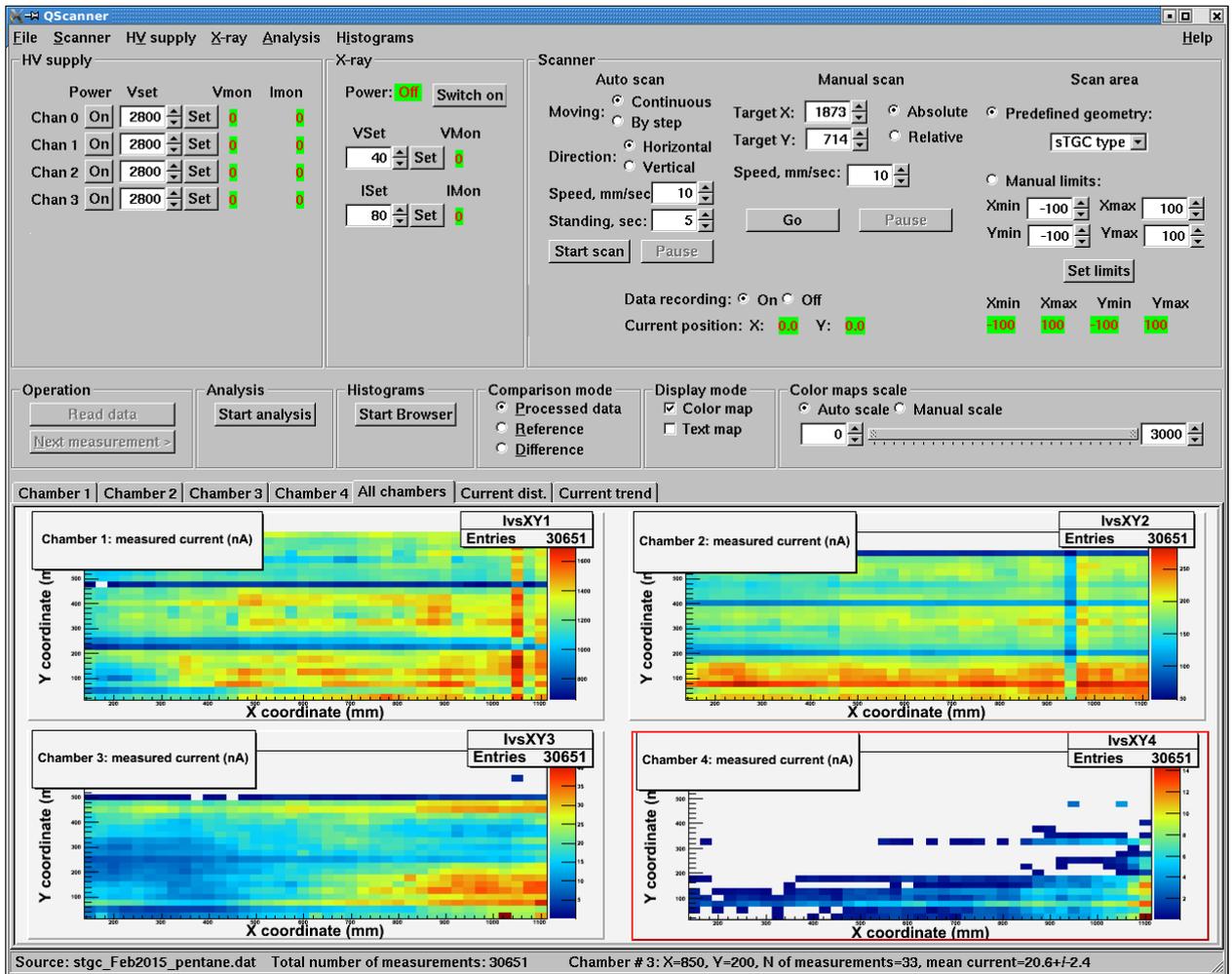


Рисунок 41 - Общий вид GUI (графического интерфейса пользователя) программы для комплекса на основе рентгеновского сканера.

Разрабатываемое ПО содержит в своем составе несколько компонентов: это управление собственно работой сканера (шаговые двигатели, рентгеновская трубка, источник высоковольтного питания и мультиметр), обработка и визуальное представление результатов процесса сканирования, а также их сохранение в базе данных. Поскольку в ФИАНе у нас нет полномасштабных мюонных камер, то для отладки программы используются данные измерений, проведенных с полномасштабными камерами в ручном режиме в ЦЕРН. На рисунках 42 и 43 приведены примеры обработанных результатов измерений в двух мюонных камерах квадруплета.

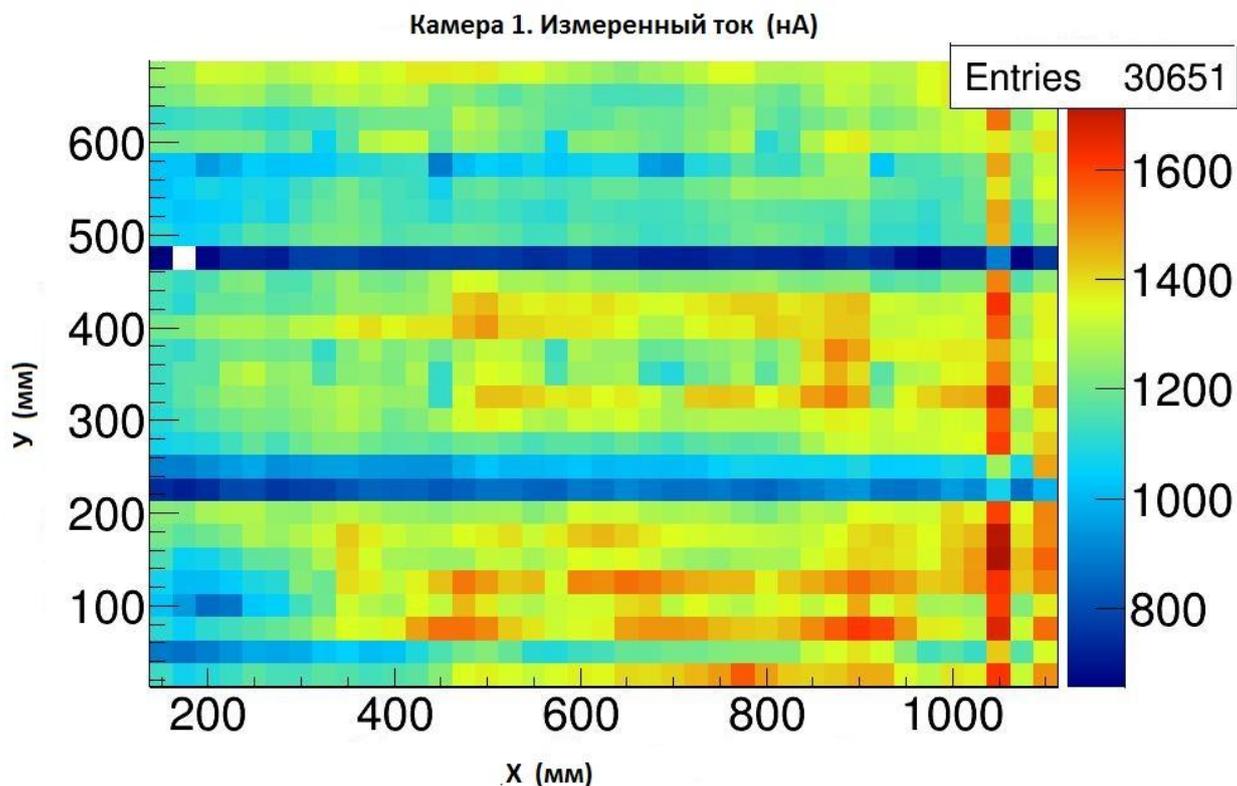


Рисунок 42 – Цветовая карта, представляющая результаты измерения тока в камере № 1. Цвет каждой точки отражает величину измеренного тока в нА в соответствии с цветовой шкалой справа. По осям X и Y отложены соответственно X и Y координаты точки облучения камеры в мм.

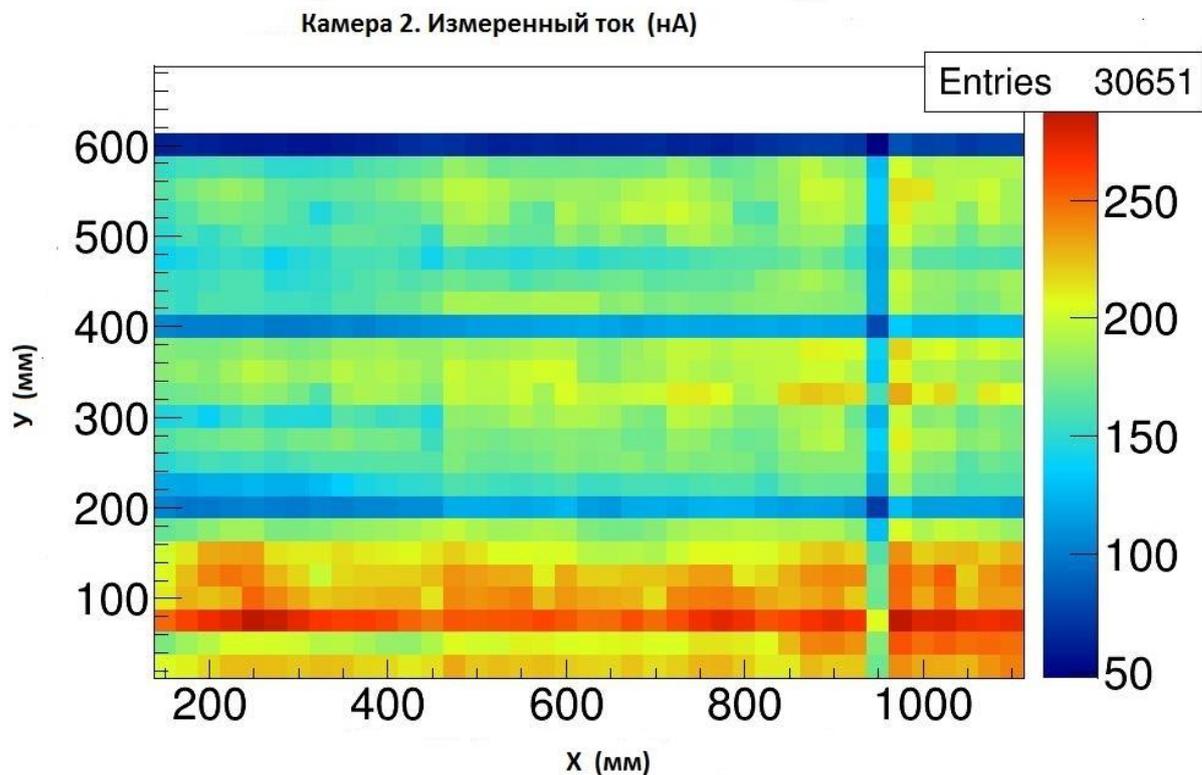


Рисунок 43 – Цветовая карта, представляющая результаты измерения тока в камере № 2.

Данные здесь представлены в виде «цветовой карты», где каждая точка отражает измеренный при облучении ток – в соответствии с цветовой шкалой справа. На обоих рисунках горизонтальные линии сине-голубого цвета связаны с конструктивными особенностями камер (ребра жесткости в данном месте). Видимая вертикальная полоса при координате $X=1050$ на рисунке 42 свидетельствует о вероятной проблеме с анодной проволокой камеры в этом месте (возможно, повышенное газовое усиление из-за провисания проволоки). Напротив, пониженные значения измеренного тока при $X=950$ на рисунке 43 могут свидетельствовать о падении газового усиления или даже возможном обрыве проволоки в данном месте. Такой вид представления результатов сканирования позволяет очень быстро и наглядно выявлять проблемные области в камерах и при необходимости – отбраковывать на начальном этапе производства, до установки на камеры дорогостоящей электроники.

В настоящее время подготовлена рабочая версия программы для управления рентгеновским сканером. Помимо описанной выше компоненты, связанной с визуализацией результатов сканирования, программа также управляет шаговыми двигателями сканера, перемещающими каретку с рентгеновской трубкой, управляет и контролирует работу рентгеновской трубки, а также высоковольтного источника.

Программа проходит испытания на первых двух образцах сканеров, подготовленных к настоящему времени в Москве. Окончательная отработка программ, как предполагается, будет проведена в начале 2016 года в ЦЕРН, куда будут перевезены сканеры для проведения их тестирования с полномасштабными мюонными камерами.

10.4 Развитие пользовательского интерфейса управления программами информационной системы АГИС в условиях высоких нагрузок

Компьютерная модель эксперимента АТЛАС базируется на использовании современной Грид инфраструктуры - технологии географически распределенных параллельных вычислений, также известной как грид-вычисления или грид-сети. Ключевым информационным звеном в распределенной системе обработки эксперимента является информационная ГРИД система AGIS (ATLAS Grid Information System), описывающая компьютерную модель всех вычислительных ресурсов эксперимента.

Взросший поток данных с детектора требует совершенствования матобеспечения систем распределенной обработки и передачи данных эксперимента АТЛАС. В свою очередь, развитие и расширение распределенной системы обработки затрагивают также модернизацию и информационного обеспечения ГРИД сети - системы AGIS.

Информационная система представляет собой совокупность технического и программного обеспечения, осуществляющего централизованное хранение различных конфигурационных параметров, статических и динамических данных, необходимых для настройки, управления и функционирования систем и сервисов распределенной грид-сети эксперимента АТЛАС. Для осуществления контроля и управления этими данными информационная система предоставляет пользовательские WebUI (Web User Interface) и CLI (Command Line Interface) интерфейсы, а также интерфейс прикладного программирования API (Application Programming Interface). Данный этап работ был посвящен развитию пользовательского WebUI интерфейса управления.

WebUI интерфейс представляет собой совокупность средств, при помощи которых пользователь взаимодействует с информационной системой через Web браузер. Пользовательский WebUI интерфейс управления включает в себя инструментарий (набор интерактивных HTML страниц и форм) для регистрации новых объектов в системе (например, создание новой грид-службы, вычислительного ресурса, или элемента хранения данных), а также позволяет визуализировать содержимое базы данных информационной системы в удобном для пользователей виде. Например, администраторы грид-сайтов эксперимента АТЛАС непосредственно используют WebUI для обновления информации о ресурсах сайта (ATLAS Site), настройки параметров PandaQueue объектов запуска заданий системы PandDA (The PanDA Production ANd Distributed Analysis system), создания и редактирования информационных DDMEndpoint объектов системы хранения данных DDM (Distributed Data Management System).

С точки зрения технической реализации WebUI интерфейс управления системы фактически является веб-приложением, серверная часть которого написана на языке программирования python, используя фреймворк разработки веб-приложений Django. Клиентская часть интерфейса, помимо стандартных конструкции языка HTML и CSS, также использует AJAX функционал для создания интерактивных страниц с динамической загрузкой данных с сервера.

Одним из важных требований, предъявляемых к WEB интерфейсу, является функционал для проверки и валидности данных, введенных пользователем. Данный уровень защиты препятствует вводу в систему заведомо неправильных данных как на уровне соответствия типов, так и на уровне допустимых значений определенного параметра. Например, при регистрации новой АТЛАС службы (сервиса) в системе, необходимо предоставить строго определенный набор входных данных, при этом идентификатор ресурса должен иметь строго предопределенный формат, а грид-узел, для которого создается сервис, должен быть уже зарегистрирован в базе информационной системы. В ходе работ были

обновлены и расширены модули валидации данных на стороне сервера, введенных пользователем через формы HTML страниц сайтов.

В рамках данного этапа работы было произведено обновление табличного вывода данных (используя библиотеку JQuery, datatable) и их структурного отображения в виде дерева элементов. В ходе расширения информационной модели AGIS - внедрения новых информационных объектов в систему - был также расширен пользовательский интерфейс и реализован соответствующий функционал со стороны WebUI приложения.

В качестве примеров можно привести разработку и реализацию пользовательских форм (а также их соответствующие серверные модули) для создания и редактирования конфигурации вычислительных ресурсов нового типа HTCCondor-CE в эксперименте АТЛАС, и нового типа ресурса хранения, использующего технологию Object Store.

10.5 Разработка алгоритма идентификации электронов для ТДПИ при повышенной светимости БАК

Идентификация электронов в эксперименте АТЛАС представляет собой крайне важную задачу, поскольку от качества подобной идентификации напрямую зависит эффективность большого количества анализов экспериментальных данных (например, анализ процесса $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$). В эксперименте АТЛАС идентификация электронов особенно эффективно может быть выполнена с использованием Трекового детектора переходного излучения (ТДПИ).

Главной целью работы по данному направлению была разработка и оптимизация новых алгоритмов идентификации электронов для ТДПИ при повышенной светимости БАК. Существующий алгоритм идентификации, который использовался в течение первого периода работы БАК, основан на анализе отношения числа хитов с высоким порогом к числу хитов с низким порогом для конкретного трека. Величина этого отношения и служила дискриминатором типа частиц, поскольку электроны, пролетающие через ТДПИ, оставляют в рабочей области детектора много больше хитов с высоким порогом, нежели пионы. Это так называемый Метод отношения высокого порога (*High threshold fraction method* или, сокращённо, *fHT method*).

Метод отношения высокого порога является точным лишь в том случае, если вероятность возникновения хита с высоким порогом одинакова для всего объёма детектора. Однако, исследования, проведённые в рамках данной работы, показали, что это не так. Вероятность возникновения хита с высоким порогом является функцией многих параметров, таких как Z/R-позиция трека в детекторе, расстояния от трека до проволоки, загрузки детектора и так далее. В связи с этим был предложен новый алгоритм

идентификации, который получил название Метод правдоподобия (*Likelihood method*). Суть данного метода заключается в том, что вероятность возникновения хита с высоким порогом больше не принимается постоянной величиной, а является функцией многих параметров (2):

$$p_{HT} = p_{HT}(\gamma, T2W, Z/R, SL), \quad (2)$$

где γ – гамма-фактор пролетающей частицы, $T2W$ – расстояние от трека до проволоки, Z/R – позиция трека в детекторе, SL – номер блока ТДПИ, через который пролетает частица. Конкретная реализация метода правдоподобия может быть выполнена несколькими различными способами. Реализация этого метода, использованная в данной работе, основана на формуле (3).

$$p_{HT} = p_{HT}(\gamma) \cdot CF_{T2W} \cdot CF_{Z/R} \cdot CF_{SL}, \quad (3)$$

где $p_{HT}(\gamma)$ – начальные значения, характеризующие зависимость вероятности возникновения хита с высоким порогом от гамма-фактора пролетающей частицы, CF_i – коррекционные факторы, учитывающие зависимость вероятностей возникновения хитов с высоким порогом от перечисленных выше параметров. В нашей работе все необходимые коррекционные факторы были определены с использованием данных с БАК, полученных при распадах Z -бозонов в пару электронов и мюонов в 2012 году. Пример одной из таких коррекционных гистограмм изображён на рисунке 44.

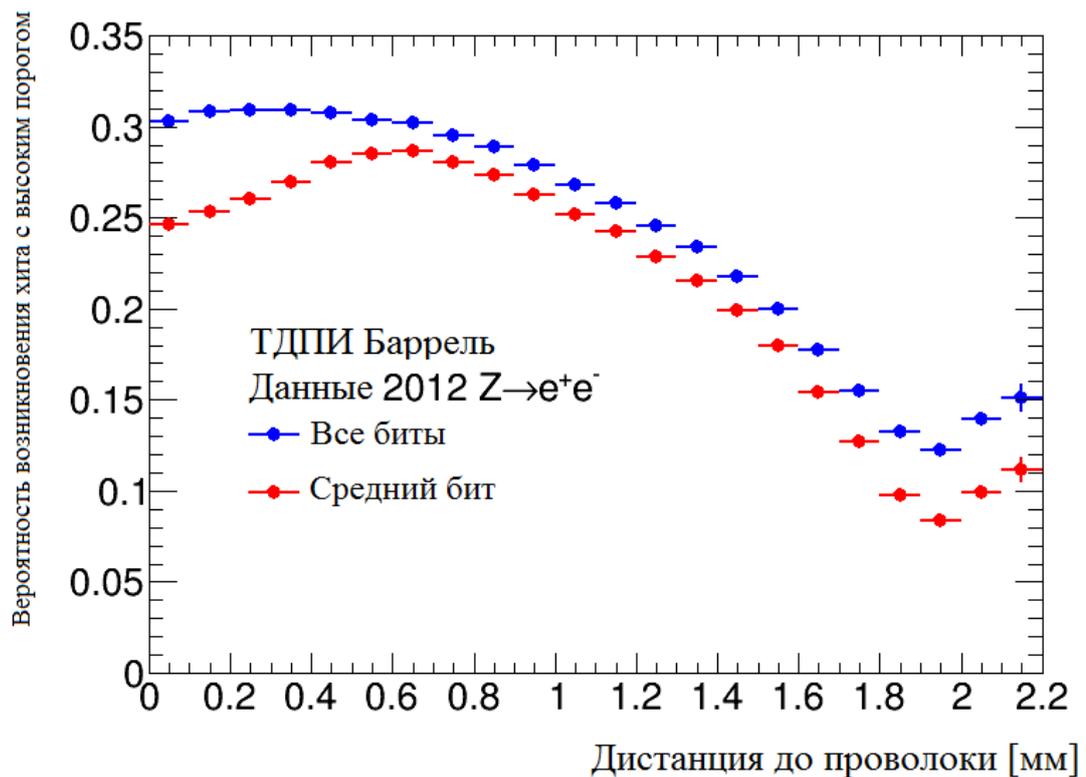


Рисунок 44 - Зависимость вероятности возникновения хита с высоким порогом от расстояния до проволоки в дрейфовой трубке для электронов.

Как легко видеть, зависимость вероятности возникновения хита с высоким порогом достаточно сильно изменяется в своей области определения (более, чем в три раза). В связи с этим, можно ожидать значительного итогового улучшения электронной идентификации при корректном учёте всех рассматриваемых параметров.

Поскольку загрузка ТДПИ в течение второго периода работы БАК будет существенно увеличена, необходимо разработать методы, позволяющие свести эффекты высокой загрузки к минимуму. Для этого было предложено использовать информацию лишь со среднего временного бита, соответствующего 25-наносекундному интервалу записи данных между столкновениями протонов (так называемый Middle high threshold bit), вместо 75-наносекундного временного интервала, использованного в течение первого периода работы БАК (All high threshold bits). Поскольку сужение временного интервала записи данных не только приводит к снижению эффективной загрузки детектора, но и, теоретически, может привести к ухудшению идентификации за счёт потери части данных, необходимо было проверить, не ухудшается ли идентификация электронов при подобном подходе. В связи с этим все полученные результаты были получены как с использованием среднего бита записи данных, так и с использованием всех битов.

Основные результаты данной работы приведены на рисунках 45 – 47.

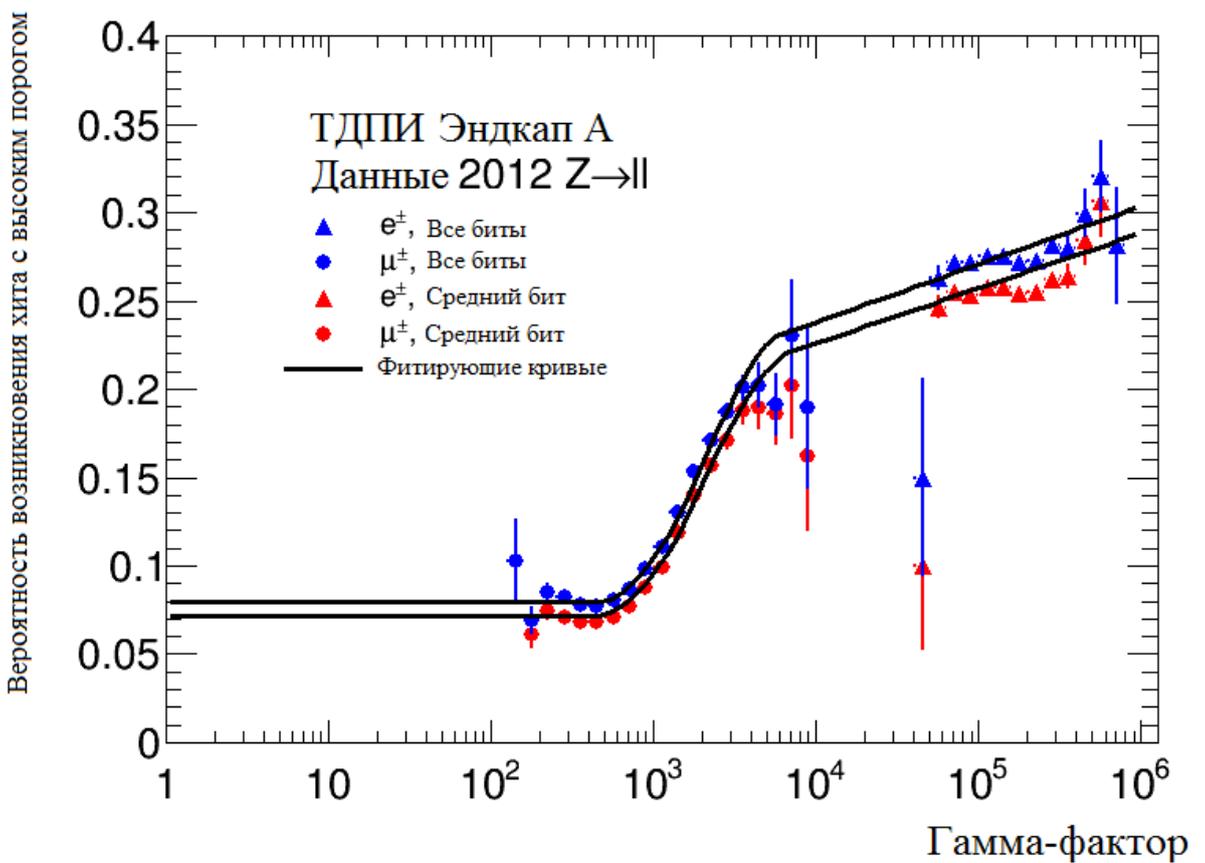
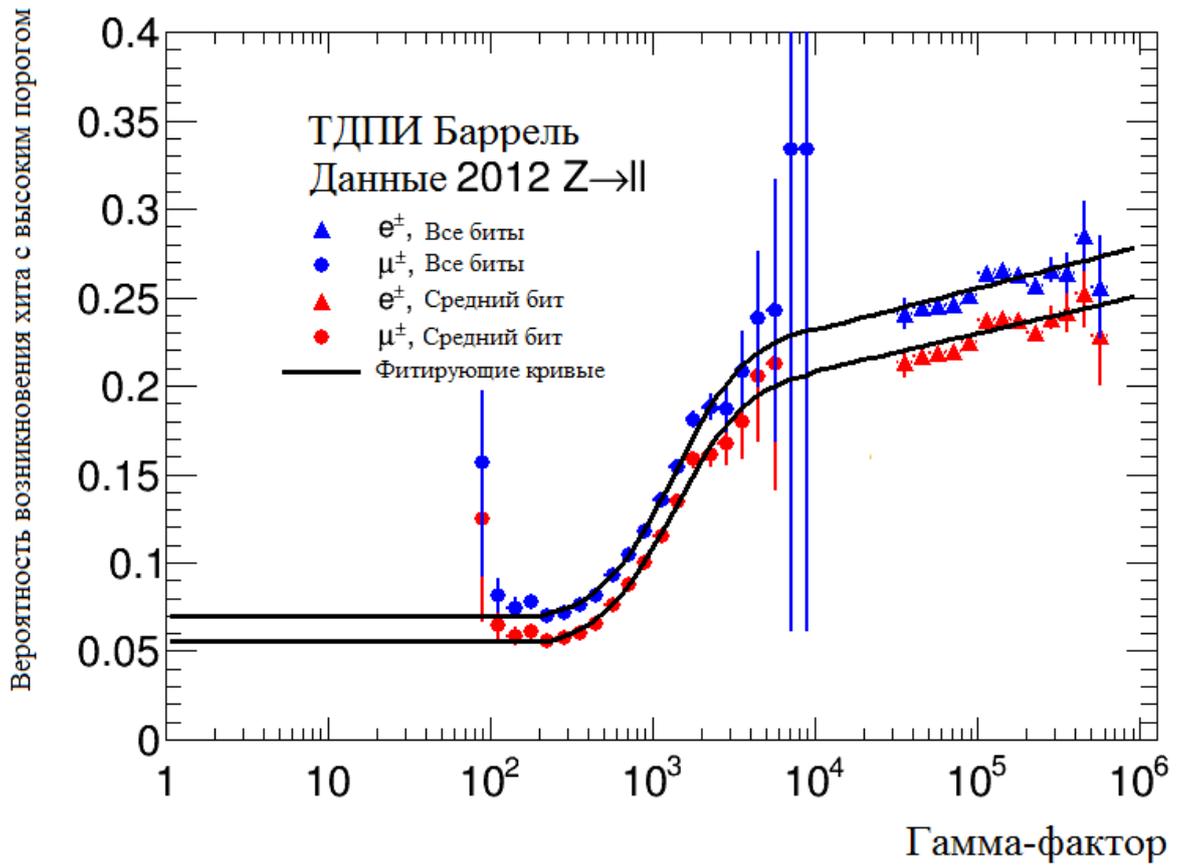


Рисунок 45 - Кривые зависимости рНТ от гамма-фактора частиц для барреля (сверху) и эндкапа А (снизу) для электронов и мюонов.

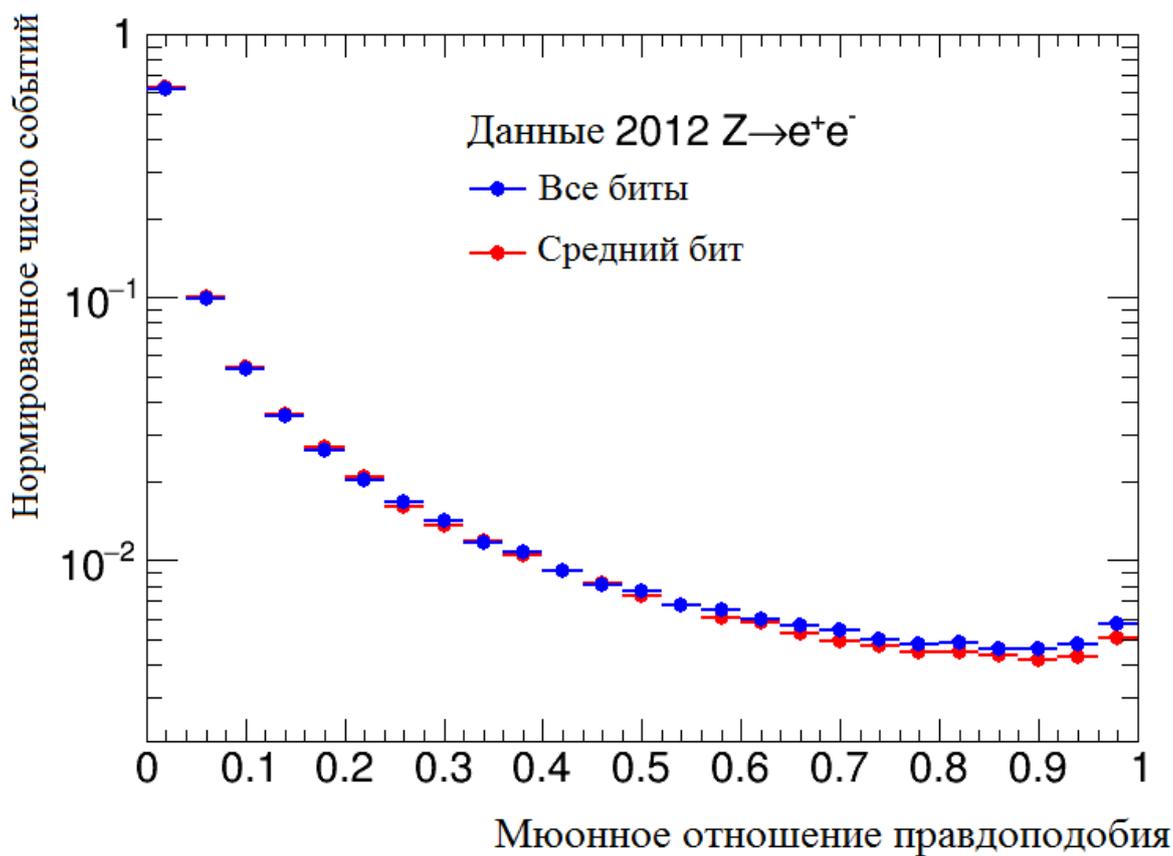
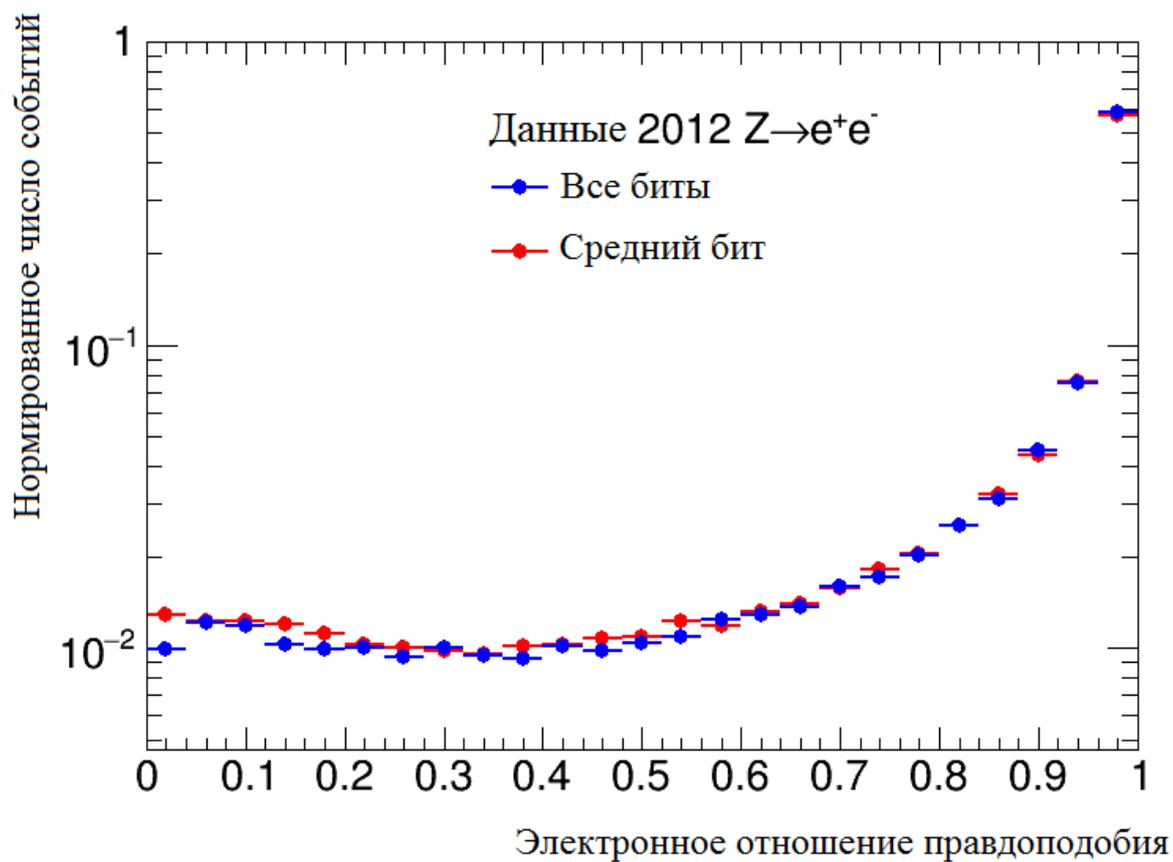


Рисунок 45 - Гистограммы электронных (сверху) и мюонных (снизу) отношений правдоподобия для среднего бита и всех битов.

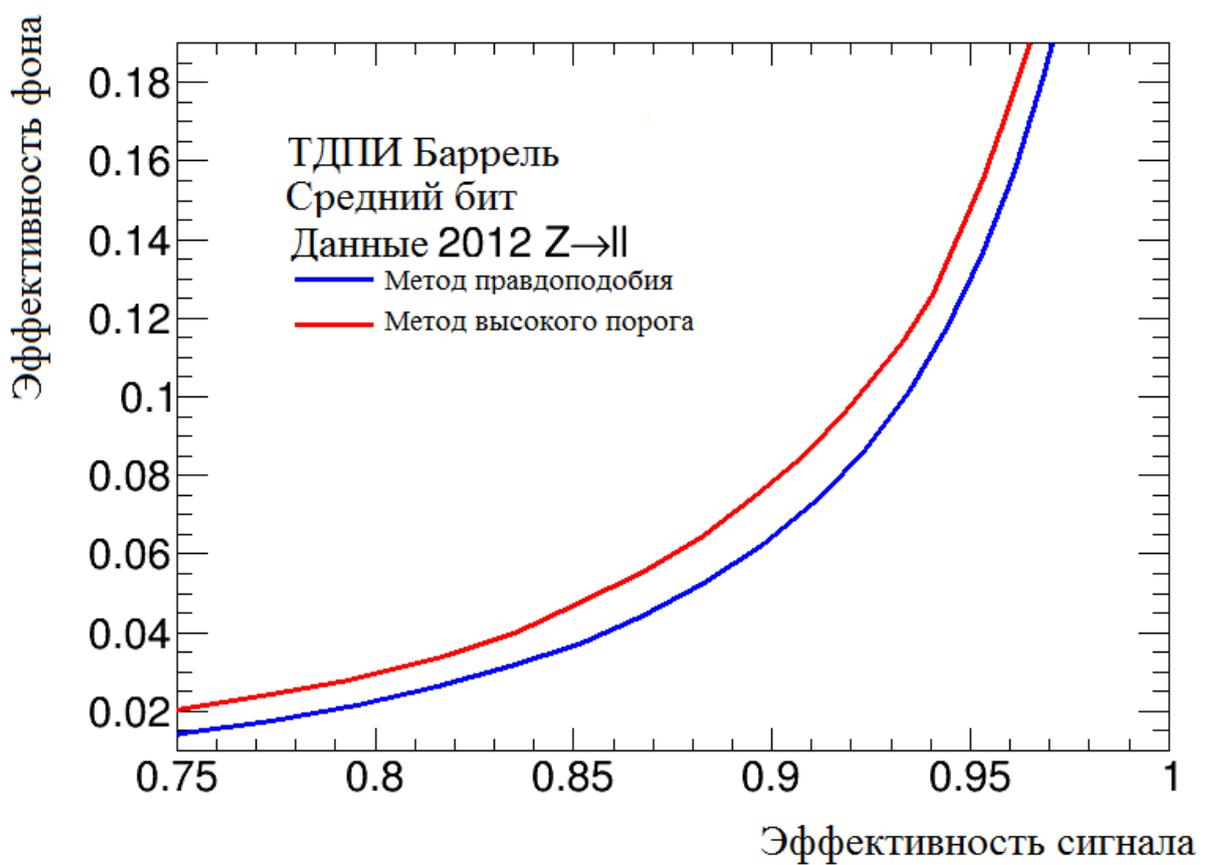
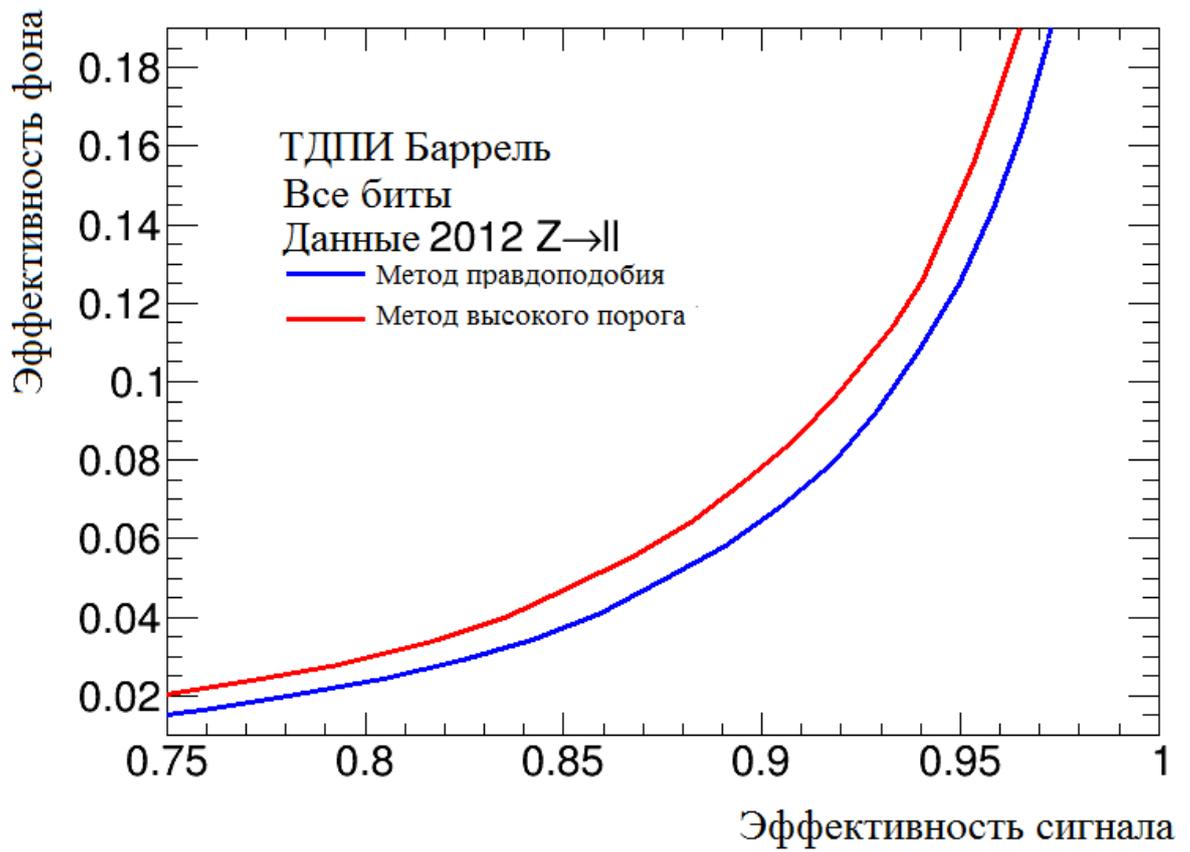


Рисунок 47 - Кривые ошибок для всех битов (сверху) и среднего бита (снизу).

На рисунке 45 приведены графики зависимости вероятности возникновения хитов с высоким порогом от гамма-фактора пролетающих частиц. Эти кривые были использованы для получения начальных вероятностей, фигурирующих в метода правдоподобия. Затем, для каждого хита на анализируемых треках были проведены соответствующие коррекции вероятностей в зависимости от рассматриваемых параметров ($T2W, Z/R, SL$).

После этого, используя формулу (3), были вычислены так называемые отношения правдоподобия, которые показывают, насколько правдоподобной является электронная и пионная гипотезы.

$$P_{e,\pi} = \frac{P_{track}^{e,\pi}}{P_{track}^e + P_{track}^\pi} \quad (3)$$

Распределения по отношениям правдоподобия, нормированные на единицу, приведены на рисунке 46.

Наконец, на рисунке 47 приведены кривые ошибок, демонстрирующие эффективность нового алгоритма идентификации электронов, при использовании среднего бита и всех битов. Легко видеть, что с использованием метода правдоподобия можно добиться более высокой производительности электронной идентификации, нежели с использованием метода высокого порога.

Таким образом, анализируя полученные результаты, можно с определённой уверенностью сказать, что использование среднего временного бита записи данных вместо всех битов практически не ухудшает качество электронной идентификации, однако позволяет значительно уменьшить эффекты высокой загрузки детектора. Предложенный метод идентификации электронов (метод правдоподобия) с использованием среднего временного бита может быть использован в течение второго периода работы БАК и позволит достичь лучшей производительности электронной идентификации, нежели использованный ранее метод высокого порога.

10.6 Оптимизация алгоритмов трекинга во внутреннем детекторе с учетом изменяющихся условий, таких как добавление нового слоя кремниевых детекторов, использование различных газовых смесей в различных модулях ТДПИ

После успешного запуска и первого сеанса набора данных ускоритель БАК был приостановлен для выполнения необходимого технического обслуживания и модернизации. Эксперимент ATLAS также использовал этот период для ремонта и дальнейшего развития, как аппаратных систем детектора, так и его программного обеспечения [4]. Следующий период набора экспериментальных данных происходит в условиях увеличения энергии столкновений и светимости. Это имеет особое значение для программного обеспечения трекинга, ответственного за реконструкцию траекторий

заряженных частиц, и которое потребует существенно большего процессорного времени из-за обработки дополнительных комбинаторик, вследствие возросшей множественности событий. Для этого необходимо предпринять шаги, чтобы в рамках имеющихся вычислительных ресурсов сохранить высокую производительность программного обеспечения. Для этого были выполнены работы по внесению изменений в Модель данных событий (EDM) [5], замене математической библиотеки на более быструю Eigen, и принятию нового формата выходных данных xAOD [6]. Но также большое значение имеет выполненная оптимизация алгоритмов трекинга в связи с введением в эксплуатацию нового слоя кремниевых детекторов IBL (Insertable B-Layer) [7].

Для увеличения физического потенциала ускорителя, его светимость будет повышаться в несколько этапов до 2022 года. Это приведет к значительному увеличению плотности треков, что сильно влияет на производительность внутреннего слоя пиксельного детектора АТЛАС. Кроме того, радиационные повреждения и технические поломки, произошедшие за предыдущее время работы, ухудшили производительность пиксельного детектора. По этой причине было принято решение о вводе в эксплуатацию четвертого слоя детектора IBL, установленного внутри пиксельного детектора (Pixel).

Также открывшиеся газовые течи сказались на эффективности детектора ТДПИ. Однако данный негативный эффект удалось минимизировать, выполнив настройку и калибровку электроники “аргоновых” и “криптоновых” модулей.

Первым этапом в реконструкции трека является формирование т.н. “семян” - фрагментов треков на основе 3-4 расположенных рядом попаданий в различные элементы во Внутреннем детекторе. Далее на основе полученных “семян” формируются кандидаты на трек. В таблице 4 приведены проценты “семян”, которые дают «хороший» (удовлетворяющий различным критериям качества) трек для различных типов семян на основе трех попаданий:

PPP - только пиксельный детектор,

PPS и PSS - детекторы Pixel и SCT,

SSS - только детектор SCT.

Таблица 4. Процент “семян”, давших реконструкцию «хорошего» трека, во время первого запуска ускорителя (Run 1) (верхний ряд) и второго запуска (Run 2) (нижний ряд) для конфигураций со значениями наложения событий $\mu = 0$ и 40. P - представляет попадание в пиксельном детекторе (Pixel), S – попадание в детекторе SCT, и I - дополнительное четвёртое попадание любого типа

μ	PPP	PPS	PSS	SSS
0	57%	26%	29%	66%
40	17%	6%	5%	35%
μ	PPP+I	PPS+I	PSS+I	SSS+I
0	79%	53%	52%	86%
40	39%	8%	16%	70%

Значения получены для величин наложения событий $\mu = 0$ и 40. Ввод в эксплуатацию слоя IBL позволит применить более жесткие требования к “семенам”, а именно возможность выбора семян с учетом попадания в новый слой кремниевого детектора, что поможет смягчить эффект увеличения наложений событий [8]. При этом в случае наиболее эффективных типов семян (3 попадания в трех слоях детектора SCT плюс 1 дополнительное попадание) количество “хороших семян” увеличилось по отношению к предыдущей конфигурации при нулевом наложении $\mu = 0$.

10.7 Оптимизация критериев выделения контрольных областей для поиска новой физики в процессах парного образования калибровочных бозонов при высоких светимостях

В рамках данного проекта проводится поиск резонансов в системе двух векторных бозонов, путём анализа конечных состояний $W(l\nu)V$ и $Z(l)lV$, где V – векторный бозон W или Z , распадающийся по адронному каналу.

Наличие сигнала определяется по превышению количества событий над фоном. Поэтому при поиске сигналов от физики за рамками Стандартной модели очень важно хорошо знать фон. В качестве моделей для поиска резонансов в системе двух бозонов рассматриваются варианты образования W^{\prime} -бозона с распадом на WZ и гравитона с распадом на WW или ZZ . Основными фоновыми процессами являются процессы образования W - или Z -бозона в сопровождении струй и процесс образования пары топ—анти топ-кварков. Процесс парного образование векторных бозонов имеет существенно меньшее сечение и оценивается по моделированным событиям.

Основная стратегия определения фонов состоит в определении контрольных областей для каждого из фонов. Для определения каждой контрольной области подбирается такая кинематическая область, в которой заведомо не будет событий от сигнального процесса, а основная доля событий идет только от одного фонового процесса. Далее проверяется, насколько хорошо события в данной области описываются моделированными данными и, при необходимости, вносятся поправочные коэффициенты на общую нормировку.

Поиск новых объектов проводится в сигнальной области, которая определяется как область с максимальной чувствительностью к сигналу. Контрольные области должны быть кинематически расположены максимально близко к сигнальной области, чтобы уменьшить систематическую неопределенность связанную с экстраполяцией.

Схема сигнальной области (SR) и контрольных областей для процесса образования векторного бозона в сопровождении струй (WR) и образования пары топ-анти топ кварков (TR) представлена на рисунке 48.

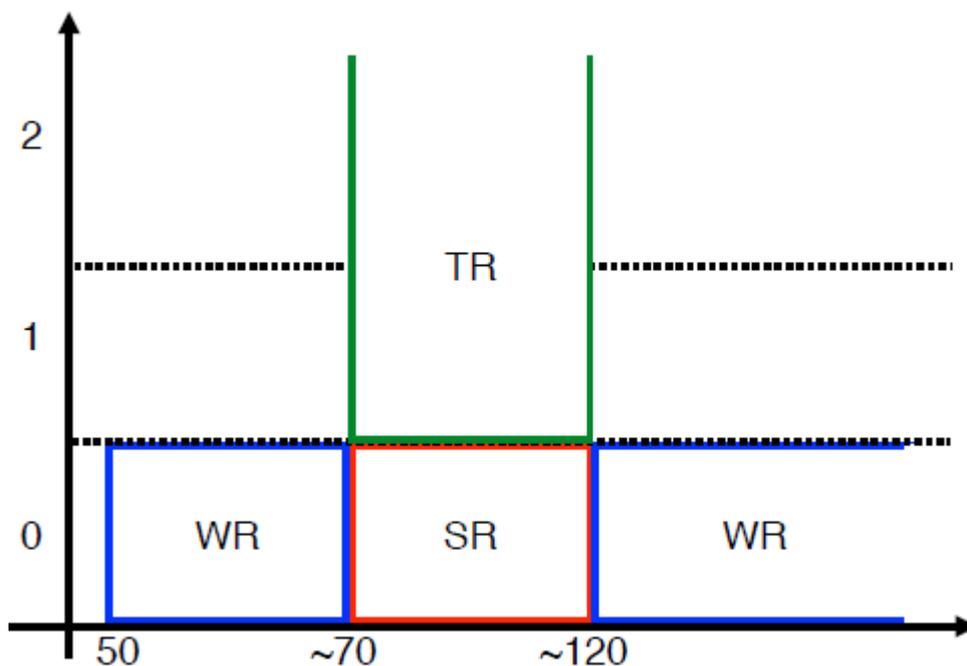


Рисунок 48 - Схема расположения сигнальной и контрольных областей. По горизонтальной оси – масса струи, по вертикальной – число b-струй

События, отобранные для анализа, должны содержать либо один лептон для моды WV либо два лептона для случая ZV . Регистрация распада второго векторного бозона по адронной моде проводится с помощью струй. Поскольку наибольший интерес представляет область больших масс резонансов, продукты их распадов будут иметь большой поперечный импульс. Кварк и антикварк из распада векторного бозона с

большим поперечным импульсом будут иметь близкие углы, поэтому идентификация по отдельности струй для кварка и антикварка будет иметь невысокую эффективность, поскольку струи будут перекрываться. Более эффективно проводить поиск струи большого радиуса, в который попадут струи и кварка и антикварка. В струю большого диаметра попадут не только продукты распада векторного бозона, но и частицы от других взаимодействий при пересечении протонных сгустков, а также частицы из подложки жесткого процесса. Для улучшения свойств реконструкции струи от векторного бозона проводится один из алгоритмов “очистки” (grooming) струи. На основе анализа смоделированных данных был выбран метод отделки (trimming), в котором кластеры, использованные для получения струи большого радиуса, используются для восстановления струй малого диаметра. На следующем этапе струи, несущие малую долю f от полного импульса струи, удаляются из анализа. Анализ моделированных данных показал, что наилучшие результаты получаются при малом радиусе 0,2 и минимальной доле 0,05. Отобранные события должны содержать струю большого радиуса с минимальным поперечным импульсом 200 ГэВ и иметь модуль псевдобыстроты менее 2. Последнее условие связано с необходимостью иметь как калориметрическую информацию о компонентах струи, так и трековую. На следующем этапе осуществляется “мечение” струи – определяется значение переменной, распределение по которой наиболее различается для струй от векторных бозонов и фоновых КХД струй. В качестве такой переменной в данных анализах выбран дискриминатор D_2 . Также оптимизируется отбор по массе широкой струи. Это позволяет при 50% эффективности отбора событий от сигнала удалить 98% фона.

Сигнал образования W' или гравитона ищется по пику в распределении по инвариантной массе WV (рисунок 49) или ZV .

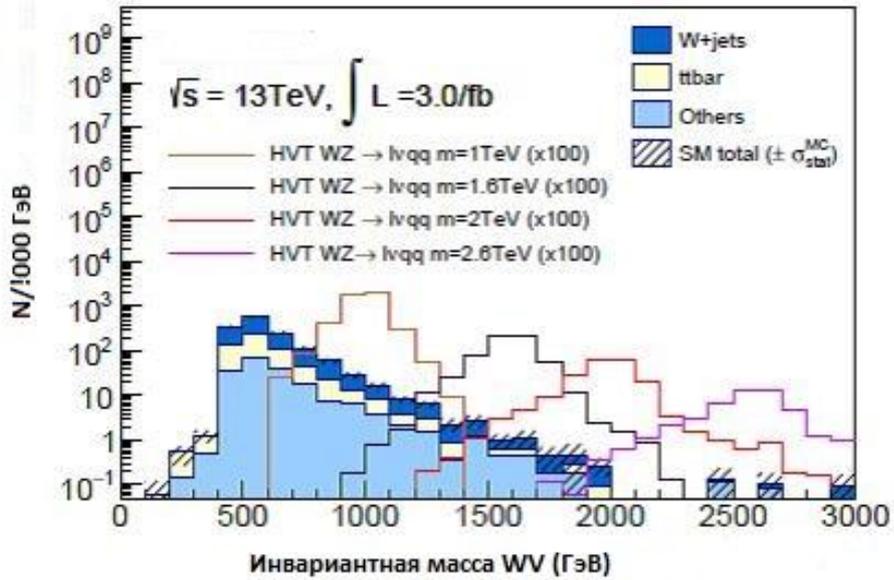


Рисунок 49 - Инвариантная масса WV , нормированная на светимость 3 обратных фемтобарна. На рисунке показаны фоновые процессы (W +струи), фон от пары топ-анти топ кварков. Также показаны возможные сигналы от W' при массах W' 1, 1,5, 2,0 и 2,5 ТэВ. Спектры сигналов увеличены в 100 раз.

Контрольная область для процесса образования пары топ-анти топ кварков отличается от сигнальной области требованием наличия по крайней мере одной струи, помеченной как b -струя. Поскольку топ кварк распадается на W -бозон и b -кварк требование наличия b -струи выделяет процесс образования пары топ-анти топ весьма эффективно.

На рисунке 50а показано распределение по множественности b -струи в контрольной области топ кварка.

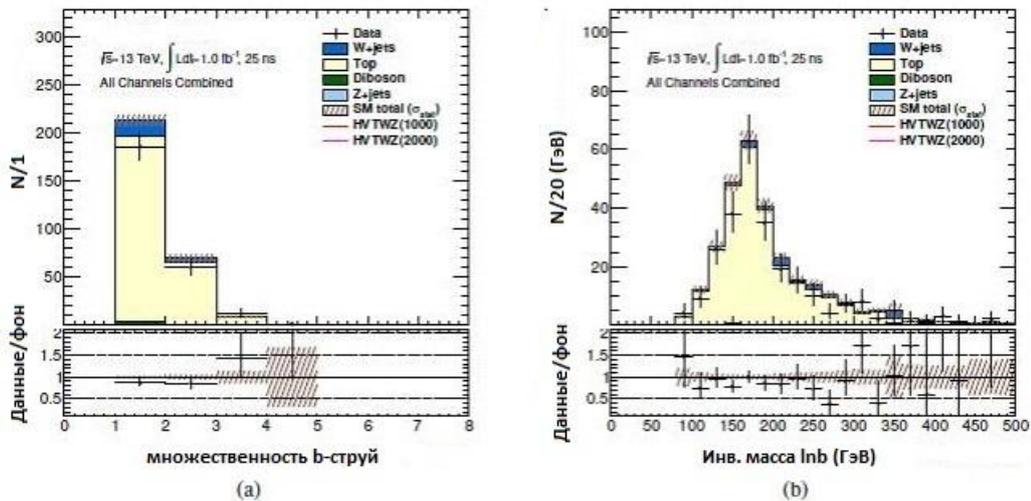


Рисунок 50 – Распределения для контрольной области топ кварка: (а) - множественность b -струи, (б) - спектр инвариантной массы W -бозона и помеченной b -струи.

Из рисунка видно хорошее согласие результатов моделирования с экспериментальными данными и что отобранные события в подавляющем большинстве идут от процесса образования пары топ-антитоп кварков. На рисунке 50b показано распределение инвариантной массы лептона, нейтрино и струи, помеченной как b-струя. В распределении хорошо виден сигнал от топ-кварка.

Во всех контрольных областях проведена тщательная проверка на правильность описания моделированными событиями реальных данных. Получено хорошее согласие моделированных данных с данными полученными в эксперименте.

Контрольная область для фона от образования векторного бозона в сопровождении струй определяется так же как и сигнальная за единственным исключением – масса широкой струи должна быть в интервале 50-70 ГэВ, либо более 120 ГэВ. Таким образом исключается попадание сигнала в эту контрольную область. Большая часть событий, отобранным по этим критериям, идет именно от процесса образования векторного бозона со струями, но существенную часть на уровне 30% составляют события от процесса образования пары топ-антитоп кварков. Это связано с тем, что в этом процессе в распадах присутствуют W-бозоны, а процедура мечения имеет эффективность на уровне 50%.

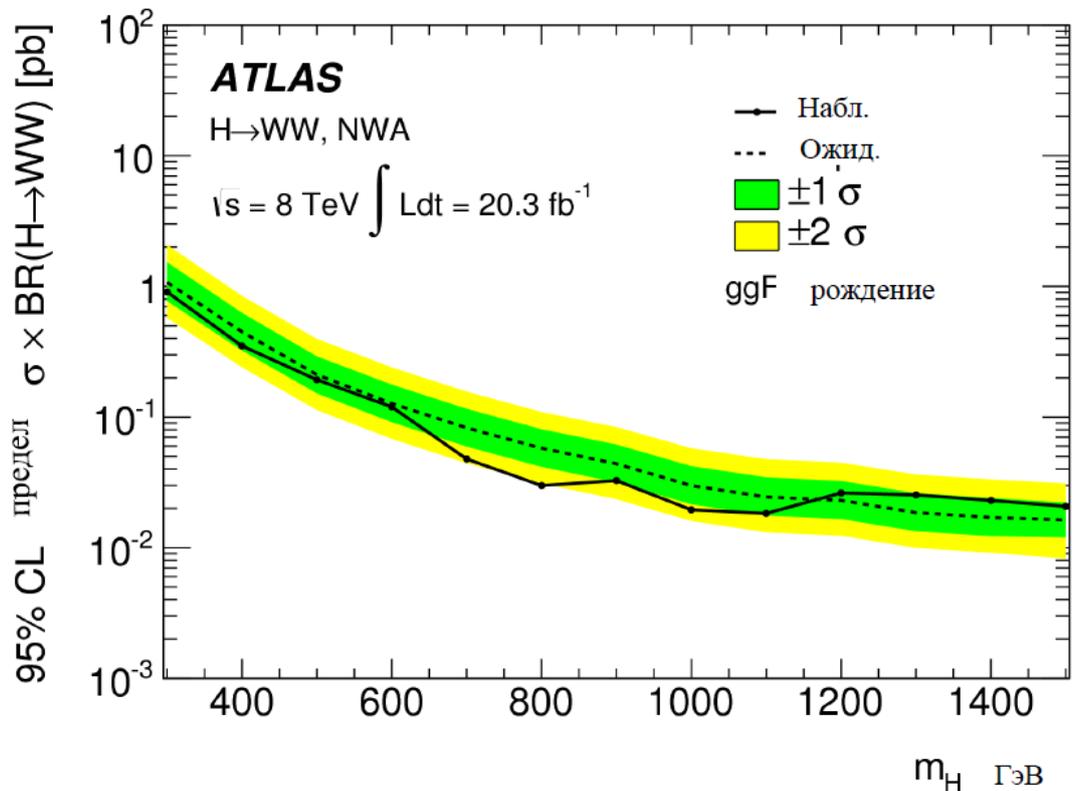
Еще одним возможным источником фона являются многоструйные события, в которых струя может быть неправильно идентифицирована как лептон. Вероятность такой неправильной идентификации очень мала, но с учетом очень большого сечения процесса образования нескольких струй необходимо проверить его вклад в анализируемые спектры. Сделать это по моделированным событиям невозможно – потребовалась бы моделирование гигантского количества событий, превышающее вычислительные возможности сотрудничества. Но даже в этом случае осталась бы большая неопределенность, связанная со степенью знания детектора. Фоны такого рода оцениваются по реальным событиям. С этой целью меняются критерии отбора событий, при которых доля таких фонов должна быть существенно выше. В этих контрольных областях строятся распределения, которые являются шаблонами для определения доли такого фона. Затем для сигнальной области с помощью шаблонных распределений определяется доля этого фона. Такая процедура была выполнена, было показано, что доля фона совместима с нулем в пределах экспериментальных ошибок.

Результаты, изложенные в текущем подразделе использовались при подготовке доклада В.И. Николаенко [10] на конференции LHCP2015, представленном в комплекте отчетной документации по третьему этапу.

10.8 Моделирование событий с рождением ТБХ

После открытия стандартного бозона Хиггса (СБХ), будущая физическая программа эксперимента АТЛАС становится более определенной. Помимо измерения констант связи и других свойств нового бозона, поиск тяжелого гипотетического бозона Хиггса (ТБХ) с массой порядка 1 ТэВ будет являться одной из приоритетных задач.

Указанный поиск ТБХ и измерение параметров СБХ имеют первостепенное значение и представляют собой основу программы изучения бозона Хиггса на БАК как для Фазы-I (300 fb^{-1}), так и для Фазы-II (3000 fb^{-1}). Обнаружение ТБХ будет однозначно говорить о выходе за пределы СМ. В противном случае будет сильно ограничен диапазон его возможных масс при интерпретации как в рамках СМ (СРС), так и в ее расширениях, например, в приближении нулевой ширины (NWA), в минимальной суперсимметричной модели (MSSM), в модели, в которой есть два дублета бозонов Хиггса (2HDM) или в модели электрослабого синглета (EWS), в которой предсказывается дополнительный синглетный бозон Хиггса. Поиски ТБХ ведутся в разных каналах распада, в частности, в канале $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$, которым занимается и группа ИТЭФ, а также в каналах $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu q\bar{q}$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ и $H \rightarrow \gamma\gamma$. Недавний анализ полной статистики данных при 8 ТэВ в канале $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ привел к ограничению на сечение рождения в механизме ggF (VBF) 40 fb (15 fb) при массе 1,5 ТэВ в интерпретации модели NWA [9], см. рисунок 51.



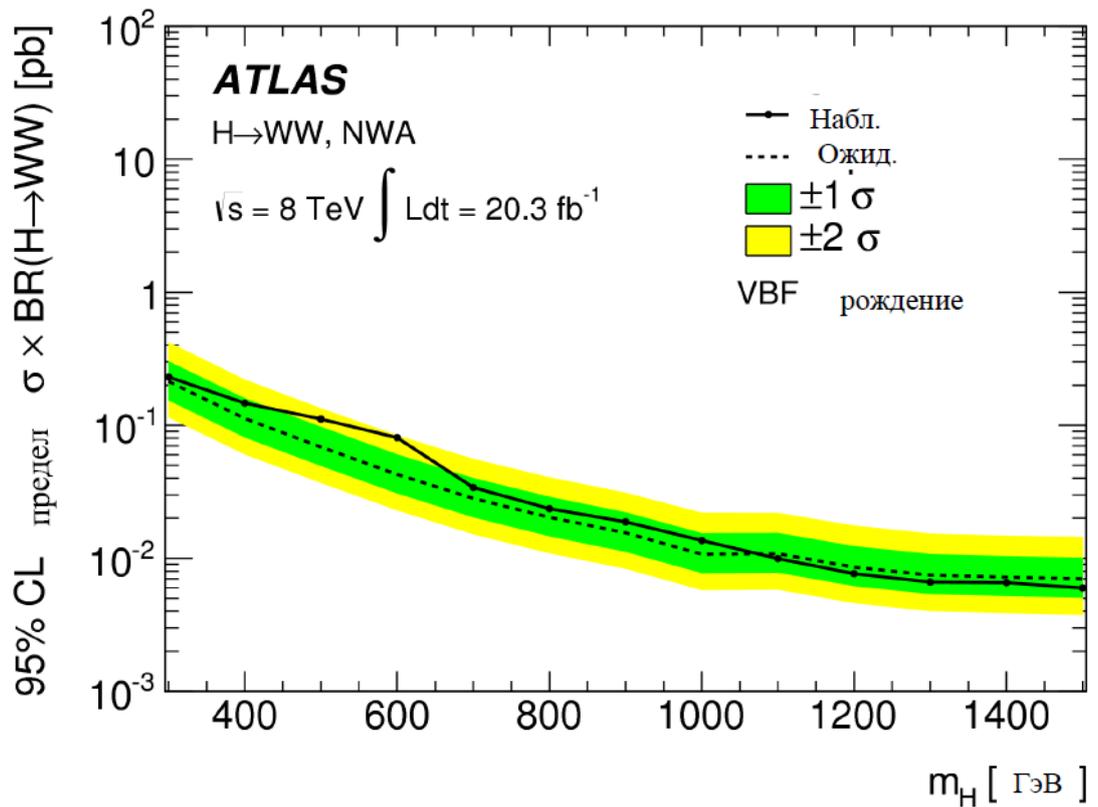


Рисунок 51 - Экспериментальный верхний предел на сечение рождения ТБХ в зависимости от его массы в канале распада $H \rightarrow WW$ в интерпретации модели NWA [9] в механизме слияния глюонов (сверху) и в механизме слияния векторных бозонов. (снизу).

Верхний предел уменьшается еще в 2-3 раза если добавить моду распада $lvqq$.

Измерение констант связи бозона Хиггса с фермионами и бозонами СМ также может дать указание на проявление эффектов новой физики, правда, косвенное. Наконец, измерение константы самодействия СБХ необходимо для подтверждения механизма нарушения электрослабой симметрии, предложенного П. Хиггсом. Дискриминация между различными гипотезами происхождения бозона Хиггса может быть достигнута на уровне пяти стандартных отклонений (5σ) при объединении результатов анализов угловых распределений в распадах бозона Хиггса $H \rightarrow ZZ^*$, $H \rightarrow WW^*$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ для данных соответствующих интегральной светимости 300 fb^{-1} . Ожидаемая точность измерения силы сигнала составит от 40% ($H \rightarrow \tau\tau$) до 10% ($H \rightarrow ZZ^*$) при анализе данных, соответствующих 300 fb^{-1} . Эта точность улучшается до 20% и 5% соответственно, если набранная интегральная светимость возрастает до 3000 fb^{-1} .

Моделирование событий с рождением ТБХ и фонов к нему осуществляется методами Монте-Карло в несколько стадий в рамках специально созданной в АТЛАС программной среды ATHENA.

Стадия 1. Генерация физических событий. Для моделирования событий сигнала используются стандартные генераторы POWHEG+PYTHIA8, в случае фона (WW , Wt , $t\bar{t}$,

Z+jets и др. процессы с двухлептонным конечным состоянием) могут использоваться и другие генераторы, например, SHERPA или ALPGEN. Задается начальная энергия сталкивающихся протонов (13 ТэВ), закладываются функции распределения партонов (кварков и глюонов) по кинематическим переменным x и q^2 и матричные элементы процессов рождения ТБХ; по ним разыгрываются полноценные события (включая фрагментацию адронных струй в частицы и распады нестабильных частиц) в NLO-порядке по теории возмущений (с нормировками на NNLO-сечения). Розыгрыш сопутствующих событий и эффекта наложений многих мягких событий в одном пересечении пучков осуществляется с помощью генератора PYTHIA8.

Стадия 2. Моделирование прохождения частиц через установку АТЛАС. С помощью пакета программ на основе GEANT4 все частицы пропускаются через установку. Создаются массивы сработавших элементов детектора (hits), которые затем оцифровываются (digits), т.е., грубо говоря, записываются энерговыделение частицы в данном элементе, его координаты, ее 4-импульс и время. Этот этап является наиболее времяемким – на моделирование одного сложного события может потребоваться несколько минут времени современного компьютерного процессора.

Стадия 3 Реконструкция событий. Указанная процедура первичного восстановления «объектов» - электронов, мюонов, фотонов, тау-лептонов, адронных струй и вектора недостающей поперечной энергии осуществляется аналогично той, которая применяется к реальным данным с установки АТЛАС. События записываются в виде файлов в форматеxAOD.

Стадии 1-3 осуществляются централизованно с помощью системы GRID.

Что касается конкретных предложений по оптимизации критериев отбора ТБХ при 13 ТэВ, то предварительный анализ показывает, что нет острой необходимости менять те ограничения на поперечный импульс и инвариантную массу лептонов, которые были предложены ранее. Однако, целесообразно ужесточить ограничение на поперечную массу, особенно для поисков ТБХ в области масс выше 1 ТэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сотрудничестве с соисполнителями из Российских институтов, участвующих в эксперименте АТЛАС, на третьем этапе соглашения успешно выполнены следующие работы:

Разработана технология сборки тонкозачерненных камер для новых малых колёс мюонного спектрометра, изготовлены стенды для проверки тонкозачерненных камер, микроячеистых камер, стенд контроля камер на основе рентгеновского сканера и стенд для испытаний сцинтилляционных счётчиков для горячих зон.

Разработана технология сборки мюонных камер из дрейфовых трубок малого диаметра, предназначенных для размещения в опорах АТЛАС.

Разработана и согласована с другими участниками работ по миниалориметру эскизная документация на варианты прототипа этого детектора.

Разработаны программы и методики проведения испытаний лабораторных образцов детекторов и их компонентов, проводимых на третьем этапе проекта.

Выполнены измерения оптических свойств - прозрачности и световыходов лабораторных образцов новых сцинтилляторов для горячих зон установки АТЛАС.

Продолжены работы по цезиевой системе калибровки сцинтилляционного калориметра, в частности, разработка принципиальных схем и разводка печатных плат модулей контроля давления в системе и датчиков движения источника, выполнена настройка и испытания модулей управления помпами и клапанами, разработаны и изготовлены специальные печатные платы для проведения радиационных испытаний компонентов электроники.

В ходе работ по жидкоаргоновому калориметру изготовлен стенд проверки электроники ЖАК на базе корзины АТСА стандарта, изготовлена и испытана партия лабораторных образцов оптических кабелей для ЖАК.

Выполнены следующие работы по модернизации специального программного обеспечения:

- разработка программного обеспечения для непрерывного мониторинга в режиме «он-лайн» времени прихода сигналов в каналах ЖАК;
- разработка программного обеспечения для быстрого детектирования каналов ЖАК с «нестандартной» формой импульса;
- отладка программ контроля на базе прототипа РС с использованием реальных данных измерений и подготовка рабочей версии программ для первых образцов РС;

- развитие пользовательского интерфейса управления программами информационной системы АГИС в условиях высоких нагрузок.
- разработка алгоритма идентификации электронов для ТДПИ при повышенной светимости БАК;
- оптимизация алгоритмов трекинга во внутреннем детекторе с учетом изменяющихся условий, таких как добавление нового слоя кремниевых детекторов, использование различных газовых смесей в различных модулях ТДПИ;
- оптимизация критериев выделения контрольных областей для поиска новой физики в процессах парного образования калибровочных бозонов при высоких светимостях;
- разработка алгоритма моделирования событий с рождением тяжелого бозона Хиггса.

По результатам длительных работ по цезиевой системе калибровки сцинтилляционного калориметра (см. п. 7 отчёта) Соловьяновым О.В. (ФГБУ ГНЦ ИФВЭ) защищена кандидатская диссертация [11].

С использованием алгоритмов идентификации электронов (см. п. 10.5 отчёта) подготовлена журнальная публикация о четырёх-лептонных конечных состояниях в pp-взаимодействиях на установке АТЛАС [12].

Работы выполнены в полном соответствии с техническим заданием и планом графиком работ по третьему этапу соглашения, что позволит продолжать работы, запланированные на последующие этапы. 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 четвертого 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://russia.ni.com/labview>
- 3 http://catalog.corning.com/opcomm/enGB/catalog/ProductDetails.aspx?cid=interconnect_indoor_cables_web&pid=5692&vid=111807.
- 4 Letter of Intent for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Experiment (<http://cds.cern.ch/record/1502664>).
- 5 Cornelissen T., Van Eldik N., Elsing M. et al. Updates of the ATLAS Tracking Event Data Model (Release 13), ATL-SOFT-PUB-2007-003 (2007).
- 6 Langenberg R., Morley A., Salzburger A., Elsing M., van Eldik N., Mashinistov R. Preparing the track reconstruction in ATLAS for a high multiplicity future. J. Phys. Conf. Ser. 513 (2014) 022018.
- 7 ATLAS collaboration, ATLAS Insertable B-Layer technical design report, CERN-LHCC-2010-013 (2010).
- 8 Styles N., Bellomo M., Salzburger A., on behalf of the ATLAS collaboration, Developments in the ATLAS Tracking Software ahead of LHC Run 2. J. Phys. Conf. Ser. 608 (2015) 012047.
- 9 ATLAS Collaboration, Search for a high-mass Higgs boson decaying to a W boson pair in pp collisions at 8 TeV with the ATLAS detector, arXiv:1509.04670, accepted for publication in JHEP.
- 10 V.Nikolaenko, ATLAS CP violation and rare B decays, Report at LHCP2015, St.-Petersburg.
- 11 О.В.Соловьянов, Система калибровки и мониторинга сцинтилляционного адронного калориметра установки АТЛАС радиоактивными источниками, Диссертация на соискание степени кандидата физ.-мат. наук, Протвино, 2015 г.
- 12 G.Aad et al, Measurements of four-lepton production in pp collisions at $\sqrt{s}=8\text{TeV}$ with the ATLAS detector, Physics Letters B 753 (2016) 552–572.

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

Утверждаю
Руководитель ПНИЭР



А.М.Зайцев.

Эскизная документация на варианты прототипа
переднего миникалориметра установки АТЛАС

Протвино, 2015 г.

Инв. № подл.	Подп. и дата
Инв. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

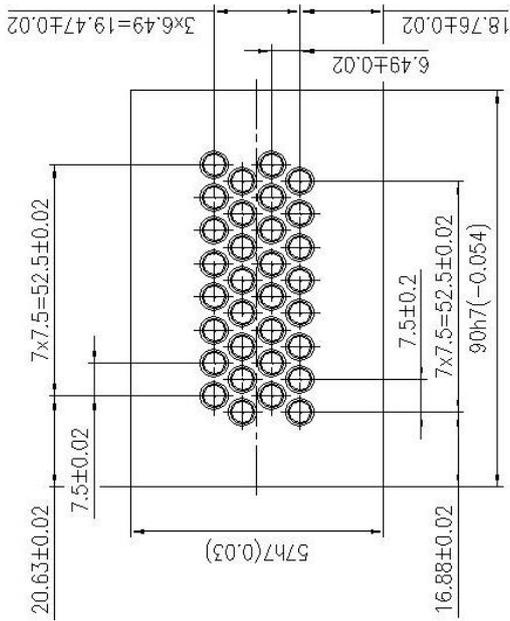
Пояснительная записка

к эскизу прототипа модуля переднего жидкоаргонового миникалориметра

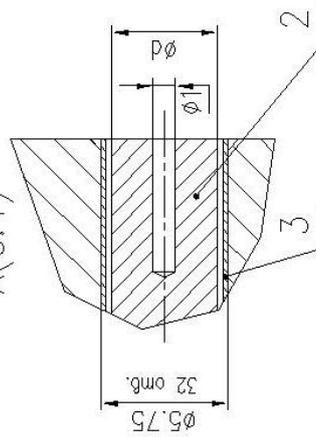
Прототип модуля переднего жидкоаргонового миникалориметра изготавливается из блока меди марки М1 размером 57х90х50 мм³. Он имеет 32 отверстия диаметром 5,75 мм. Расстояния между центрами отверстий составляют 7,50 мм по горизонтали и 6,49 мм по вертикали. В отверстия устанавливаются электроды. Внешний электрод представляет собой медную трубку с внешним диаметром 5,75 мм и толщиной стенки 0,54 мм. Внутри трубок вставляются медные стержни диаметром 4,80 для одного прототипа и 4,90 мм для второго. Таким образом, зазор между стержнями, которые являются сигнальными электродами, и трубками составляет 150 или 200 мкм. На стержни наматывается майларовое волокно толщиной 140 или 190 мкм, фиксирующее нужный зазор между электродами. Стержни имеют контакты для подсоединения сигнальных кабелей. Длина трубок и стержней – 50 мм, марка меди – М1.

Инов. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подп. и дата						
4	Все	ПРП 2/2-011	Денисов		91 ПРП.00.000.001					Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

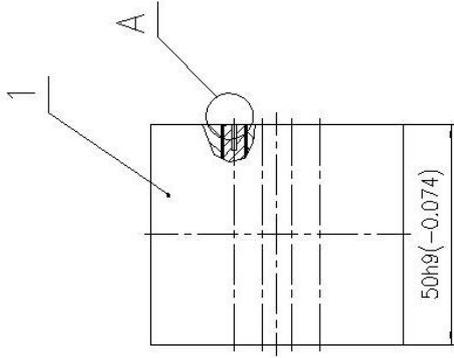
€ 00-00-10 ЛПП



A(5:1)



Обозначение	d (мм)
ЛПП 01-00-00 Э	4.812±0.005
.01 Э	4.912±0.005



1. Размеры для справок

ЛПП 01-00-00 Э

Изм. Лист	№ докм.	Подп.	Дата	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Сударов В.И.					1:1
Проб.	Козлов А.В.			Лист 1		
Прототип модуля переднего жидкоаэронового калориметра Эскизный чертеж						
Утв.	Денисов С.П.			Лист 1		ГНЦ ИФВЭ

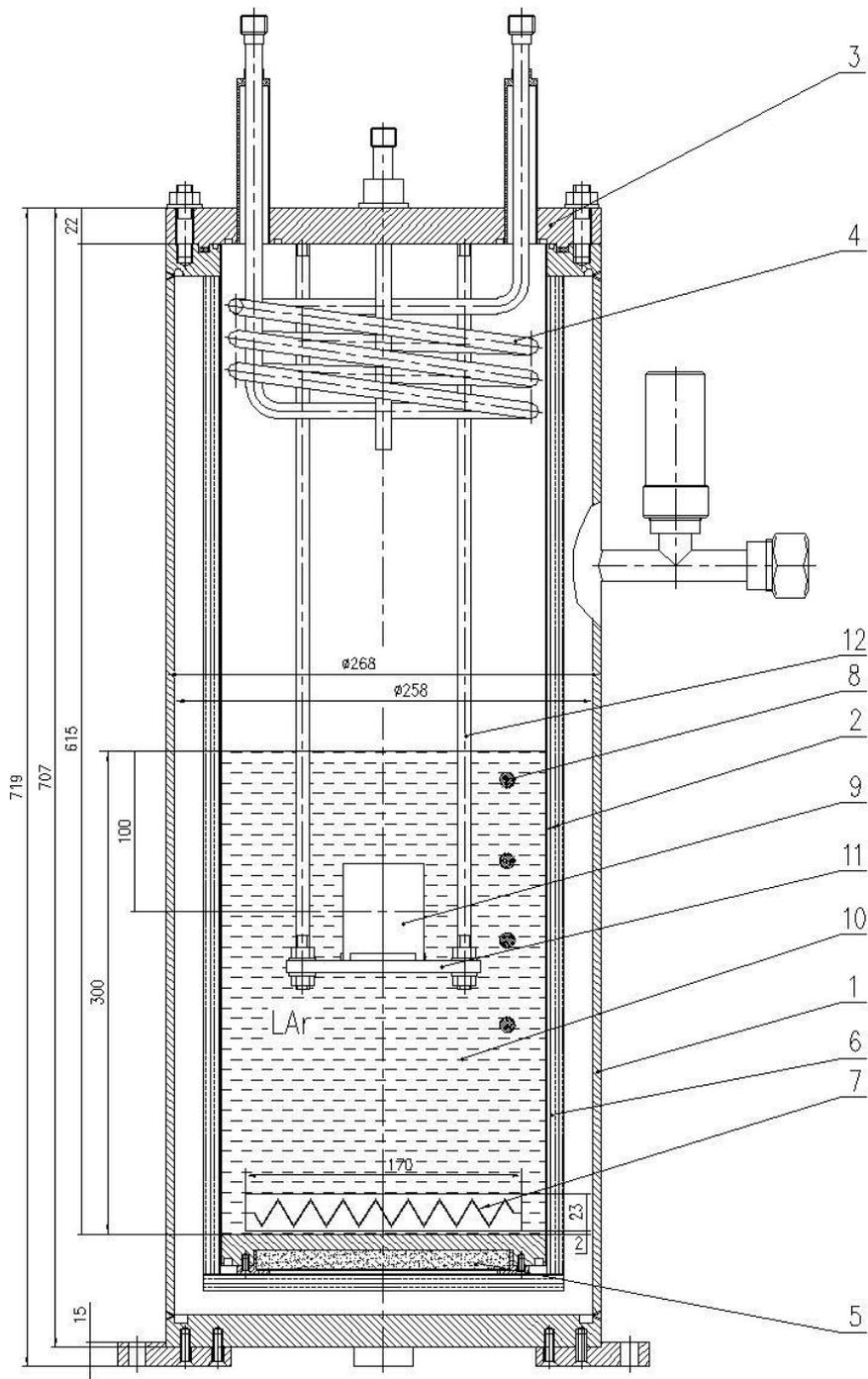
Формат А3

Пояснительная записка
к эскизу криостата для испытаний прототипа модуля
переднего жидкоаргонового миникалориметра

Криостат предназначен для испытания прототипов модулей переднего миникалориметра в пучке протонов. Он состоит из двух герметичных сосудов 1 и 2 из нержавеющей стали, которые сверху закрываются крышкой 3 с вакуумно-плотными разъемами 2РМГС27Б24Ш1Е2 (на эскизе не показаны) для вывода сигналов. Напряжение на контактах разъёмов не превышает 500 В. В крышке также имеются отверстия для подачи в криостат газообразного аргона и жидкого азота. Жидкий азот, проходя через змеевик 4, охлаждает газообразный аргон. Перед охлаждением аргона пространство между сосудами откачивается форвакуумным насосом до 10^{-3} торр через боковой отросток справа с лампой для измерения давления. В дальнейшем вакуум поддерживается за счет поглощения остаточного газа активированным углем 5, который находится под основанием внутреннего сосуда. Для уменьшения теплопритока внутренний сосуд покрыт многослойной теплоизоляцией 6 из алюминизированного майлара. В нижней части внутреннего сосуда расположен теплонагреватель 7 для испарения жидкого аргона после завершения испытаний. В каждом криостате имеются четыре температурных датчика 8 типа РТ-100 для контроля температуры и уровня жидкого аргона. Прототип модуля переднего миникалориметра 9 располагается в жидком аргоне 10 на платформе 11, подвешенной к верхней крышке на стержнях 12.

Инв. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инв. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

4	Все	ПРП 2/2-011	Денисов		ПРП.00.000.001	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



1. Размеры для справок

Инд. №. разр.	Лист	и. гвар.	Взам. инд. №.	Инд. №. габ.	Взам. и. гвар.
---------------	------	----------	---------------	--------------	----------------

ЛРП 00-00-00 СБЭ						Литера	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№. докум.	Подп.	Дата	Прототип модуля жидкоаргонового калориметра			1:2
Разр.		Осваб. В. В.			Эскизная чертёж			
Проф.		Усваб. А.В.			Лист	Листов 1		
					ГНЦ ИФЭ			
Умб.		Денисов С.П.			Формат А2			

Пояснительная записка
к схеме криогенного обеспечения для испытаний прототипов модулей
переднего миникалориметра

Аргон высокой чистоты марки ТУ 6-21-12-94 с содержанием электроотрицательных примесей не более $2 \cdot 10^{-4}$ % по кислороду из баллонов Ar через редуктор РВ1, вентиль В-А1, измеритель потока аргона и вентили В-А3, В-А4 поступает на блок очистки, обеспечивающий требуемое содержание электроотрицательных примесей не более $3 \cdot 10^{-5}$ %. Далее аргон через вентили В-А5, В6, В27-В29 и В7-В9 подается в криостаты с прототипами модулей после откачки криостатов и всей системы форвакуумным насосом ВН через азотную ловушку ЛА и вентили В2, В3 до давления 3-4 мторр и трехкратной промывки аргоном высокой чистоты. Ожижение аргона происходит за счет охлаждения змеевиков внутри криостатов жидким азотом из танка Т2, который заполняется из промышленного танка Т1 типа ТРЖК путём повышения давления в нём газообразным азотом из баллонов N₂ через редуктор РВ2 и вентиль В12.

Давление в криостатах контролируется электроконтактными мановакуумметрами МВ5-МВ7 и поддерживается в пределах 0,4-0,6 атм (здесь и далее указано превышение давления над атмосферным) системой автоматики, состоящей из датчиков давления, регуляторов типа «Метакон» (на схеме не показаны) и регулирующих вентилях на выходе азота из криостатов. При выходе давления в любом криостате за пределы 0,3-0,7 атм срабатывают звуковая и световая сигнализации, и система переводится в ручной режим работы. Для осуществления ручного режима управления давлением в криостатах предусмотрены мановакуумметр МВ4, ротаметры РТ1-РТ3 и вентили В23-В26.

Все криостаты и азотные танки снабжены предохранительными клапанами и предохранительными мембранами. При срабатывании предохранительного клапана и/или мембраны избыток газа сбрасывается в атмосферу.

Чистота аргона в криостатах контролируется детектором примеси кислорода Illinois Instruments Model 912 (на схеме не показан).

Инд. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

					95	ПРП.00.000.001	Лист
4	Все	ПРИП 2/2-011	Денисов				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			

Протокол
испытаний оптических свойств образцов сцинтилляторов для горячих зон

№1

15 октября 2015 г.

1. Объект испытания: образцы сцинтиллятора для горячих зон в количестве 3 шт.
2. Цель испытания: проверка соответствия объекта испытания требованиям однородности светосбора по площади, прозрачности, относительного световыхода.
3. Дата начала испытания: 21 сентября 2015 г.
4. Дата окончания испытания: 9 октября 2015 г.
5. Место проведения испытания: ЛЯП ОИЯИ.
6. Средства проведения испытаний: стенд для испытаний сцинтилляционных пластин счётчиков для горячих зон установки АТЛАС.
7. Результаты испытаний

Номер образца	Исследуемый параметр	Требования к параметру		Измеренное значение
		Номинальное значение	Предельное значение	
1	Однородность светосбора по площади сцинтиллятора	5 ÷ 8%	10%	5.4%
2				5.8%
3				5.5%
1	Прозрачность	1.2 ÷ 1.6 м	1 м	1.3 м
2				1.5 м
3				1.4 м
1	Световыход в процентах к световыходу антрацена	35 ÷ 45%	30%	37%
2				40%
3				38%

8. Выводы
Объекты испытаний прошли испытания в соответствии с п. 3.5 программы и методики испытаний
Объекты испытаний соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к сцинтилляционным счётчикам для горячих зон установки АТЛАС.

Испытания проводили:

начальник сектора

А.М.Артиков

научный сотрудник

А.В.Симоненко

инженер

В.Ю.Баранов

ПРОТОКОЛ**испытания партии пробных оптических кабелей 4-х типов для модернизированной электроники жидкоаргонового калориметра (ЖАК) детектора АТЛАС**

№ 1 от 24 ноября 2015 г.

1. Объект испытания: пробные оптические кабели (патч-корды) 4-х типов в составе:

- патч-корды МТР-10 LC (350 мм) – 16 штук;
- патч-корды МТР-8 LC (350 мм) – 4 штуки;
- патч-корд МТР-10 LC (140 мм) – 1 штука;
- патч-корд МТР-8 LC (140 мм) – 1 штука.

2. Цель испытания: проверка параметров объектов испытания на соответствие техническим требованиям по программе и методике испытаний оптических кабелей ЖАК.**3. Дата начала испытания:** 09 ноября 2015 г.**4. Дата окончания испытания:** 24 ноября 2015 г.**5. Место проведения испытания:** Лаборатория электронов высоких энергий, ФИАН, Москва.**6. Средства проведения испытаний**

Оптический рефлектометр МТР 6000, компенсационная катушка, универсальный микроскоп «Микромед 2 вар. 3-20».

7. Результаты испытания

Испытания показали соответствие параметров объектов испытаний техническим требованиям, а именно – вносимые потери не превышают 0,35 дБ на каждый разъем по каждому из волокон оптического кабеля.

8. Замечания и рекомендации

Испытания показали, что для серийной партии оптических кабелей необходимо уменьшить на 1,5 мм длину предохранительной термоусадочной трубки со стороны разъема LC.

9. Выводы

9.1 Пробные оптические кабели (патч-корды) 4-х типов выдержали испытание.

9.2 Пробные оптические кабели (патч-корды) 4-х типов соответствуют предъявленным техническим требованиям.

9.3 Для серийной партии оптических кабелей требуется коррекция длины предохранительной термоусадочной трубки.

Испытание проводили

Старший научный сотрудник

Ведущий инженер

Инженер 2-ой категории



А.В. Багуля

В.А. Кондратьев

А.Е. Колбасин

