

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

№ госрегистрации 114111740013

Инв. № 5/0005

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

д-р физ. мат. наук, академик



С.В. Иванов

28.12.2016 г.



<М.П.>

ОТЧЕТ  
О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ  
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАЗРАБОТКАХ

Обобщение и оценка проведенных теоретических и экспериментальных исследований по созданию усовершенствованных детекторных устройств супердетектора АТЛАС, комплексные испытания детекторов и оборудования, разработка рекомендаций по проведению экспериментальных исследований взаимодействия протонов с помощью супердетектора АТЛАС на пучках БАК повышенной светимости.

по теме:

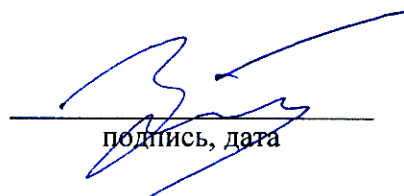
СОЗДАНИЕ СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КОМПОНЕНТОВ СУПЕРДЕТЕКТОРА НОВЫХ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ АТЛАС БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА ЦЕРН ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОЖДЕНИЯ И РАСПАДА ЧАСТИЦ

Этап 5 (заключительный)

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

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

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
















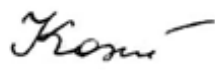







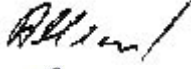












подпись, дата

А.М.Зайцев

Протвино, 2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| <p>Зам. директора института,<br/>д-р физ.- мат. наук,<br/>профессор</p>   |    | <p>А.М. Зайцев<br/>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>     | <p>весь отчёт</p>                               |
| <p>Вед. научн. сотрудник канд.<br/>физ.-мат. наук,<br/>ст научн. сотрудник<br/>Начальник лаборатории,<br/>канд. физ.-мат. наук,<br/>ст. научн. сотрудник.</p> |    | <p>А.Б.Фенюк<br/>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>       | <p>весь отчёт</p>                               |
| <p>Ст. научн. сотрудник.</p>  |    | <p>О.Л.Федин<br/>ФГБУ ПИЯФ</p>           | <p>разделы 1, 2,<br/>приложения 1 и 2</p>       |
| <p>Инж.-конструктор</p>   |    | <p>В.П.Малеев<br/>ФГБУ ПИЯФ</p>          | <p>раздел 2,<br/>приложения 1 и 2</p>           |
| <p>Вед. инженер</p>   |    | <p>А.Т.Сулейманов<br/>ФГБУ ПИЯФ</p>      | <p>раздел 2<br/>приложения 1 и 2</p>            |
| <p>Начальник сектора, канд.<br/>физ.-мат. наук,<br/>ст. научн. сотрудник</p>  |    | <p>С.К.Патричев<br/>ФГБУ ПИЯФ</p>        | <p>раздел 2<br/>приложения 1 и 2</p>            |
| <p>Вед. научн. сотрудник канд.<br/>физ.-мат. наук,<br/>ст научн. сотрудник</p>  |    | <p>А.П.Чеплаков<br/>ОИЯИ</p>             | <p>разделы 1, 5, 6,<br/>приложения 4, 5, 6.</p> |
| <p>Ст. инженер</p>  |   | <p>Г.А.Шелков<br/>ОИЯИ</p>               | <p>раздел 1,<br/>подраздел 9</p>                |
| <p>Зам.нач.отдела, м.н.с.</p>   |  | <p>А.Л.Гонгадзе<br/>ОИЯИ</p>             | <p>разделы 1, 9.</p>                            |
| <p>Начальник лаборатории,<br/>д-р физ.- мат. наук,<br/>профессор, академик РАН</p>  |  | <p>Е.А. Ладыгин<br/>ОИЯИ</p>             | <p>раздел 7</p>                                 |
| <p>Вед. научн. сотрудник канд.<br/>физ.-мат. наук,<br/>ст. научн. сотрудник</p>   |  | <p>С.П.Денисов<br/>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>     | <p>раздел 5,</p>                                |
| <p>Руководитель группы канд.<br/>физ.-мат. наук,<br/>ст. научн. сотрудник</p>   |  | <p>А.В.Козелов<br/>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>     | <p>раздел 5</p>                                 |
| <p>Ст. преподаватель</p>  |  | <p>А.С.Романюк<br/>НИЯУ МИФИ</p>         | <p>подразделы 2.2, 12.1</p>                     |
| <p>Начальник сектора, канд.<br/>физ.-мат. наук,<br/>ст. научн. сотрудник</p>  |  | <p>С.Ю.Смирнов<br/>НИЯУ МИФИ</p>         | <p>подразделы 2.2, 12.1</p>                     |
| <p>Вед. научн. сотрудник, д-р<br/>физ.-мат. наук,<br/>ст. научн. сотрудник</p>  |  | <p>Р.М.Фахрутдинов<br/>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p> | <p>раздел 3.</p>                                |
| <p>Мл. научн. сотрудник</p>   |  | <p>А.С.Кожин<br/>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>       | <p>раздел 3.</p>                                |
|   |  | <p>И.С.Плотников<br/>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ</p>   | <p>раздел 3.</p>                                |

|  |   |                                 |                             |
|--|---|---------------------------------|-----------------------------|
| Гл. научн. сотрудник<br>Д-р физ.-мат наук,<br>профессор                  |    | В.И.Рыкалин<br>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ    | раздел 6                    |
| Ст. научн. сотрудник канд.<br>физ.-мат. наук.                            |    | А.Н.Карюхин<br>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ    | раздел 6                    |
| Глав. Научн. сотрудник,<br>д-р физ.-мат наук,<br>профессор               |    | В.А.Сенько<br>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ     | раздел 6.                   |
| Ст. научн. сотрудник, канд.<br>физ.-мат. наук.                           |    | Е.А.Старченко<br>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ  | раздел 6.                   |
| Нач. сектора,<br>канд. физ.-мат. наук.                                   |    | А.Г.Мягков<br>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ     | подраздел 12.1.             |
| Научн. сотрудник,<br>канд. физ.-мат. наук.                               |    | О.В.Соловьянов<br>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ | раздел 6                    |
| Ст. научн. сотрудник<br>канд. физ.-мат. наук.                            |    | В.И.Николаенко<br>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ | раздел 6                    |
| Научный сотрудник  |    | А.А.Солодков<br>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ   | раздел 6                    |
| Вед. научн. сотрудник,<br>д-р физ.-мат. наук,<br>профессор               |    | Л.Н.Смирнова<br>МГУ             | подраздел 12.3              |
| Ст. научн. сотрудник, канд.<br>физ.-мат. наук.                           |   | С.Ю.Сивоклоков<br>МГУ           | подраздел 12.3              |
| Мл. научн.сотрудник  |  | С.М.Турчихин<br>МГУ             | подраздел 12.3              |
| Мл. научн.сотрудник  |  | А.С.Маевский<br>МГУ             | подраздел 12.3              |
| Нач. сектора,<br>канд. физ.-мат. наук.                                   |  | А.В.Багуля<br>ФГБУ ФИАН         | раздел 8,<br>приложение 6.. |
| Вед. научн. сотрудник,<br>канд. физ.-мат. наук,<br>ст. научн. сотрудник. |  | В.О.Тихомиров<br>ФГБУ ФИАН      | раздел 8.                   |
| Зам. директора института,<br>д-р физ.- мат. наук,<br>профессор           |  | Ю.А.Тихонов<br>БИЯФ СО РАН      | раздел 10.                  |
| Ст. научн. сотрудник   |  | А.Л.Масленников<br>БИЯФ СО РАН  | раздел 10,                  |
| Ст. научн. сотрудник, канд.<br>физ.-мат. наук.                           |  | И.И.Цукерман<br>ФГБУ ИТЭФ       | подраздел 12.4              |

## РЕФЕРАТ

Отчет 111 стр., 67 рис., 8 таблиц, 20 источников и 7 приложений.

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ЦЕРН, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР,  
УСТАНОВКА АТЛАС, ЖИДКОАРГОНОВЫЙ КАЛОРИМЕТР, АДРОННЫЙ  
КАЛОРИМЕТР, ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, РАДИАЦИОННАЯ  
СТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ, ГАЗОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, ПИКСЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ,  
ДРЕЙФОВЫЕ ТРУБКИ, ТРИГГЕР ВЫСОКОГО УРОВНЯ, СЕТЬ ГРИД, СТАНДАРТНАЯ  
МОДЕЛЬ, БОЗОН ХИГГСА

Объектом ПНИЭР являются детекторы установки АТЛАС на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРНе, компоненты этих 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.

Поскольку отчёт является завершающим, в начале основной части приведён перечень основных результатов работ, выполненных в ходе предыдущих этапов работ.

Ниже приведен перечень выполненных работ пятого, завершающего этапа проекта, представленных в отчёте.

В ходе работ по камерам НМК выполнено:

- изготовление и испытания экспериментальных образцов ТЗК;
- проведение испытаний экспериментальных образцов ТЗК с помощью РС.

Экспериментальные образцы мюонных камер ДТМ оснащены регистрирующей электроникой, проведено исследование физических характеристик камер на чешских лучах.

Выполнена разработка программ и методик проведения испытаний экспериментальных образцов, проводимых на пятом этапе.

Изготовлен экспериментальный образец миникалориметра. Проведены его испытания в пучке частиц с интенсивностью до  $10^{12}$  частиц/с на ускорителе У-70 ИФВЭ.

Выполнено измерение оптических свойств облучённых образцов сцинтиллятора для горячих зон.

Проведены радиационные испытания новой электроники ЖАК и сцинтилляционного калориметров.

Изготовлена и испытана партия экспериментальных образцов оптических кабелей для ЖАК с распечаткой рефлектограмм по каждому волокну.

Проведены испытания новой электроники считывания сцинтилляционного адронного калориметра в составе установки.

Разработан новый функционал программ для пакетного обновления данных с помощью интерфейса управления системы АГИС.

Разработана система мониторинга прохождения задач в сети распределённых вычислений ГРИД.

Выполнены следующие работы по модернизации специального программного обеспечения:

- оценка эффективности идентификации электронов в ТДПИ при загрузках, соответствующих светимости БАК после первой фазы его модернизации;
- оптимизация алгоритмов транспортировки трековой информации, включая параметры трека и их матрицу ошибок, между элементами трекового детектора, основанных на методе фильтра Кальмана;
- разработка версий триггерных алгоритмов для В-физики с использованием данных быстрого трекинга;
- поиск ТБХ на экспериментальных данных АТЛАС.

Представлены технические требования и предложения по разработке, изготовлению и эксплуатации усовершенствованных детекторных устройств супердетектора АТЛАС.

## СОДЕРЖАНИЕ

|      |   |    |
|------|---|----|
|      | Определения, обозначения и сокращения .....   | 8  |
|      | Введение .....  | 10 |
|      | Основная часть .....  | 12 |
| 1    | Основные результаты предыдущих этапов ПНИЭР .....   | 12 |
| 2    | Работы по тонкоззорным камерам.....   | 18 |
| 2.1  | Изготовление и испытания экспериментальных образцов ТЗК .....   | 18 |
| 2.2  | Проведение испытаний экспериментальных образцов ТЗК с помощью РС .....  | 25 |
| 3    | Оснащение экспериментальных образцов мюонных камер ДТМ регистрирующей электроникой и проведение исследований физических характеристик на космике или пучке заряженных частиц .....                | 28 |
| 4    | Разработка программ и методик проведения испытаний экспериментальных образцов, проводимых на этапе .....  | 35 |
| 5    | Изготовление экспериментального образца миникалориметра. Испытания экспериментального образца миникалориметра в пучке частиц с интенсивностью до $10^{12}$ частиц/с на ускорителе У-70 ИФВЭ ..... | 36 |
| 6    | Измерение оптических свойств облучённых образцов сцинтиллятора для горячих зон.....   | 40 |
| 7    | Радиационные испытания новой электроники ЖАК и сцинтилляционного калориметров.....  | 47 |
| 8    | Изготовление и испытания партии экспериментальных образцов оптических кабелей для ЖАК с распечаткой рефлектограмм по каждому волокну .....  | 54 |
| 9    | Испытания новой электроники считывания сцинтилляционного адронного калориметра в составе установки .....  | 58 |
| 10   | Разработка и реализация нового функционала программ для пакетного обновления данных с помощью интерфейса управления системы АГИС.....   | 60 |
| 11   | Разработка системы мониторинга прохождения задач в сети распределённых вычислений ГРИД. ....  | 62 |
| 12   | Работы по модернизации специального программного обеспечения .....  | 65 |
| 12.1 | Оценка эффективности идентификации электронов в ТДПИ при загрузках, соответствующих светимости БАК после первой фазы его модернизации ....  | 65 |
| 12.2 | Оптимизация алгоритмов транспортировки трековой информации, включая параметры трека и их матрицу ошибок, между элементами трекового детектора, основанных на методе фильтра Кальмана .....        | 73 |
| 12.3 | Разработка версий триггерных алгоритмов для В-физики с использованием данных быстрого трекинга .....  | 78 |
| 12.4 | Поиск ТБХ на экспериментальных данных АТЛАС .....   | 83 |

|    |  |     |
|----|--|-----|
| 13 | Технические требования и предложения по разработке, изготовлению и эксплуатации усовершенствованных детекторных устройств супердетектора АТЛАС. Разработка рекомендаций по усовершенствованию детекторных устройств супердетектора АТЛАС для проведения экспериментальных исследований взаимодействий протонов на пучках реконструированного БАК. Обобщение и выводы по результатам ПНИЭР..... | 90  |
|    | Заключение .....   | 94  |
|    | Список использованных источников .....   | 95  |
|    | Приложение 1. Акт изготовления экспериментальных образцов ТЗК. ....  | 98  |
|    | Приложение 2. Протокол испытаний экспериментальных образцов ТЗК с помощью высоковольтного и рентгеновского стендов .....   | 99  |
|    | Приложение 3. Протокол испытаний прототипа миникалориметра в пучке частиц на ускорителе ИФВЭ .....   | 102 |
|    | Приложение 4. Протокол испытаний облучённых образцов сцинтиллятора.....  | 104 |
|    | Приложение 5. Протокол радиационных испытаний новой электроники ЖАК и сцинтилляционного калориметров .....   | 106 |
|    | Приложение 6. Протокол испытания партии специализированных оптических кабелей для модернизированной электроники жидкоаргонового калориметра детектора АТЛАС.....   | 109 |
|    | Приложение 7. Протокол испытаний новой электроники сцинтилляционного калориметра в составе установки .....   | 110 |

## 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. ἄδρῶς «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 $1 \text{ см}^2$ в 1 сек.   |
| Калориметр         | прибор для измерения энергии частиц.   |
| ЦКСК               | цезиевая калибровка сцинтилляционного калориметра  |
| ТДПИ               | трековый детектор переходного излучения  |
| HLT                | (high level trigger) триггер высокого уровня   |
| ЖАК                | жидкоаргоновый калориметр  |
| КХД                | квантовая хромодинамика – теория сильных взаимодействий.   |
| АТСА               | Advanced Telecommunications Computing Architecture – стандарт телекоммуникационного оборудования.  |
| АЦП                | аналого-цифровой преобразователь.  |
| ЦАП                | цифро-аналоговый преобразователь   |
| ВОЛП               | волоконно-оптическая линия передачи данных.  |
| ПЛИС               | программируемая логическая интегральная схема.   |
| ATHENA             | программная среда (набор библиотек), ориентированная на задачи эксперимента АТЛАС.   |
| ГРИД (GRID)        | форма распределённых вычислений, в которой «виртуальный суперкомпьютер» представлен в виде кластеров, соединённых с помощью сети.  |



АГИС  
(AGIS)

(ATLAS Grid Information System) Информационная система, описывающая вычислительные ресурсы эксперимента АТЛАС и компьютерную модель в целом.

## ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

Уровень актуальности и новизны результатов 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 в лабораторных условиях 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 пятого 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. Основные результаты предыдущих этапов ПНИЭР.

выполнен аналитический обзор патентной, научно-технической, нормативной и методической литературы, проведенный с целью проверки патентной чистоты и достижимого технического совершенства научно-технических решений, применяемых в рамках выполнения работ по проекту, обоснован выбор направления исследований проекта.

Выполнен большой объём работ по созданию камер для новых малых колёс (НМК) мюонного спектрометра АТЛАС [1]. В частности, для создания тонкоззорных камер (ТЗК) разработаны:

- устройство напыления графита на катодные плоскости;
- устройство намотки и натяжения анодных проволок;
- установки смешивания рабочего газа;
- стенд для высоковольтных испытаний камер и для испытаний с помощью рентгеновского сканнера.

На рисунке 1 показаны фотографии устройства для намотки анодных проволок ТЗК.



Рисунок 1 - Устройство для натяжения и намотки анодных проволок ТЗК камер. Слева показан намоточный стол с вакуумным прижимом катодных плат. В центре, показана система перемещения с установленным на ней устройством для натяжения и подачи проволоки. На правой фотографии виден шкаф управления и дисплей, через который осуществляется управление устройством.

Подготовлены следующие документы, на основе которых планируется осуществлять сборку рабочих ТЗК камер:

- Технологический регламент сборки ТЗК камер;
- Методика проведения испытаний собранных ТЗК камер.

Выполнены следующие работы по микроячейным камерам НМК.

Были собраны 19 МИК, на которых была успешно обработана технология и методика сборки. Из этих МИК были собраны три квадруплета – так называемый модуль-0, и два модуля-1 (так называемые MMSW), которые в данный момент успешно установлены в шахте АТЛАС. На 5-м этапе работ был собран полномасштабный квадруплет LM2. Акт изготовления этого квадруплета включён в отчётную документацию 5 этапа.

Установленные в шахте квадруплеты используются сотрудничеством НМК для отработки алгоритмов восстановления треков частиц. Отдельные МИК также используются во время сеансов с тестовыми пучками в зоне Н8 ЦЕРН. На рисунке 2 показан стенд проверки МИК на космических мюонах.



Рисунок 2 - Стенд проверки МИК на космических мюонах

По мюонным камерам из дрейфовых трубок малого (15 мм) диаметра на предыдущих этапах работ была разработана конструкция и технология изготовления таких трубок, изготовлены и испытаны их лабораторные и экспериментальные образцы, Изготовлена оснастка для сборки камер из ДТМ, разработана технология сборки и изготовлены лабораторные образцы камер. На ряд технологических решений по ДТМ поданы заявки на патентную защиту в качестве «know how».

Для переднего миникалориметра установки АТЛАС на основании проведённого аналитического обзора имеющихся в литературе данных было сделано заключение, что наиболее предпочтительными вариантами переднего миникалориметра являются ионизационные газовые калориметры или калориметры на жидком аргоне (аргон значительно дешевле криптона и ксенона). Было решено принять, как основной, жидкоаргоновый вариант переднего миникалориметра с цилиндрической геометрией электродов. Моделирование макета миникалориметра было проведено в ИФВЭ с использованием специально разработанного математического обеспечения, основанного на пакете GEANT4 (версия 9.6). Оно показало, что калориметр с зазором между

цилиндрическими электродами от 100 до 250 мкм может обеспечить необходимую точность измерения энергии частиц при ожидаемой повышенной светимости ЛНС.

Были разработаны эскизная, а затем и рабочая техническая документации на макет миникалориметра.

Новые платы электроники, разрабатываемые для модернизации сцинтилляционного калориметра ATLAS, делятся на две части: одна расположена непосредственно в модулях («головная», on detector), другая вынесена за пределы детектора («регистрирующая электроника», off detector) (см. рисунок 3). В отличие от существующей электроники, в новом варианте полностью исключается передача аналоговых сигналов от модулей, а вся информация передается в цифровом виде.

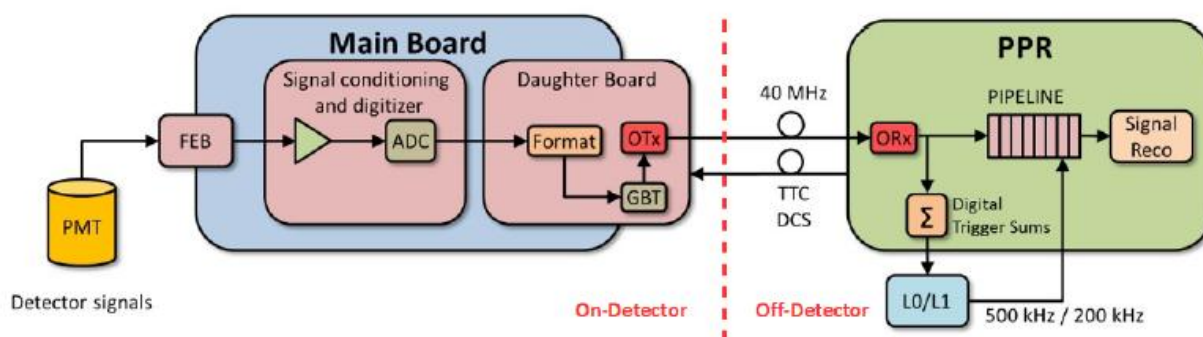


Рисунок 3 - Блок-схема новой электроники сцинтилляционного калориметра. Слева от пунктира показана головная электроника, справа – регистрирующая электроника. PMT – фотоумножитель, FEB – карта входной электроники, далее направо формирование и оцифровка сигнала, затем передача в регистрирующую плату.

Он-лайн электроника расположена в длинных выдвижных модулях. Каждый модуль механически разделен на 4 отдельных минимодуля. Минимодули содержат в себе 12 ФЭУ, 12 карт входной электроники (Front-End Board (FEB)), одну основную карту (Main Board (MB)) и одну дочернюю карту (Daughterboard (DB)). На сегодня предложено три варианта карт входной электроники (FEB).

Связь основной карты MB с платой препроцессора (Tile PPR) по оптоволоконной линии осуществляет дочерняя карта DB. Скорость передачи данных от детектора 9,6 Gbps, а от препроцессора к детектору 4,8 Gbps.

Плата препроцессора содержит триггерный модуль, позволяющий вырабатывать триггер нулевого и первого уровня.

Головная и регистрирующая электроника питается от новых источников питания, обеспечивающих стабильную работу всех плат. Источники снабжены запасными каналами, что позволяет в случае отключения одного из них автоматически переключиться

на другой.

Специальное программное обеспечение для сбора данных и управления картами написано на языках C++ и Python.

Во время тестовых сеансов на ускорителе SPS CERN (канал T4 — H8) в 2016 г. было проверено функционирование новой электроники сцинтилляционного калориметра в условиях, максимально приближенных к таковым в установке АТЛАС.

Исследования быстродействия новой электроники подтвердило ее возможность принимать события с частотой более 40 МГц, что позволит надежно работать при светимости БАК на уровне  $5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Конструкции новых плат электроники разработаны с учетом совместимости со старой электроникой и механикой, что позволит при необходимости производить поэтапную замену электроники. Проведенное тестирование новой электроники во время сеанса на ускорителе SPS CERN продемонстрировало полную совместимость новых блоков электроники с существующими.

По оптическим кабелям ЖАК была детально определена номенклатура собираемых и тестируемых оптических кабелей для электроники жидкоаргонового калориметра, разработана техническая документация по сборке и тестированию оптических кабелей, разработаны требования к приобретаемому спецоборудованию для тестирования кабелей – оптическому рефлектометру. Была определена логистическая схема выполнения работ.

На рисунке 4 показан образец оптического кабеля для ЖАК.

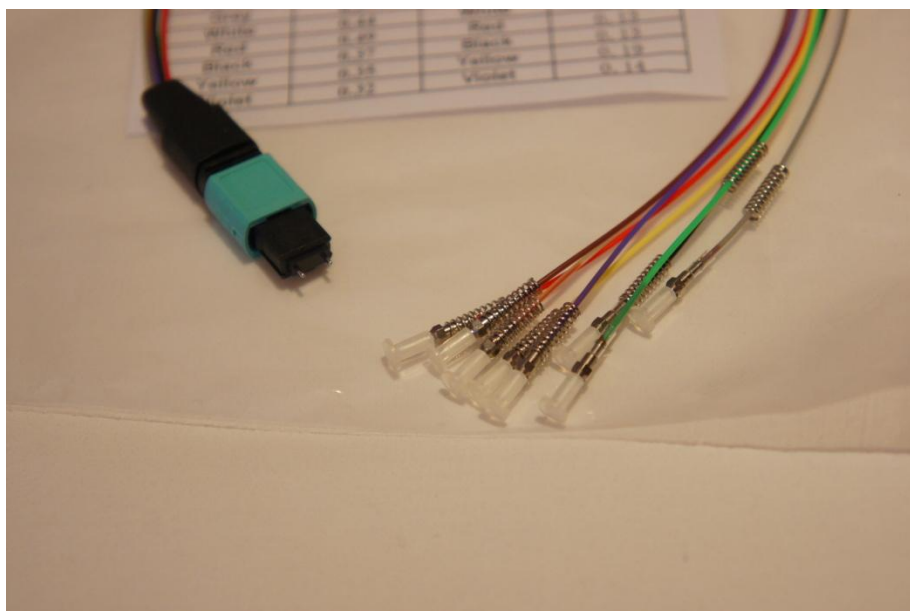


Рисунок 4 – Образец оптического кабеля (патч-корда), укомплектованного оптическими разъемами.

Изготовлены новые модули электроники для цезиевой системы калибровки адронного калориметра, что позволило использовать при калибровке общую систему сбора данных от калориметра. Образец одной из плат, установленной в калориметре показан на рисунке 5.

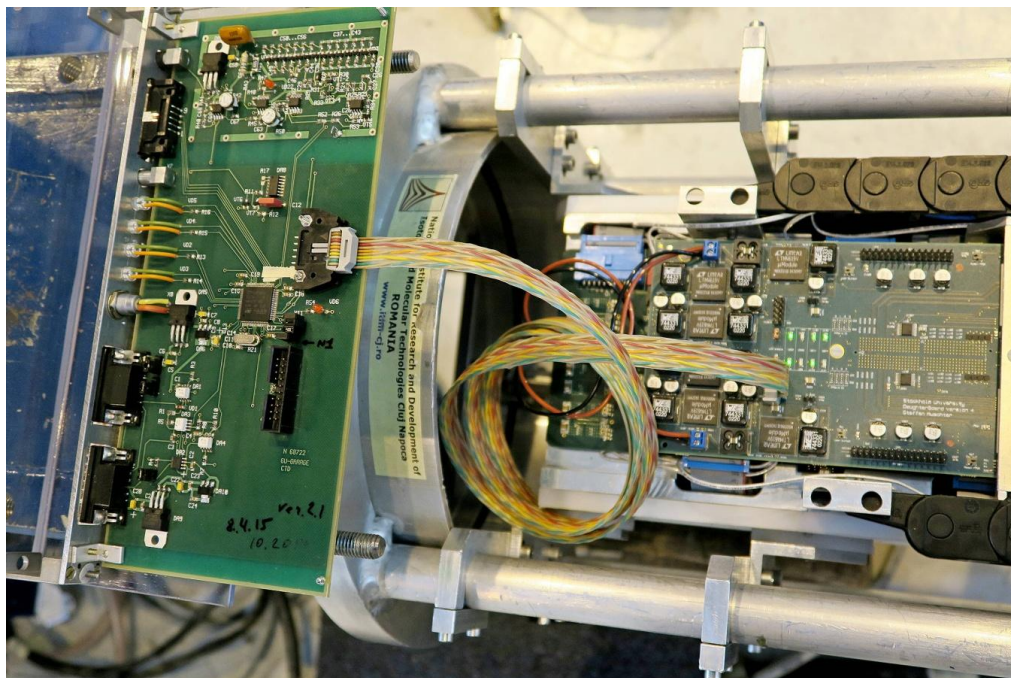


Рисунок 5 – Одна из новых плат цезиевой системы калибровки адронного калориметра.

Были выполнены подготовительные работы для исследований радиационной стойкости компонентов детекторов и поведено их облучение.

Был проведен расчет радиационной нагрузки в области размещения «холодной» электроники жидкоаргонового адронного калориметра в торцевых криостатах установки АТЛАС. На основании этих расчетов и с учетом полученных ранее в ходе сеансов на ИБР-2м результатов радиационных испытаний электроники нам удалось показать, что влияние ожидаемой деградации электроники на энергетическое разрешение и линейность отклика калориметра ниже 1% уровня. Это явилось очень важным для сотрудничества аргументом в пользу решения не вскрывать криостата и тем самым избежать связанных с этими работами рисков.

На облучательной установке реактора ИБР-2 была выполнена обширная программа радиационных испытаний материалов и электроники. В результате тестов некоторые популярные для производства печатных плат материалы (FR4 и G10) были забракованы, а другие (Arlon 85N и Rogers 4450B) были рекомендованы к использованию в вариантах передних калориметров.



Большой объём работ был выполнен по поддержанию, модернизации и развитию программного обеспечения эксперимента АТЛАС. В частности, это работы по модернизации триггеров, системы распределённых вычислений ГРИД – АГИС, алгоритмов восстановления треков, перевод программ на использование более быстрых библиотек и ряд других.

## 2. Работы по тонкоззорным камерам.

На заключительном этапе выполнения работ в рамках данного проекта была продолжена сборка лабораторных образцов ТЗК камер с целью отладки технологического процесса сборки и обучения персонала. Основная задача сборки лабораторных образцов ТЗК состояла в достижении точности юстировки  $\pm 40$  мкм для катодных плат со стрипами в разных плоскостях квадруплета ТЗК камер.

### 2.1. Изготовление и испытания экспериментальных образцов ТЗК

На первом этапе сборки камер выполняется контроль качества изготовленных промышленностью катодных плат. Каждой полученной катодной плате присваивается баркод для последующей её идентификации при всех дальнейших сборочных операциях. Баркод платы заносится в сборочную базу данных (БД). Толщина катодной платы измеряется в 19 точках по периметру с помощью микрометра. Измеренные значения записываются в сборочную БД. При наличии нескольких одиночных отклонений от среднего значения толщины превышающих  $\pm 25$  мкм плата бракуется. Если имеется одиночное отклонение от среднего меньше чем  $\pm 25$  мкм, то плата может быть использована в паре с другой платой у которой нет такого же локального отклонения. На следующем этапе выполняется контроль размеров платы. Данная операция выполняется на гранитном столе с зафиксированными на нем вертикально штифтами, которые упираются в латунные вставки, запрессованные в плате в процессе её изготовления. С помощью микроскопа, измеряется расстояние между стрипом, расположенным вблизи большого и малого основания трапецеидальной платы и точным отверстием на плате как это показано на рисунке 6.

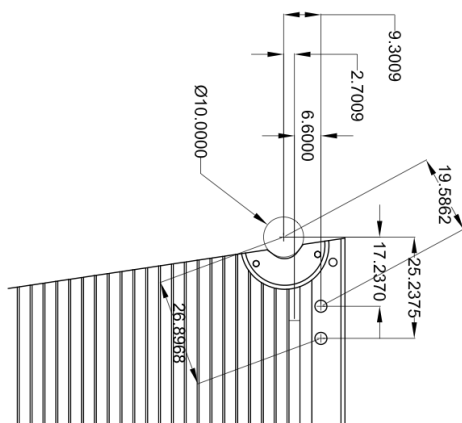


Рисунок 6 - Схема расположения прецизионных отверстий и латунных вставок, поясняющая контроль качества изготовления катодной платы.

Также измеряется положение латунной вставки по отношению к тем же прецизионным отверстиям. Положение стрипов, так же как и положение латунной вставки должно совпадать с проектным с точностью  $\pm 50$  мкм, в противном случае катодная плата бракуется.

Затем приступают к сборке однослойной ТЗК камеры. Операция выполняется на гранитном столе с плоскостностью лучше 30 мкм и системой вакуумного прижима платы к столу. Катодная плата размещается на гранитном столе, после чего с помощью вакуума прижимается к столу. Плоскостность катодной платы проверяется с помощью поверочной линейки на которой установлен цифровой индикатор. Измерения выполняются в 12 точках. Допускается максимальное отклонение от среднего значения  $\pm 40$  мкм. Если присутствует одно отклонение  $\pm 50$  мкм то такая плата может быть использована только в паре с другой платой у которой нет отклонения в данной точке. Поверхность катодной платы, на которую будет наноситься графит, закрывается кондукторами, которые размещаются между рамками камеры. Поверхности, на которые будут приклеиваться поддержки анодных проволок, защищаются с помощью специальной маскирующей ленты, как это показано на рисунке 7.

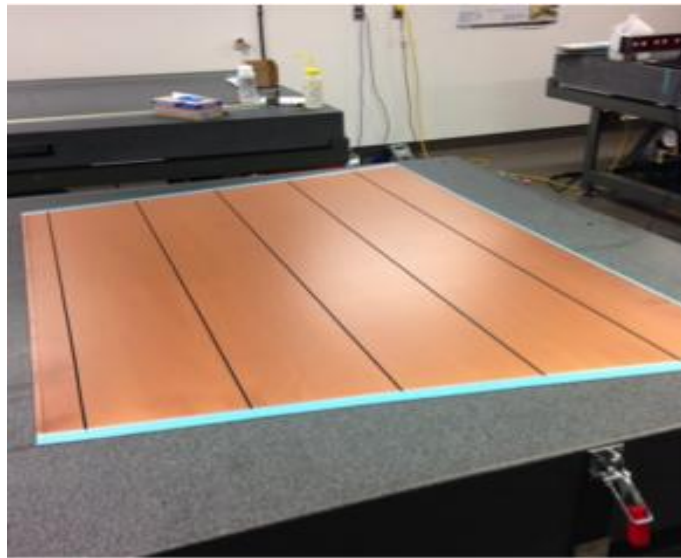


Рисунок 7 - Катодная плата, установленная на прецизионный гранитный стол для подготовки к нанесению на нее графита и измерения плоскостности платы.

Затем на катодную плату наносится резистивное графитовое покрытие. После нанесения графита плата просушивается при температуре  $20-23^{\circ}\text{C}$  и влажности 45-55%. Далее нанесенный слой графита полируется, так чтобы поверхностное сопротивление платы в каждой измеренной точке было равно  $200\text{ кОм/см}^2$  с точностью  $\pm 20\%$ .

После нанесения графитового покрытия приступают к приклейке поддержек анодных проволок и рамок, на которые будут расплавляться анодные проволоки. Катодная плата размещается на гранитном столе и прижимается к столу с помощью системы вакуумной откачки. Поверхность графита очищается с помощью анти-статической бумаги. Внешние рамки помещаются на катодную плату и фиксируются с помощью соответствующих штифтов. Затем на катодную плату, на сторону, на которой нанесен графит, помещаются кондукторы (см. рисунок 8).

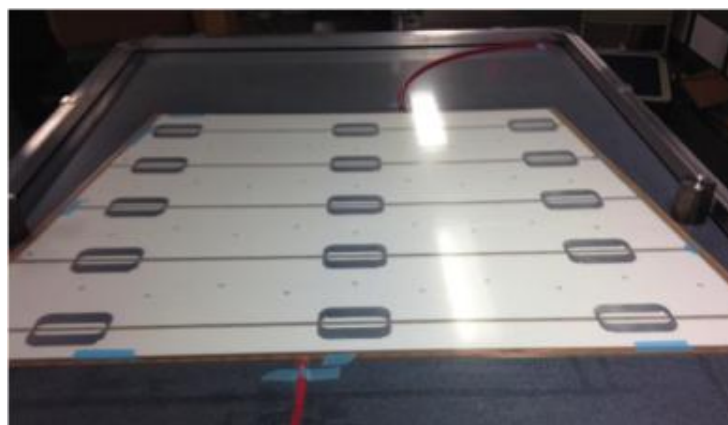


Рисунок 8 - Приклейка поддержек анодных проволок и рамок на катодную плату после нанесения графита.

Катодная плата с установленными рамками, поддержками проволок закрывается полиуретановой пленкой, из-под которой откачивается воздух. После склейки измеряется толщина катодной платы вместе с приклеенными рамками в 19 точках по периметру платы. Результаты заносятся в БД.

Измеренные значения толщины должны быть однородны в пределах  $\pm 40$  мкм. Допускается единичное отклонение  $\pm 50$  мкм. В этом случае плата может быть использована в паре с другой, у которой нет такого отклонения в данной точке. Среднеквадратичное отклонение результатов измерения должно быть меньше  $\pm 30$  мкм.

Намотка анодных проволок осуществляется с помощью созданной машины одновременно на две катодные платы, прижатые с помощью вакуума к двум сторонам намоточного стола. Для намотки используется 50 мкм золоченая вольфрамовая проволока производства компании Luma (Швеция). Процедура намотки начинается с намотки порядка 30 проволок которые приподняты на 5 мм над номинальным положением плоскости проволок с помощью специальной подкладки. Намотанные проволоки, располагаются так, чтобы перекрыть по крайней мере два зазора, которые разделяют группы проволок (см. рисунок 9).

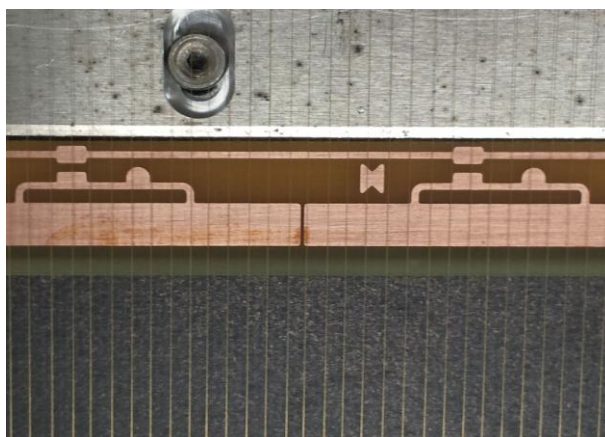


Рисунок 9 - Юстировка катодной платы, используя зазор между двумя группами проволок и специальную метку («бабочка»).

Намоточный стол устанавливается в горизонтальное положение, после чего выполняется юстировка катодной платы для центрирования проволок относительно зазоров между площадками, на которые она будет в дальнейшем распаиваться. Также проверяется, что проволока проходит через центр двух меток для юстировки, расположенных на высоковольтной линейке («бабочки»). Отъюстированная сторона катодной платы, прижимается к столу с помощью вакуума. Операция юстировки повторяется на другой стороне платы (основание трапеции). Затем стол переворачивается на 180 градусов и процедура юстировки повторяется для второй катодной платы. После

окончания юстировки намотанная проволока, использовавшаяся для юстировки сматывается назад и в намоточную машину загружается программа для намотки анодных проволок. После запуска программы намоточная машина работает несколько часов, пока не будет закончена намотка. Намотка осуществляется с низкой скоростью вращения ~2 оборота в минуту. Это позволяет избежать слишком большого натяжения на проволоке с катушкой. После намотки стол фиксируется в горизонтальном положении с помощью блокирующего механизма. Водорастворимый флюс наносится с помощью нейлоновой кисточки на места распайки проволок. Для распайки проволок припой помещается над проволоками. Проволоки расплавляются касанием паяльника с температурой 275<sup>0</sup>С. Операция повторяется по всей длине платы с двух сторон.

Проверка натяжения анодных проволок осуществляется визуально. Намоточный стол устанавливается в горизонтальное положение и выключается вакуумная откачка, с помощью которой плата прижимается к намоточному столу. Под действием натяжения проволок плата изгибается, как это показано на рисунке 10.

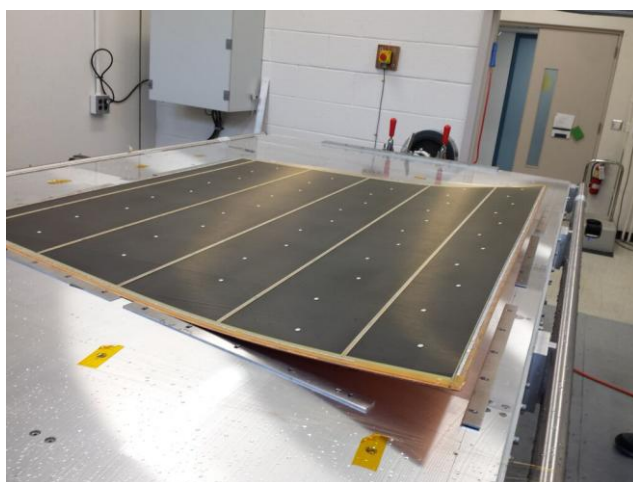


Рисунок 10 - Катодная плата на намоточном столе после распайки анодных проволок и выключении вакуумного прижима.

Проводится визуальный осмотр плоскости проволок для поиска возможных дефектов (изломы проволоки и т.п.). При обнаружении дефектов соответствующая группа проволок перематывается.

После намотки анодных проволок приступают к сборке однослойной камеры. Для сборки используются два катода один с намотанной проволокой, а второй без. Сборка осуществляется в чистой комнате. Катод с проволокой помещается на прецизионный гранитный стол в специальном зажимном приспособлении. С помощью вакуума катод прижимается к столу. На катодную плоскость с падами, зафиксированную на столе помещается с помощью направляющих штифтов вторая катодная плоскость со стрипами.

Поверх второй катодной плоскости с помощью подъемного механизма кладется плита из алюминиевого сотового материала (хоникомб), воздух из которой откачивается, обеспечивая тем самым прижим к плите верхней катодной плоскости (см. рисунок 11).



Рисунок 11 - На фотографии слева показана операция склейки однослойной ТЗК. Видна плита из алюминиевого сотового материала, положенная на гранитный стол. Между плитой и столом находится склеиваемый слой ТЗК. На фотографии справа показана однослойная ТЗК после процедуры склейки.

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%  $\text{CO}_2$ +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 обнаружались 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 течении 12 часов. Затем удаляется вакуумная резина и верхняя плита. Камера по-прежнему остается прижатой 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. Среднее значение толщины составило  $5,89 + 0,09 - 0,07$  мм, что находится в соответствии с номинальным значением. Среднеквадратичное отклонение составило 42 мкм при допустимом значении 50 мкм. Собранный камера имеет плоскостность лучше 100 мкм.

Акт изготовления изготовления однослойных экспериментальных образцов ТЗК приведён в Приложении 1.

Собранные образцы однослойных ТЗК камер проходили высоковольтные испытания. Перед проведением испытаний камеры продувались не менее 12 часов рабочей газовой смесью. Затем на них подавалось напряжение 3,3 кВ, которое сохранялось в течении 7 дней. В течение этого времени не наблюдалось превышения тока и высоковольтных пробоев. После этого на камеру подавалось напряжение 2,9 кВ и измерялся темновой ток, который оказался в пределах допустимых значений ~100 нА.



2.2. Проведение испытаний экспериментальных образцов ТЗК с помощью РС

Собранные экспериментальные образцы ТЗК камер проходят испытания с помощью рентгеновского стенда. Рентгеновский стенд состоит из двух координатной портальной системы перемещения рентгеновской трубки, шкафа управления системой перемещения, высоковольтного источника питания ТЗК и рентгеновской трубки. В качестве рентгеновской трубки используется трубка Мини-Х. Мини-Х является первой в своем роде автономной, миниатюрной рентгеновской системой, которая включает в себя рентгеновскую трубку, блок питания, электронику управления и соединение USB с компьютером. Основные характеристики трубки приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные характеристики рентгеновской трубки Мини-Х.

|   |  |
|---|--|
| Напряжение на трубке  | От 10 до 50 кВ   |
| Ток трубки  | 5 мкА мин. / 200 мА макс   |
| Непрерывная выходная мощность                               | 4 Вт при 100% нагрузке   |
| Материал окна   | Бериллий (Be)  |
| Толщина окна  | 127 мкм  |
| Размер фокусного пятна                                      | Примерно 2 мм  |
| Угол выходного конуса                                       | 120 °  |
| Охлаждение  | С воздушным охлаждением  |
| Высокая стабильность напряжения                             | <0,1%  |
| Уровень радиации на расстоянии 5 см с установленной защитой | <5 мкЗв / ч (0,5 мбэр / ч)   |
| Потребляемая мощность                                       | 9 Вт при 50 кВ и 80 мкА  |
| Входное напряжение  | 12 В постоянного тока (адаптер в комплекте)                            |
| Контроль  | USB, мини-USB разъем (кабель в комплекте)                              |
| Время установления  | Обычно <1 секунды  |
| Вес   | 360 грамм  |
| Влажность   | От 30 до 90% без конденсата  |
| Диапазон рабочих температур                                 | -10 ° C до 50 ° C  |
| Диапазон температур при хранении                            | -25 ° C до 60 ° C  |
| Безопасность управления и индикаторы                        | 1) внешняя блокировка<br>2) сигнальный светодиод<br>3) звуковой сигнал |

Основная цель испытаний ТЗК камеры с помощью рентгеновского стенда состоит в измерении тока камеры при ее облучении узким рентгеновским пучком. Это позволяет найти области в камере, которые имеют повышенный ток, а также определить однородность коэффициента газового усиления камеры. Для проведения испытаний ТЗК камера устанавливается с помощью специальной тележки в рентгеновском стенде, внешний вид которого показан на рисунке 12.



Рисунок 12 - Фотографии рентгеновского стенда (слева) и рентгеновской трубки Мини-Х.

Испытания выполняются в автоматическом режиме. Специальная программа управляет перемещением рентгеновской трубки по поверхности камеры, останавливаясь на заданное время экспозиции в заданном количестве точек. В точках остановки выполняются измерения тока камеры. На рисунке 13 показаны результаты измерения тока для двух ТЗК камер.

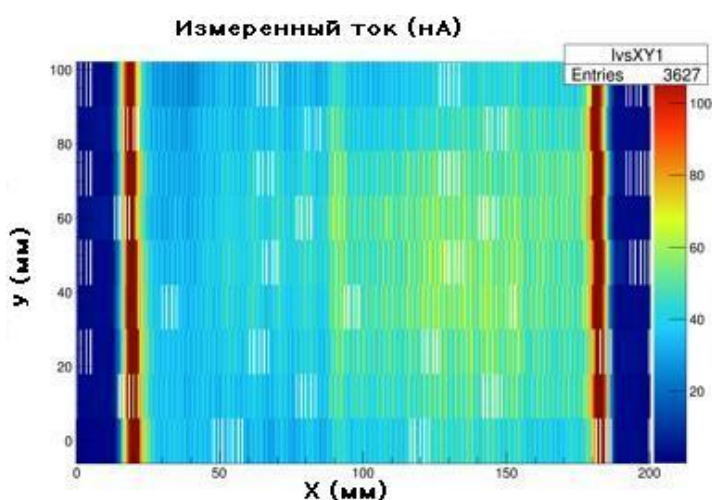


Рисунок 13 - Результаты измерения тока протекающего через камеру при ее облучении узким рентгеновским пучком в зависимости от положения рентгеновской трубки по X-Y координатам.

Как видно из этих данных, значение тока не превышает 40 нА по всей площади ТЗК камер, за исключением узких областей расположенных на краях камеры. Это связано с различными краевыми эффектами, которые в целом не влияют на работу камеры.

По результатам испытаний составлен протокол, приведённый в приложении 2.

3. Оснащение экспериментальных образцов мюонных камер ДТМ регистрирующей электроникой и проведение исследований физических характеристик на космике или пучке заряженных частиц.

Изготовлено 2 экспериментальных образца камер из дрейфовых трубок малого диаметра, фото приведено на рисунке 14.



Рисунок 14 - Фотография экспериментального образца мюонной камеры из ДТМ

Каждая экспериментальная камера состоит из 48 дрейфовых трубок (ДТ) длиной 568 мм, которые склеены между собой в 3 слоя, в каждом слое по 16 шт.; расстояние между любыми соседними сигнальными проволоками равно 15,5 мм (см. рисунок 15).

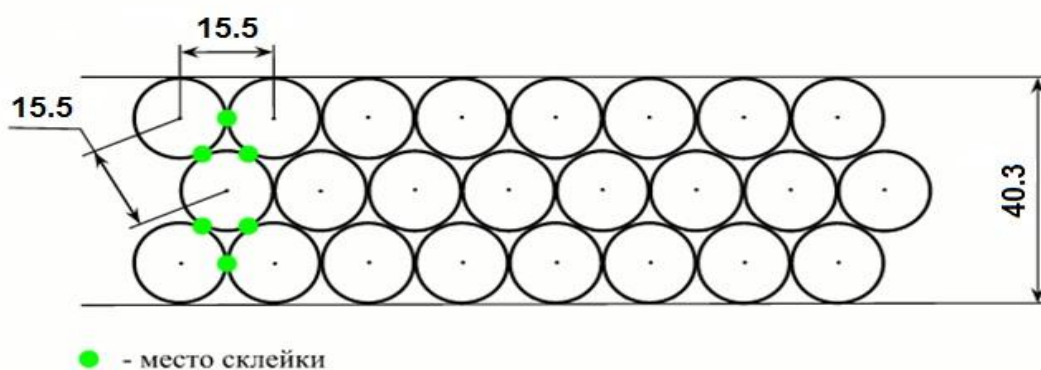


Рисунок 15 - Схема расположения дрейфовых трубок в камере

Исследования проводились с камерами, заполненными аргон-углекислотной газовой смесью (соотношение 93:7) при атмосферном давлении и с использованием системы сбора данных и управления в стандарте электроники МИСС для детектора на дрейфовых трубках, подробно описанной в [2]. Камеры были оснащены регистрирующей электроникой, основанной на 8-канальных усилителях, изготовленных на базе

интегральной схемы «Ока-1М», которые подключаются к дрейфовым трубкам через переходные платы, объединяющие группы из 24-х трубок. Фотографии платы 8-канальных усилителей и сборки переходной платы с тремя платами усилителей показаны на рисунках 16 и 17 соответственно.

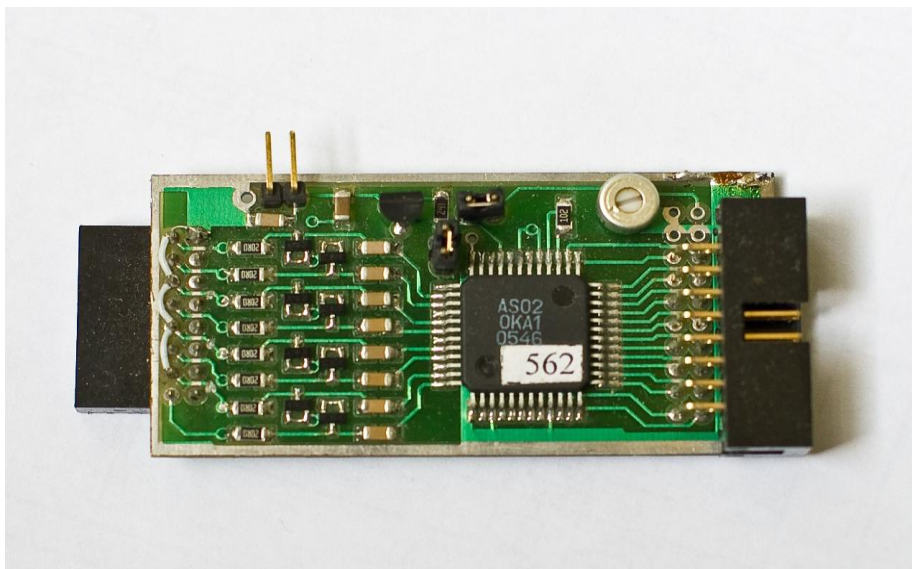


Рисунок 16 - Плата с усилителями на 8 каналов

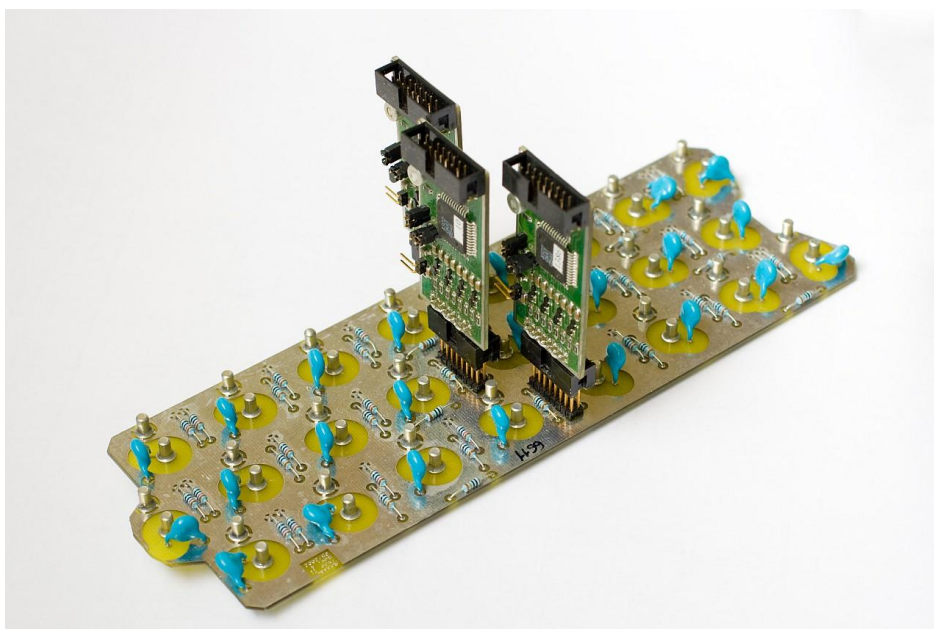


Рисунок 17 - Переходная плата в сборе с тремя платами 8-канальных усилителей

Исследования начинались со сканирующего сеанса, целью которого являлось определение рабочей точки детектора по высокому напряжению. Для этого в автоматическом режиме, с использованием высоковольтного регулируемого источника

питания БПВ-5, выполнялась серия измерений с последовательным увеличением высокого напряжения. Полученная в результате такой процедуры счетная характеристика трубок имеет характерный вид, состоящий из трех участков: начального роста при увеличении приложенного напряжения, псевдоплато со слабо выраженным ростом и правого края с резким увеличением интенсивности счета. Измеренные данные аппроксимируются гладкой функцией, отображающей указанные особенности. Рабочая точка выбирается на правом краю псевдоплато.

На рисунке 18 приведена усредненная по всем дрейфовым трубкам счетная характеристика первого экспериментального образца мюонной камеры ДТМ заполненной рабочей газовой смесью (аргон + 7% CO<sub>2</sub>) при атмосферном давлении.

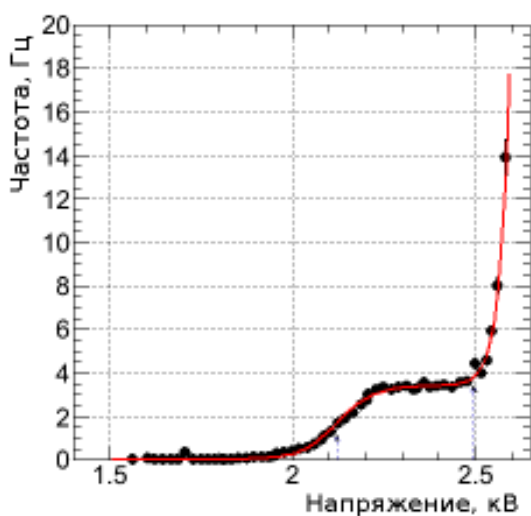


Рисунок 18 - Усредненная счетная характеристика экспериментальной камеры из ДТМ.

Как видно из кривой, длина плато по напряжению – более 250 В, а оптимальное рабочее напряжение равно  $2,4 \div 2,5$  кВ.

Физические исследования экспериментальных образцов камер ДТМ проводились в режиме отсутствия внешнего триггерного сигнала, т.е. в так называемом «бестриггерном режиме», когда псевдо-триггерный сигнал с определенной периодичностью формируется таймером и все сигналы, пришедшие в пределах определенного временного интервала, регистрируются электроникой. Автокалибровка, суть которой состоит в определении функциональной зависимости  $\tau(t)$ , т.е. зависимости времени дрейфа от расстояния, на котором ионизирующая частица прошла от анода, и реконструкция трека выполняется с помощью процедуры кластеризации этих сигналов, где под кластеризацией понимается определение совпадений более  $N$  (число, задаваемое оператором) трубок во временном интервале 500 нсек. Для  $N=16$  (количество дрейфовых трубок в одном слое камеры) заполнялись гистограммы временных распределений, анализ которых позволяет

определить максимальное время дрейфа в каждой трубке и, как следствие, индивидуальную зависимость  $t(r)$  (или инвертированную зависимость  $t(r)$ ). Измеренная таким образом зависимость  $t(r)$  при напряжении на анодных проволоках 2,45 кВ приведена на рисунке 19.

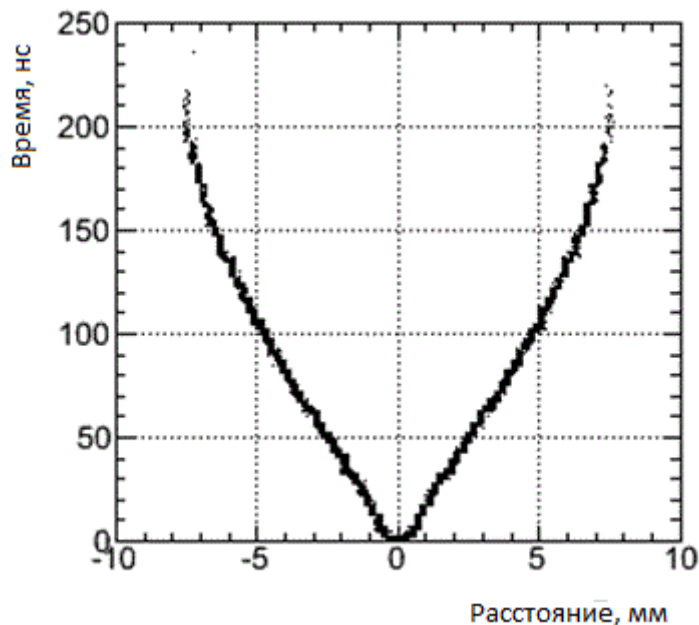


Рисунок 19 - Зависимость времени дрейфа от расстояния до анодной проволоки.

Пример загрузки трубок в кластерах показан на рисунке 20. Средняя, наиболее загруженная часть распределения, соответствует среднему слою трубок в камере.

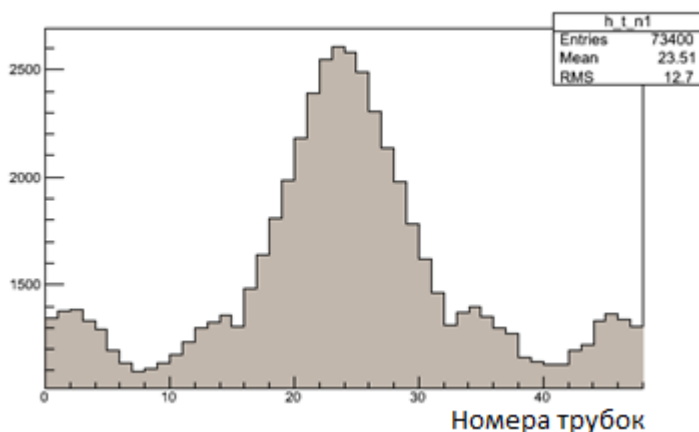


Рисунок 20 - Загрузка дрейфовых трубок в кластерах

Пример (иллюстрация) реконструкции трека показан на рисунке 21. Показана схема камеры со всеми дрейфовыми трубками (вид «с торца»).

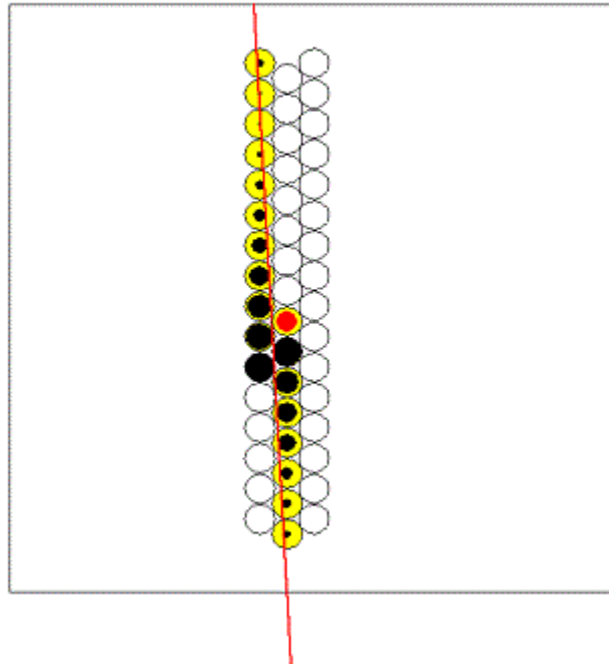


Рисунок 21 - Реконструированный трек в камере ДТМ.

Радиус выделенной области внутри трубки соответствует измеренному расстоянию зарегистрированного трека от анодной проволоки. В качестве трека принимается общая касательная к окружностям, определенным по времени дрейфа посредством найденного  $r(t)$ .

Для оценки координатного разрешения, для «длинных» треков (с числом сработавших трубок более 14) восстанавливались траектории заряженных частиц методом наименьших квадратов по всем сработавшим трубкам и накапливались гистограммы «невязок» - отклонений измеренной каждой дрейфовой трубкой координаты от данной восстановленной траектории. Это распределение фитировалось суммой двух гауссианов: первый, более узкий, приписывается координатному разрешению, второй – широкий – ответственен за далеко отстоящие срабатывания, в частности, от выбиваемых из стенок трубок дельта-электронов и случайных срабатываний. Распределение «невязок» для напряжения на сигнальных проволоках 2,45 кВ показано на рисунке 22.



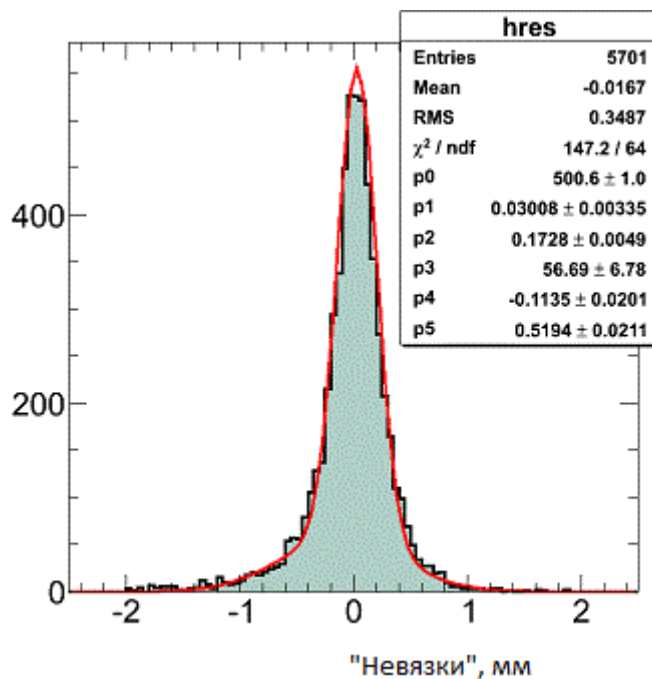


Рисунок 22 - Распределение «невязок» в камере при напряжении на анодных проволоках 2,45 кВ

В стат-боксе приведены параметры фита, среди которых указан параметр p2 – сигма узкого гаусса, который и является искомой оценкой координатного разрешения.

Для получения зависимости пространственного разрешения экспериментальных образцов камер ДТМ от напряжения на анодных проволоках, была проведена серия экспозиций при разных напряжениях. Данная зависимость приведена на рисунке 23.

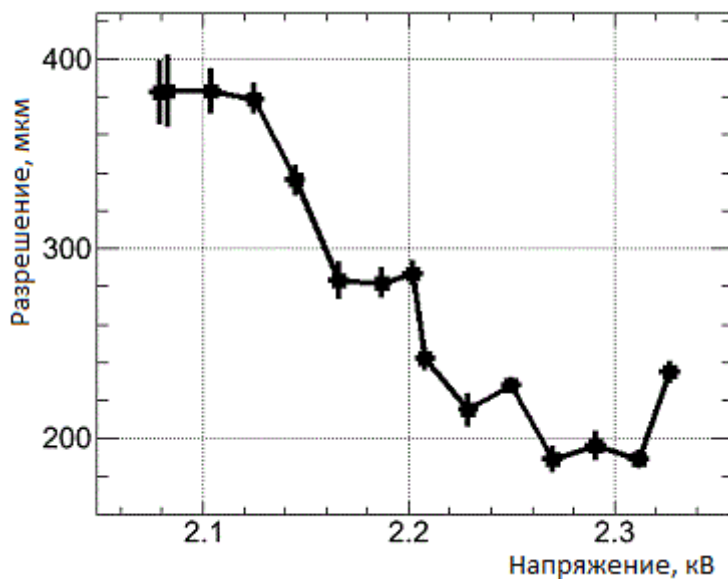


Рисунок 23 - Зависимость пространственного разрешения от напряжения на анодных проволоках

По условиям эксплуатации детектора АТЛАС, в рабочем режиме давление в мюонных камерах устанавливается 3 атм. Известно, что эффект уменьшения диффузии электронов в аргон-углекислотной газовой смеси при переходе от 1 атм. к 3 атм. приводит к улучшению пространственного разрешения в 1,8 раза. Поэтому из рисунка 23 следует, что при давлении 3 атм. ренормированное пространственное разрешение камеры составит величину  $\sim 95$  мкм.

Как показывают исследования экспериментальных образцов камер, уменьшенный вдвое (по сравнению с используемым в настоящее время в детекторе АТЛАС вариантом дрейфовых трубок) диаметр трубок повышает их загрузочную способность более чем на порядок, без ухудшения остальных физических характеристик.

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

Программа и методики испытаний ТЗК представлена в комплекте отчётной документации третьего этапа работ по соглашению. Программа и методики испытаний ТЗК с помощью рентгеновского стенда представлена в виде отдельного документа в комплекте отчётной документации пятого этапа соглашения.

Программа и методики испытаний экспериментального образца (макета) миникалориметра установки АТЛАС представлена в виде отдельного документа в комплекте отчётной документации пятого этапа соглашения.

В виде отдельных документов представлены также Программа и методика радиационных испытаний новой электроники ЖАК и сцинтилляционного калориметра и Программа и методика испытаний оптических свойств облучённых образцов сцинтиллятора для горячих зон установки АТЛАС.

5. Изготовление экспериментального образца миникалориметра.

Испытания экспериментального образца миникалориметра в пучке частиц с интенсивностью до  $10^{12}$  частиц/с на ускорителе У-70 ИФВЭ.

В соответствии с планами работ и утверждённой рабочей документацией во второй половине 2016 г. был изготовлен макет модулей переднего миникалориметра, криостат и система криогенного обеспечения и проведены испытания макета, включая облучение пучком протонов от ускорителя ИФВЭ.

Корпус макета был изготовлен из меди марки М1, в котором были просверлены 32 отверстия. В отверстия устанавливались электроды. Внешние электроды (катоды) представляют собой медные втулки с внутренним диаметром  $d_1$  5,15 мм и толщиной стенки 0,54 мм. Внутри втулок вставлялись медные стержни с внешним диаметром  $d_2$  4,812 или 4,912 мм, являющиеся анодами. Зазор между втулкой и стержнем  $(d_1-d_2)/2$  определяет дрейфовый путь электронов и ионов в жидком аргоне. Таким образом, 16 электродов имели зазор между анодом и катодом 119 мкм и 16 электродов – 169 мкм. Ионизационные сигналы снимались с анодов, которые были объединены параллельно по четыре. Таким образом, макет имел 8 сигнальных выходов – по 4 для каждой ширины зазора.

Изготовленный макет показан на рисунке 24.

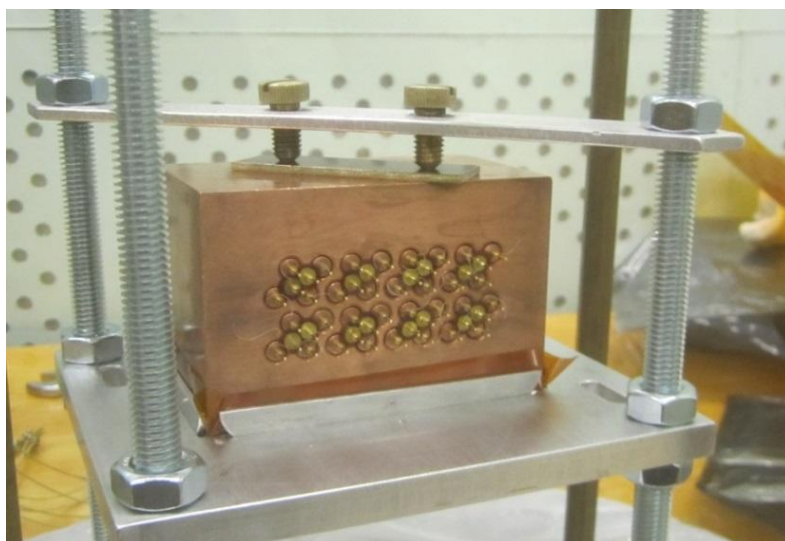


Рисунок 24 - Прототип модулей на испытательном стенде

После сборки макета были проведены его испытания на стенде (см. рисунок 25) на напряжение пробоя между электродами и сопротивления изоляции между ними.



Рисунок 25 - Испытания макета на стенде

Все электроды выдержали испытательное напряжение 500 В. Сопротивление изоляции оказалось более 1 Мом, что удовлетворяет техническим условиям.

Для испытаний на пучке частиц макет помещался в криостат из нержавеющей стали с вакуумной и многослойной теплоизоляцией. На крышке криостата были установлены сигнальные и высоковольтные разъёмы и патрубки для закачки и эвакуации газообразного аргона, подачи жидкого азота в змеевик-холодильник и подсоединения предохранительных клапана и диафрагмы (см. отчёты за 3 и 4 этапы). К крышке криостата также крепились шпильки с опорной площадкой для исследуемого макета. На шпильках и на макете были установлены датчики температуры, являющиеся одновременно указателями уровня жидкого аргона. Перед заполнением аргоном криостат откачивался форвакуумным насосом до давления 3 мторр и трижды промывался аргоном высокой чистоты с целью минимизации уровня электроотрицательных примесей в аргоне от находящихся в воздухе газов и прежде всего кислорода. На рисунке 26 показан криостат с прототипом модулей внутри во время установки на пучке частиц.



Рисунок 26 - Установка криостата с прототипом модулей на пучок протонов канала №23 ускорителя ИФВЭ.

Для заполнения криостатов аргоном и поддержки его в жидком состоянии во время испытаний была создана система криогенного обеспечения. Газообразный аргон из стандартных 40-литровых баллонов через систему вентиля и блок очистки, позволяющий очистить аргон до уровня электроотрицательных примесей не более  $3 \cdot 10^{-7}$  по кислороду, поступал в криостат. Одновременно в змеевики-холодильники в криостате из танка ТРЖК подавался жидкий азот, что приводило к ожижению аргона. После того как жидкий аргон в рабочих криостатах достигал определённого уровня выше макета, включалась система, автоматически поддерживающая давление паров аргона в интервале 1,2-1,5 атмосфер путём пропускания жидкого азота через змеевики-холодильники. Уровень электроотрицательных примесей в аргоне во время испытаний на пучке частиц контролировался промышленным прибором Illinois Instruments Model 912 с точностью  $\sim 10^{-8}$ . После завершения испытаний аргон из криостатов испарялся в атмосферу. Пульт управления системой криогенного обеспечения с азотным танком ТРЖК показан на рисунке 27.



Рисунок 27 - Пульт управления системой криогенного обеспечения с азотным танком ТРЖК.

Исследования характеристик макета в пучке протонов проводились на канале №23 ускорителя ИФВЭ. Энергия протонов составляла 50 ГэВ. Интенсивность пучка могла варьироваться от  $10^6$  до  $10^{11}$  протонов/с. Пучок состоял из сгустков протонов

длительностью 30 нс. Минимальный временной интервал между сгустками – 165 нс, максимальный – 5 мкс. Для измерения интенсивности, размеров и положения пучка при интенсивности до  $10^8$  р/с использовались сцинтилляционные счётчики и годоскопы, при большей интенсивности – камеры вторичной эмиссии, абсолютная калибровка которых проводилась по наведённой активности помещённых в пучок алюминиевых фольг. Исследования характеристик макета состояли в измерении амплитуды и формы ионизационного сигнала в зависимости от величины интенсивности протонного пучка и интервала между сгустками при помощи стандартной электроники V1742B(32+2 channel 12 bit 5 GS/s Switched Capacitor Digitizer) фирмы CAEN, которая подобно цифровым осциллографам позволяет оцифровывать форму сигнала с шагом от 200 пс до 4 нс (рисунок 28).

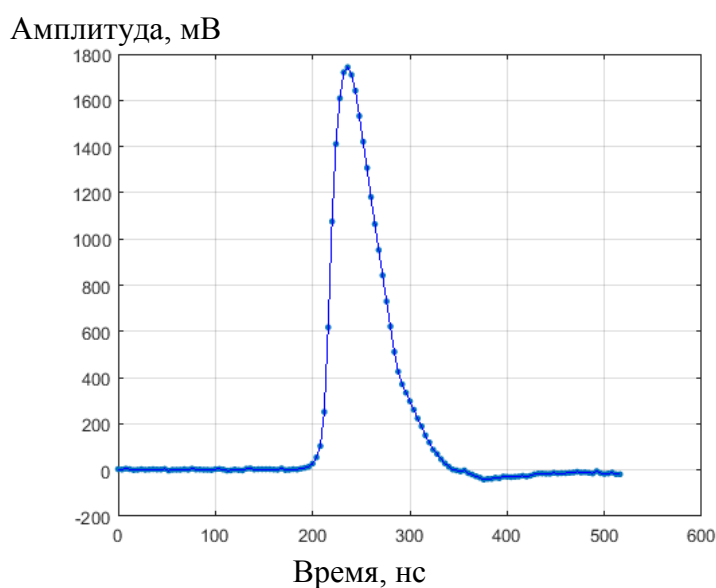


Рисунок 28 - Форма ионизационного сигнала после усиления и оцифровки.

Полная обработка и анализ полученных данных могут занять несколько месяцев, но уже сейчас можно утверждать, что предпочтительным вариантом является миникалориметр с зазором между электродами 119 мкм, который обеспечит существенное (менее 10%) уменьшение амплитуды сигнала при повышенной светимости LHC, связанное с образованием пространственного заряда медленно дрейфующих положительных ионов аргона, по сравнению с миникалориметром с зазором 169 мкм. В конце измерений в течение трёх суток было проведено облучение макета пучком протонов с максимальной интенсивностью с целью проверки его радиационной стойкости.

Проведённые после облучения измерения показали, что изменение амплитуды сигнала не превысило 6%. Таким образом, как по своим физическим характеристикам, так и по радиационной стойкости передний жидкоаргоновый миникалориметр предложенной конструкции с зазором между электродами 119 мкм должен удовлетворять условиям работы установки АТЛАС при повышенной светимости БАК.

Протокол испытаний миникалориметра приведён в приложении 3.

б. Измерение оптических свойств облучённых образцов сцинтиллятора для горячих зон.

Облучению гамма квантами от кобальтового источника были подвергнуты 10 образцов сцинтилляционных пластин от трех разных производителей. В таблице 2 представлены данные по средней поглощенной дозе вдоль осевой линии образца.

Таблица 2 - Средняя поглощённая доза для облученных образцов.

| Номер | Производитель | Марка    | Средняя поглощенная доза (Гр) |
|-------|---------------|----------|-------------------------------|
| 1     | ИФВЭ          |          | 1464±122                      |
| 2     | ИФВЭ          |          | 1438±119                      |
| 5     | Saint-Gobain  | BC-408   | 1464±122                      |
| 6     | Saint-Gobain  | BC-408   | 1412±118                      |
| 7     | ИФВЭ          |          | 1455±123                      |
| 8     | ИФВЭ          |          | 1438±119                      |
| 9     | ИФВЭ          |          | 1412±118                      |
| 10    | ИФВЭ          |          | 1366±114                      |
| 11    | Харьков       | UPS-923А | 1455±123                      |
| 12    | Харьков       | UPS-923А | 1366±114                      |

По прошествии 57 и 78 дней после окончания облучения для каждого из образцов были измерены прозрачность вдоль осевой линии и световыход, представленные в таблице 3.

Таблица 3 - Измеренные для всех образцов световыход и прозрачность до и после облучения

| Образец | До облучения           |                    | 57 дней после облучения |                    | 78 дней после облучения |                    |
|---------|------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
|         | Световыход<br>отн. ед. | Прозрачность<br>мм | Световыход<br>отн. ед.  | Прозрачность<br>мм | Световыход<br>отн. ед.  | Прозрачность<br>мм |
| 1       | 1538                   | 234                | 1536                    | 193                | 1383                    | 191                |
| 2       | 1356                   | 332                | 1352                    | 229                | 1235                    | 227                |
| 5       | 1823                   | 200                | 1791                    | 188                | 1619                    | 184                |
| 6       | 1923                   | 236                | 1883                    | 218                | 1687                    | 223                |
| 7       | 915                    | 242                | 906                     | 235                | 836                     | 219                |
| 8       | 904                    | 288                | 887                     | 296                | 815                     | 272                |
| 9       | 890                    | 251                | 878                     | 230                | 793                     | 229                |
| 10      | 898                    | 260                | 866                     | 273                | 789                     | 264                |
| 11      | 1326                   | 522                | 1274                    | 358                | 1154                    | 356                |
| 12      | 1340                   | 546                | 1289                    | 377                | 1164                    | 362                |

Ошибка в определении световыхода не превышает 5 %, прозрачности – 10 %.

Световыход после облучения не изменился в пределах ошибок ни для одного из образцов. 10% скачок в световыходе для всех образцов в измерениях, сделанных через 78 дней после окончания облучения, вызван неизвестной систематической ошибкой (такое же увеличение наблюдалось и для необлученных эталонных образцов) и не имеет отношения к реальному положению дел.



Ухудшение прозрачности существенно и для некоторых образцов может достигать 30 %. На рисунке 29 показана зависимость изменения прозрачности после облучения для всех представленных образцов.

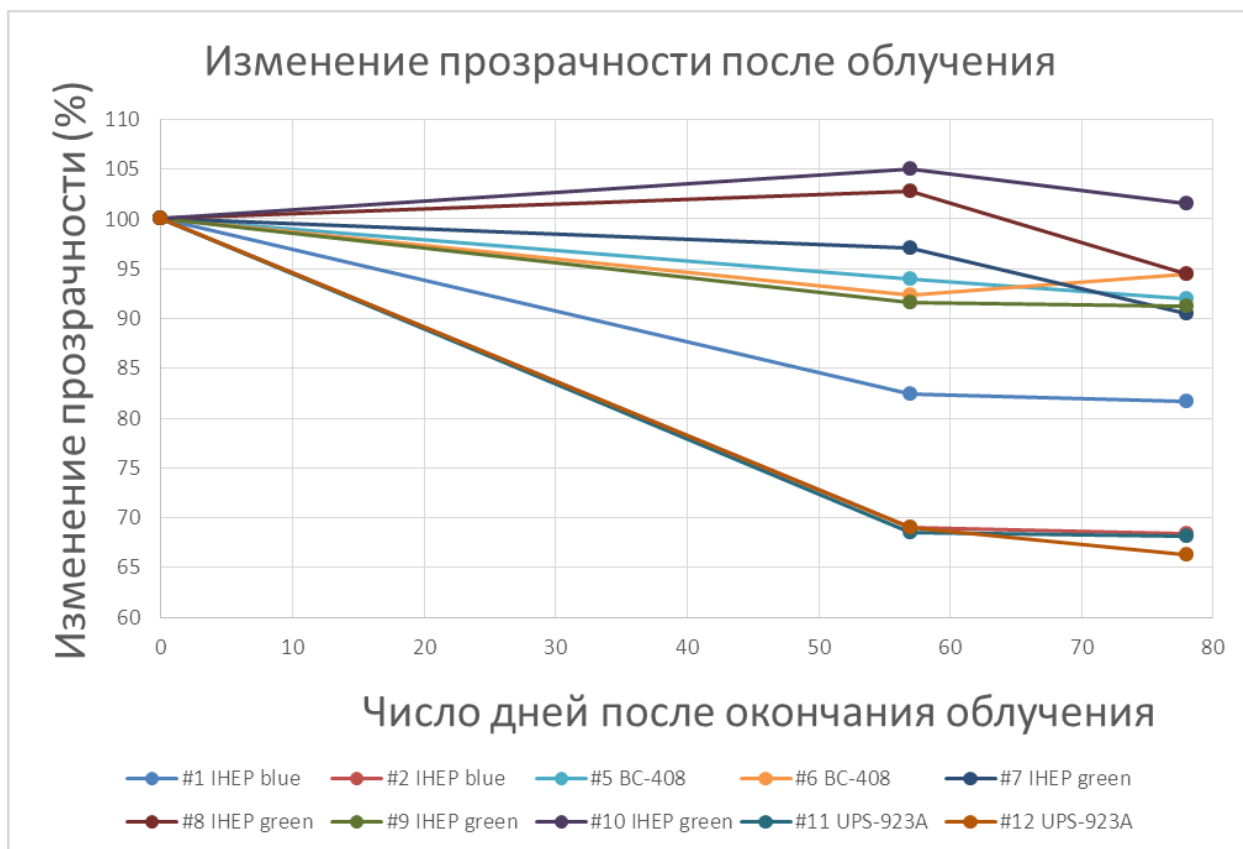


Рисунок 29 - Изменение прозрачности после облучения для всех образцов.

Образцы 7-10 от ИФВЭ с зеленой спектросмещающей добавкой показали наименьшее ухудшение прозрачности (в среднем 5 %). Немного хуже оказались образцы 5-6 от Saint-Gobain (7 %). Синие образцы 1-2 от ИФВЭ потеряли 25 %, образцы 11-12 UPS-923A – 33 %.

Несмотря на самое малое относительное изменение прозрачности в образцах 7-10 производства ИФВЭ, предпочтение в настоящий момент следует отдать образцам 5-6 производства Saint-Gobain в связи с наивысшим световыходом. Украинский сцинтиллятор UPS-923A продемонстрировал самую большую деградацию прозрачности. Но его первоначальная прозрачность была в два раза лучше средней. Поэтому этот сцинтиллятор можно поставить вторым в списке.

Сцинтиллятор от ИФВЭ с вторичной добавкой ВВQ показал себя наиболее радиационно-стойким, но для большей конкурентоспособности ему необходимо увеличить световыход. Сцинтиллятор производства ИФВЭ с вторичной добавкой РОРОР оказался на предпоследнем месте. Данный сцинтиллятор, изначально имевший средние

параметры, для использования в горячих зонах не годится.

Исследовалась также радиационная стойкость сцинтилляторов к нейтронному облучению. При светимости БАК  $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  ожидаемые интегральные потоки нейтронов за 10 лет работы будут составлять около  $10^{12} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$ . Для тестирования образцов сцинтилляторов было решено набрать интегральную дозу с примерно 10-кратным запасом. Для сравнения, наряду с выбранным сцинтиллятором UPS 923D для облучения также были взяты сцинтилляторы EJ-200. В связи с тем, что диаметр трубы массивной части облучательной установки равен 17 см, для облучения были вырезаны небольшие образцы размерами 20мм x 20мм x 6мм, а также образцы EJ-200 15мм x 20мм x 10мм. На рисунке 30 показаны образцы UPS 923D (1-4) и EJ-200 (5-11), перед их размещением в облучательной установке.



Рисунок 30 - Образцы сцинтилляторов UPS и EJ-200, готовых к облучению на канале №3 реактора ИБР-2.

Три образца каждого типа были направлены на облучение, и по одному образцу были оставлены в качестве контрольных. Наряду с данными образцами нами также был подготовлен для облучения образец сцинтиллятора UPS 923D размерами 100 мм x 100мм x 6мм.

Облучаемые образцы располагались в трех точках (станциях) в конце трубы массивной части облучательной установки, на расстояниях, примерно, 640 см (станция №3), 700 см (станция №2) и 760 см (станция №1) от водяного замедлителя. Для контроля потока нейтронов в каждой станции вместе с образцами сцинтилляторов размещались никелевые фольги, по наведенной активности которых определяется интегральный поток нейтронов с энергией  $E_n > 1 \text{ МэВ}$ .

Все работы по размещению образцов в облучательной установке и их выемке, перемещению установки, контролю нейтронных потоков проводились сотрудниками Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, допущенными к проведению таких работ.

Облучение образцов сцинтилляторов проводилось в течение 14 суток. По наведенной активности никелевых фольг для каждой станции были определены интегральные потоки нейтронов с энергией  $E > 1 \text{ МэВ}$ . Значения приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Интегральные потоки нейтронов на разных станциях

| Станция | Плотность потока, н/см <sup>2</sup> /с | Интегральный поток, н/см <sup>2</sup> |
|---------|--|---------------------------------------|
| №1      | $10^6$                                 | $1,2 \cdot 10^{12}$                   |
| №2      | $3 \cdot 10^6$                         | $3,6 \cdot 10^{12}$                   |
| №3      | $7,7 \cdot 10^6$                       | $9,4 \cdot 10^{12}$                   |

Следует отметить, что после облучения видимых изменений образцов не наблюдается. Нами также были исследованы оптические свойства облученных образцов.

Основная доза облучения в канале №3 приходится на нейтроны и несколько процентов – на гамма-излучение. Облучение образцов приводит к частичной потере оптических свойств, т.е. снижению световыхода и потере прозрачности сцинтилляторов. Поэтому знание предельных доз облучения, при которых оптические свойства ухудшаются до критических значений, является чрезвычайно важным при создании установок с длительным сроком работы. Первоначальное облучение было проведено при суммарных потоках на уровне  $10^{12}$  н/см<sup>2</sup>. Первые тесты показали, что оптические свойства образцов остались практически неизменными при данных флюенсах. Дополнительное облучение аналогичных образцов проведено в потоках от  $4 \cdot 10^{12}$  до  $10^{14}$  н/см<sup>2</sup>. Плотность потока нейтронов и интегральные потоки нейтронов для трех облученных образцов приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Плотность потока и интегральные потоки нейтронов для трех облученных образцов

| Образец | Плотность потока, н/см <sup>2</sup> /с | Интегральный поток, н/см <sup>2</sup> |
|---------|--|---------------------------------------|
| S1      | $1,2 \cdot 10^8$                       | $1,8 \cdot 10^{14}$                   |
| S2      | $1,2 \cdot 10^7$                       | $1,7 \cdot 10^{13}$                   |
| S3      | $2,5 \cdot 10^6$                       | $3,8 \cdot 10^{12}$                   |

Оптические свойства облученных образцов сцинтилляторов исследовались на специально оборудованном стенде в ЛЯП ОИЯИ. Исследовались изменение прозрачности (светопропускание) и изменение световыхода облученных сцинтилляторов (S1, S2, S3) относительно контрольных (необлученных) образцов (S0). Прозрачность образцов исследовалась при помощи спектрофотометра SolidSpec-3700 DUV. Световыход измерялся по среднему току с анода ФЭУ при облучении образцов радиоактивным источником. Для измерения анодного тока использовался пикоамперметр Keithley 6487.

Спектрофотометр SolidSpec-3700 DUV позволяет проводить исследования прозрачности в диапазоне от 165 нм до 3300 нм. В случае пластического сцинтиллятора

интерес представляет область от 400 нм (нижняя граница пропускания пластика) до примерно 550 нм, что соответствует зоне чувствительности используемых фотодетекторов. Поэтому прозрачность образцов исследовалась в области длин волн 300-800 нм.

Исследования свойств образцов проводились в соответствии с «Программой и методикой испытаний оптических свойств облученных образцов сцинтиллятора для горячих зон установки АТЛАС».

Результаты измерения светопропускания образцов в диапазоне длин волн 300-800 нм приведены на рисунке 31.

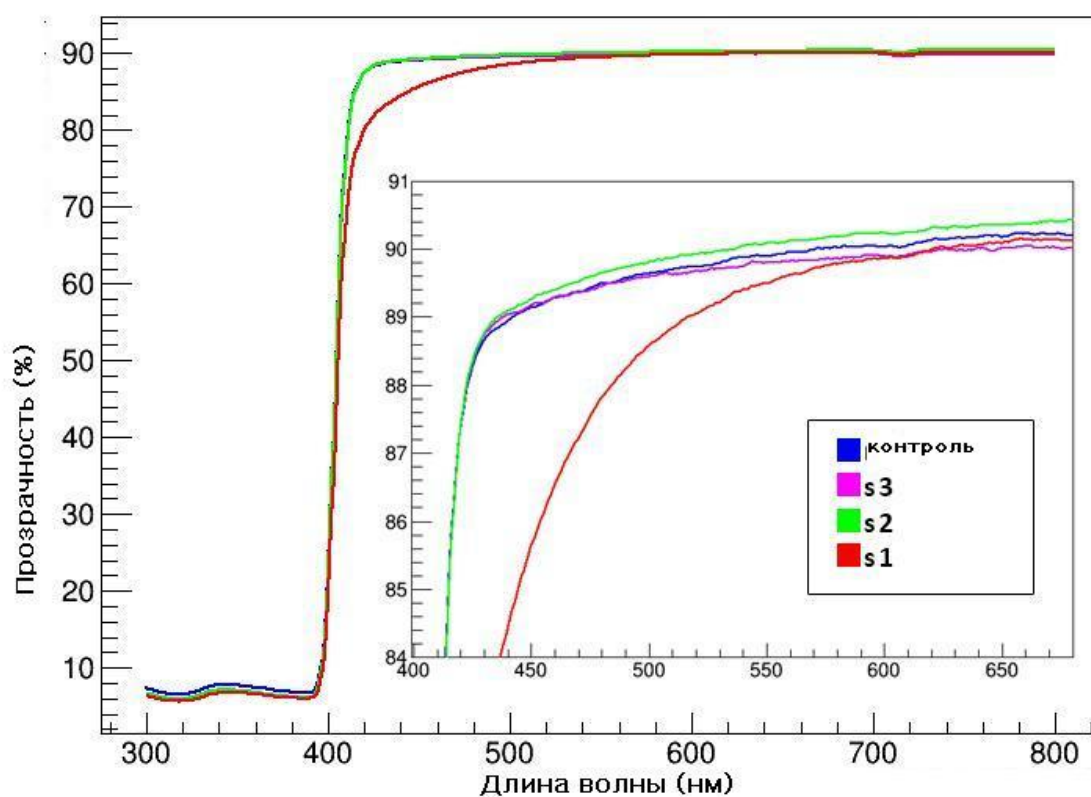


Рисунок 31 - Светопропускание образцов сцинтилляторов в диапазоне волн 300-800 нм

Вставка показывает детальное поведение светопропускания в интересующем нас диапазоне. Видно, что при суммарном потоке до  $1,7 \cdot 10^{13}$  н/см<sup>2</sup> видимых потерь светопропускания не происходит. При потоке  $1,8 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup> светопропускание при длине волны 450 нм снижается, примерно, на 3,5% по сравнению с контрольным образцом.

Изменение световыхода облученных образцов относительно контрольного экземпляра проводилось с использованием ФЭУ Hamamatsu H1949-50. Образцы сцинтилляторов размещались непосредственно на фотокатод ФЭУ. Сцинтилляторы облучались гамма-источником <sup>137</sup>Cs, располагавшимся над образцом, как показано на

рисунке 32.

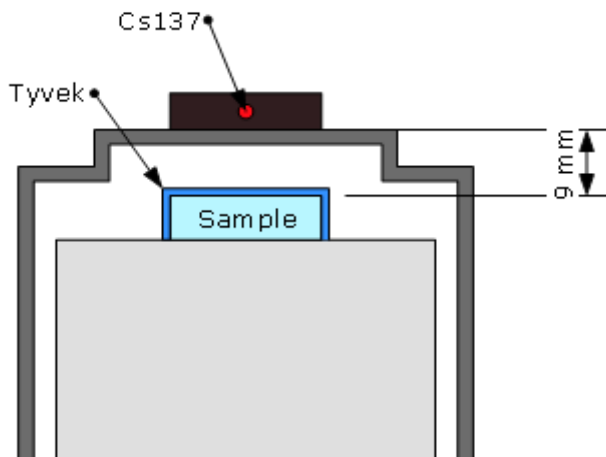


Рисунок 32 - Схема расположения образцов сцинтилляторов и радиоактивного источника.

Анодный ток ФЭУ, вызванный высвечиванием сцинтилляторов, измерялся пикоамперметром Keithley 6487. Результаты измерения анодного тока приведены на рисунке 33 как отношение анодного тока исследуемых образцов Si к анодному току контрольного образца S0.

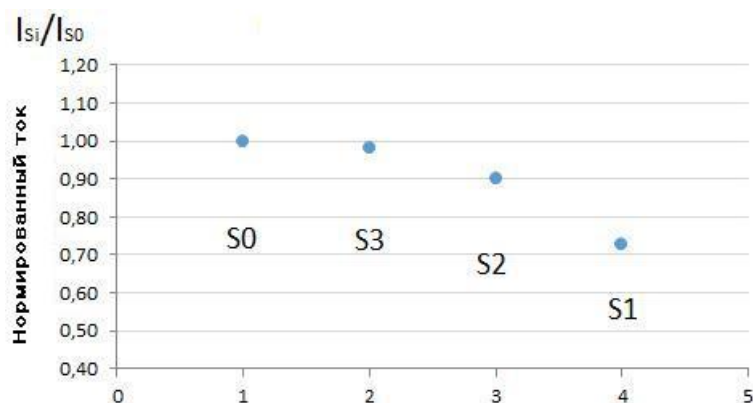


Рисунок 33 - Отношение среднего анодного тока облученных образцов к току контрольного образца.

При флюенсе  $3,8 \cdot 10^{12}$  н/см<sup>2</sup> потери световыхода практически не наблюдается. Увеличение нейтронного флюенса до  $1,7 \cdot 10^{13}$  н/см<sup>2</sup> приводит к снижению световыхода на 10%. Суммарный поток  $1,8 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup> вызывает уменьшение световыхода примерно на 28%, что является уже критическим для детекторов в "горячих» зонах.

Таким образом, разработка и исследование сцинтилляторов для горячих зон установки АТЛАС продемонстрировали возможность использования сцинтилляторов типа UPS923 в горячих зонах детектора при интегральных потоках до  $10^{14}$  н/см<sup>2</sup> с приемлемыми потерями оптических и сцинтилляционных свойств сцинтилляторов. Данный тип сцинтиллятора может быть использован при обновлении сцинтилляционных

детекторов во время следующей длительной остановки БАК. Протокол испытаний облучённых образцов сцинтилляторов приведен в Приложении 4.

7. Радиационные испытания новой электроники ЖАК и сцинтилляционного калориметров.

На первом этапе выполнения работ нами была сделана оценка радиационной нагрузки в области размещения «холодной» электроники торцевого жидкоаргонового адронного калориметра (ЖАК). Для исследования последствий радиационных повреждений электроники ЖАК на качество калориметрической информации было проведено специальное моделирование, в основу которого легли результаты тестовых облучений плат электроники в пучках протонов и нейтронов (в том числе и на облучательной установке реактора ИБР-2). Для этого были использованы полученные с помощью монте-карло генератора двух-струйные события, прошедшие полностью всю стандартную цепочку моделирования в детекторе АТЛАС. Эффект деградации электроники на результатах реконструкции адронных струй, измеренных в ЖАК, показан на рисунках 34 и 35 для интегральной светимости БАК, равной  $3000 \text{ фб}^{-1}$  и вдвое увеличенной величине радиационной нагрузки ( $\text{СФ}=2$ ).

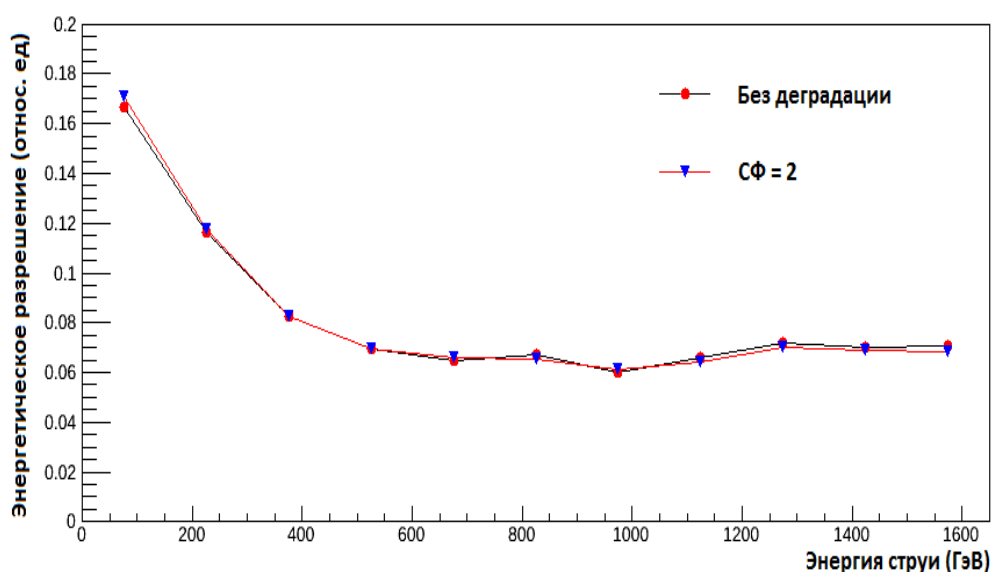


Рисунок 34 – Энергетическое разрешение ЖАК в зависимости от энергии струи.

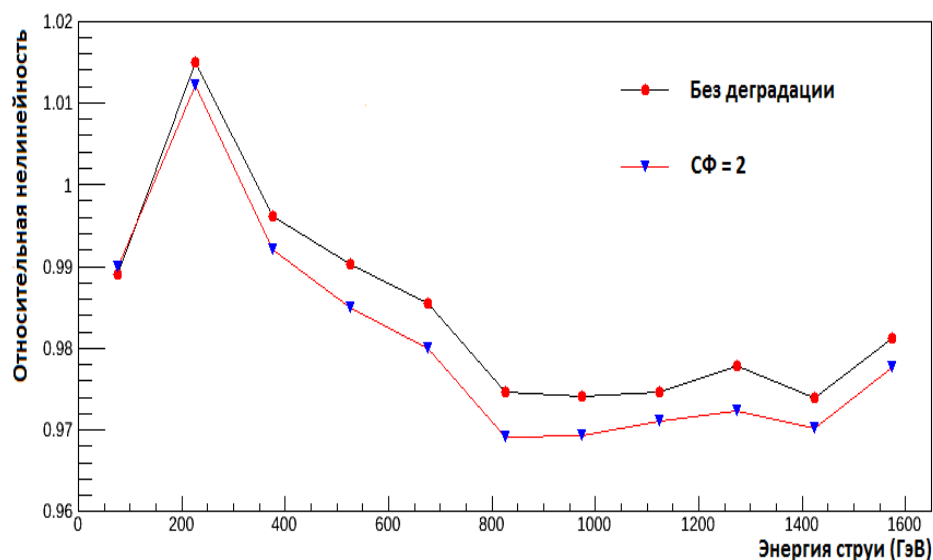


Рисунок 35 – Относительная нелинейность отклика ЖАК в зависимости от энергии струи.

Видно некоторое ухудшение разрешения по энергии восстановленной струи и относительной нелинейности как функции энергии адронной струи для идеального случая (без деградации) и ожидаемого в нашем анализе.

Степень деградации характеристик ЖАК за счет радиационных повреждений не превышает приемлемый уровень 0,5%. Этот очень важный результат означает, что замены существующей «холодной» электроники адронного торцевого калориметра на новую, более радиационно стойкую не требуется и нет необходимости в проведении чрезвычайно сложных, дорогостоящих и весьма рискованных работ, связанных со вскрытием торцевых криостатов установки АТЛАС.

Оценка возможных последствий деградации переднего калориметра детектора АТЛАС была сделана в предположении, что из-за формирования пространственного заряда в тонком жидкоаргоновом зазоре калориметра величина калориметрического сигнала будет сильно искажена, и поэтому исключена из реконструкции. Анализ был выполнен для процесса рождения тяжелого бозона Хиггса с массой 1 ТэВ и 2 ТэВ.

Рисунок 36 показывает, какую долю сигнальных событий мы сможем регистрировать при исключении из анализа данных от калориметрических ячеек переднего сегмента ЖАК, расположенных выше порогового значения по псевдобыстроте (т.е. ближе к оси пучка).



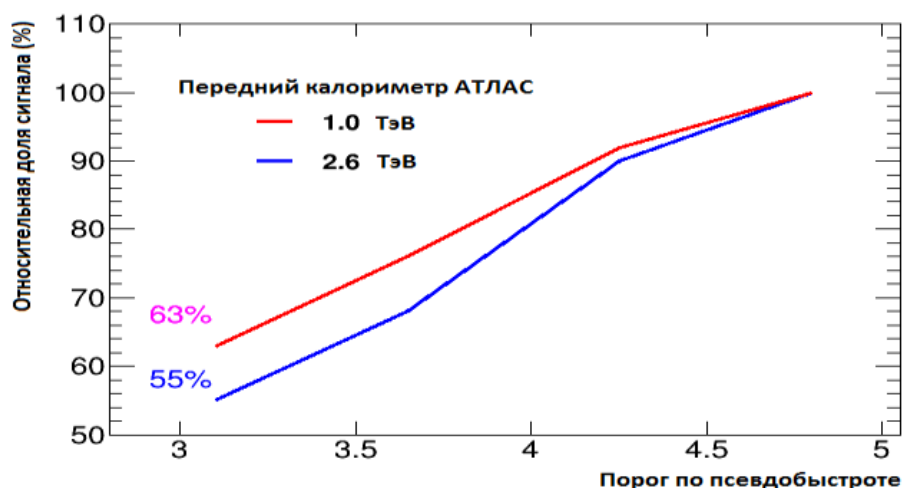


Рисунок 36 – Доля регистрируемых событий в зависимости от обрезания по пороговому значению псевдобастроты.

Даже при полном отключении сегмента половина сигнальных событий будет зарегистрирована за счет информации с других сегментов ЖАК.

Оптимистические результаты проведенных расчетов для торцевых адронных калориметров не снимают необходимости проведения работ по развитию облучательной установки на канале №3 реактора ИБР-2м (см. [3-4]). Параллельно с модернизацией облучательной установки в ходе работ по соглашению также проводились и сеансы облучения.

Было обеспечена возможность получения флюенсов быстрых нейтронов от  $10^{15}$  н  $\text{см}^{-2}$  и до  $10^{18}$  н  $\text{см}^{-2}$  за 11 дней работы реактора. Это было определено методом измерения наведенной активности фольг из никеля, размещенных на разных расстояниях от активной зоны. Относительное снижение дозы с расстоянием показано на рисунке 37.

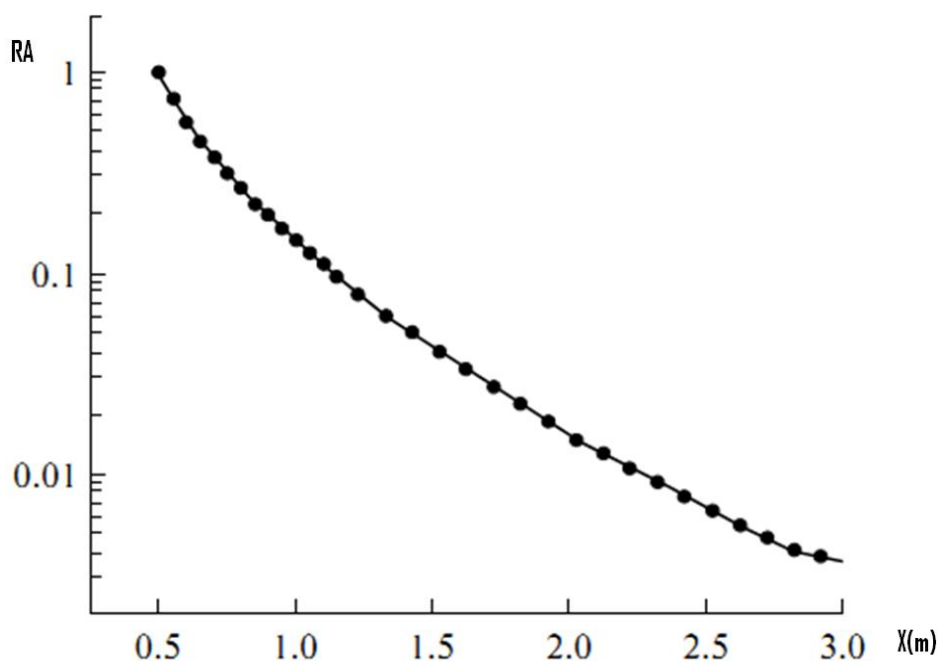


Рисунок 37 - Относительное снижение дозы в зависимости от расстояния от зоны.

В период 2015-2016 г.г. на облучательной установке канале № 3 реактора ИБР-2м был проведен ряд сеансов по программе исследования радиационной стойкости материалов, детекторов и электроники.

В частности, было проведено облучение монокристаллических и поликристаллических искусственных алмазов [5], планируемых к использованию в качестве активных сенсоров в минакалориметре – одном из вариантов модернизации переднего калориметра. На рисунке 38 представлена совокупность мировых данных по испытаниям поликристаллических алмазных сенсоров в пучках протонов, нейтронов и альфа-частиц.

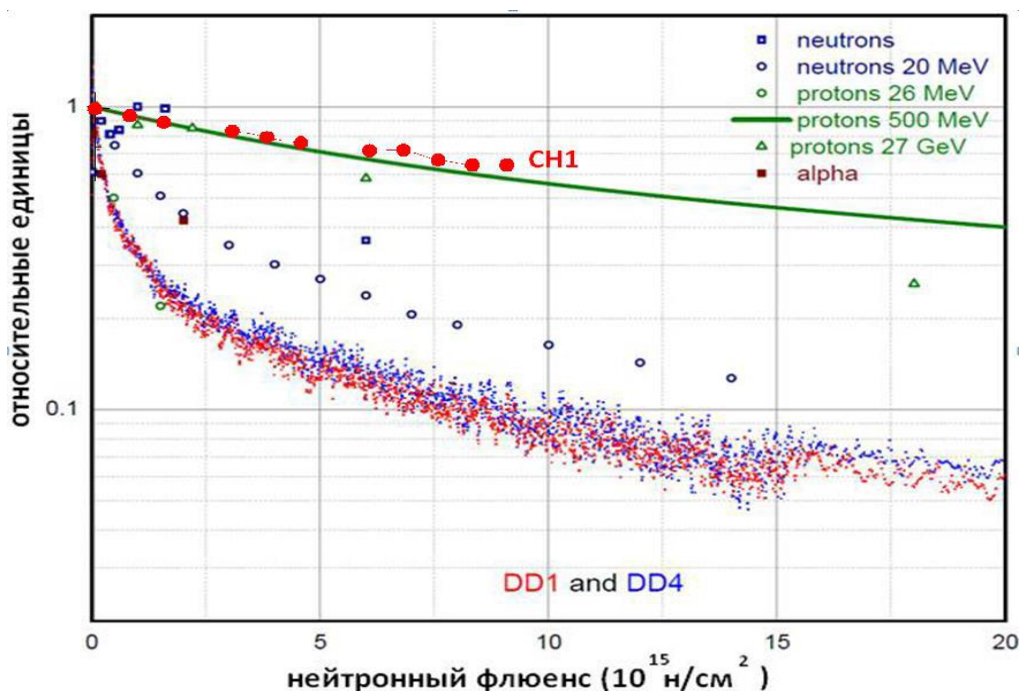


Рисунок 38 - Совокупность мировых данных по испытаниям поликристаллических алмазных сенсоров в пучках протонов, нейтронов и альфа-частиц

Красные кружки на рисунке показывают полученные результаты для одного из каналов (CH1) монокристаллического сенсора. Видно, что монокристаллы обладают значительно более высокой радиационной стойкостью. Предварительные результаты испытаний новых сенсоров выглядят чрезвычайно перспективными с точки зрения их применения в экспериментах по физике высоких энергий.

Цикл сеансов был проведен с целью изучения характеристик многослойных печатных плат для размещения регистрирующих структур дополнительного торцевого калориметра с газообразным ксеноном при высоком (~10 атм) давлении в качестве активной среды. Эти платы обеспечивают крепление элементов калориметра, подведение рабочего напряжения и считывание сигналов. Облучались материалы G10 и FR4 - как

широко распространенные в электронной промышленности, а также Arlon 85N, полиимид ( пленка Kapton производства фирмы DuPont) и Rogers 4450B, считающиеся перспективными для использования при высокой радиационной нагрузке. До и после облучения измерялись модули упругости материалов и адгезии слоя медной фольги к слою диэлектрика. Проведенное облучение показало, что материалы G10, FR4 и полиимид нельзя применять в зоне переднего калориметра установки АТЛАС. Для предотвращения деформаций печатных плат при высоких радиационных нагрузках не следует при проектировании закладывать в топологию сплошные слои меди большой площади. Для примера на рисунке 39 ниже показан внешний вид облученных плат из полиимида (слева) и FR4 (справа).



Рисунок 39 – Внешний вид облучённых пластин.

Образцы из Arlon 85N и Rogers 4450B, показавшие стабильность своих механических характеристик, могут быть рекомендованы к дальнейшему использованию.

Как и любая новая аппаратура, включая детекторы и электронику, новая электроника сцинтилляционного калориметра прошла радиационные тесты с целью проверки работоспособности и отсутствия сбоев при работе в сложных радиационных условиях. На данном этапе тестировались основная (Main Board) и дочерняя (Daughter Board) платы, располагающиеся непосредственно в модулях (on-detector).

Основная плата (см. рисунок 40.) обеспечивает связь между непосредственно электроникой сбора данных на детекторе с дочерней платой.



Рисунок 40 – Общий вид основной платы.

Ее главные функции:

- обеспечение низковольтного питания для элементов электроники и дочерней платы;
- оцифровка быстрых и медленных сигналов и параллельная передача их на дочернюю плату;
- контроль уровня заряда для системы калибровки.

Основная плата облучалась гамма-квантами, нейтронами и электронами. Суммарная мощность эквивалентной дозы от трех источников составила 67.3 Зв/час. Поглощенная доза за несколько дней облучения составила 8.5 кРад. По результатам испытаний проверялись компоненты платы, их стабильность в исполнении заданных функций.

Дочерняя плата (см. рисунок 41) обеспечивает связь основной платы электроники с электроникой сбора данных.

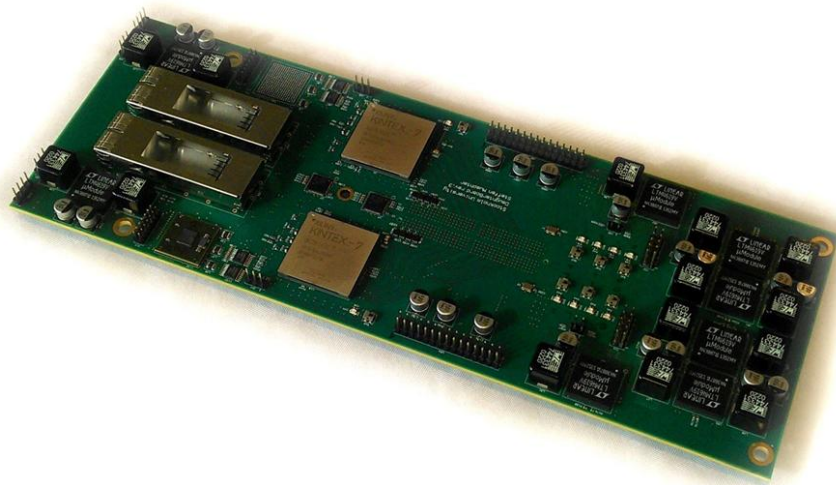


Рисунок 41 - Внешний вид дочерней платы.

Радиационная стойкость дочерней платы оценивалась по частоте одиночных сбоев (SEU, Single Event Upset), вызванных облучением платы. Плата была облучена протонным пучком при энергии 216 МэВ с интенсивностью  $8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в течение приблизительно одного часа, что соответствует её работе в течение 100 дней в эксперименте АТЛАС при светимости БАК  $10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Данные, полученные при тестировании платы, были использованы для оценки ожидаемого уровня одиночных сбоев (SEU).

После облучения были проверены все компоненты основной платы. Плата прошла все тесты на проверку ее функциональности. В итоге установлено, что все компоненты основной платы удовлетворяют требованиям по радиационной стойкости и могут быть использованы в модернизированном детекторе.

Дочерняя плата проверялась на вероятность сбоев, вызванных облучением. Частоту наблюдаемых сбоев мы оценили в 4,5 одно-битных ошибок и 0,2 двух-битных

восстанавливаемых ошибок в день, что удовлетворяет техническим требованиям.

Неустраняемые ошибки будут реже, но, тем не менее, могут случаться 1-2 раза в месяц. Для устранения таких ошибок в большинстве случаев требуется реконфигурация системы, занимающая не более одной минуты. Протокол испытаний электроники жидкоаргонового и сцинтилляционного калориметров приведен в Приложении 5.

8. Изготовление и испытания партии экспериментальных образцов оптических кабелей для ЖАК с распечаткой рефлектограмм по каждому волокну

В рамках пятого этапа на участке технологического контроля качества сборки и выходного контроля организованном на четвертом этапе работ по ПНИЭР проведено детальное тестирование 200 кабелей с помощью оптического рефлектометра МТР 6000. Измерения проводились в обеспыленном помещении, обеспечивающем класс чистоты 10000, оборудованном персональным компьютером с установленным специальным программным обеспечением (программа «Fiberizer Desktop») с использованием комплекта необходимых оптических шнуров (мастер-шнуры, компенсационные катушки и т.д.). Полученные результаты с рефлектограммами по каждому волокну были внесены в электронную базу данных.

В случае необходимости (при обнаружении дефектов), проводился визуальный контроль оптических поверхностей разъемов с помощью универсального микроскопа «Микромед 2 вар. 3-20» и видеоокуляра TopCam 9.0 Mr. На рисунке 42 в качестве примера приведено увеличенное изображение контактной плоскости оптического разъема.

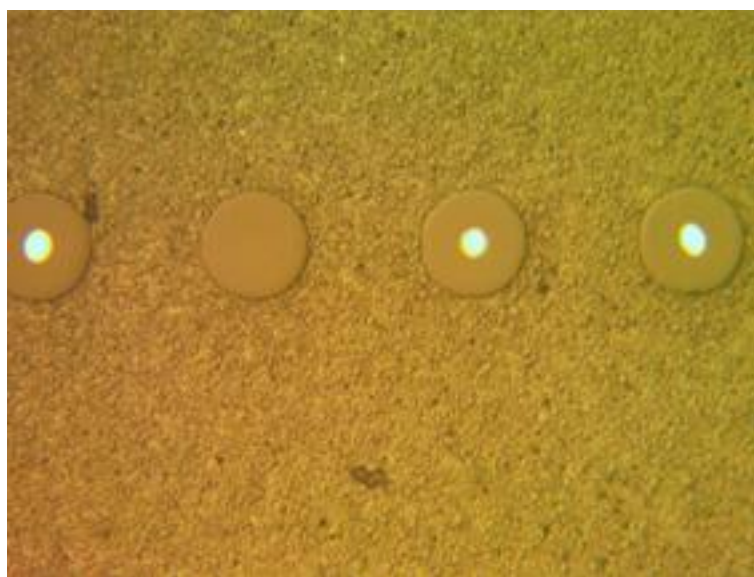


Рисунок 42 – Вид контактной плоскости оптического разъема типа МТР/МРО.

На фотографии представлен вид участка плоскости оптического разъема типа МРО/МТР. Отчетливо видны торцы оптических волокон. Для контроля прохождения оптического сигнала по волокну используется специальная подсветка противоположных концов волокон. Яркие окружности в середине каждого торца — это центральные жилы оптических волокон диаметром 50 микрон. Отсутствие яркого пятна на втором слева торце оптического волокна свидетельствует о наличии дефекта волокна или оптического

контакта в соединениях с разъемами. Также хорошо видны следы загрязнений на плоскости разъема (слева у торца оптического волокна и внизу в середине), которые необходимо удалить.

Все измерения по контролю качества собранных патч-кордов производились в соответствии с «Инструкцией по тестированию оптических патч-кордов с помощью OTDR MTP 6000 и программы «Fiberizer Desktop», представленной в отчете 4-го этапа.

Были получены комплектующие для сборки оптического кабеля (заготовки оптического кабеля и оптических разъемов) из ЦЕРНа, а именно:

- разъемы типа LC;
- Многомодовое оптическое волокно Corning ClearCurve 50/125 с буфером 10 различных цветов.

Из полученных комплектующих была собрана партия специализированных оптических патч-кордов в количестве 200 штук. Каждый из кабелей партии был углубленно протестирован со снятием и распечаткой рефлектограммы по каждому оптическому волокну. Тестирование проводилось на основе программы и методики испытаний оптических кабелей ЖАК, утвержденной 17 ноября 2016 г.

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

На рисунке 43 в качестве примера представлена исходная рефлектограмма, полученная при тестировании одного из волокон проверяемого патч-корда с помощью оптического рефлектометра MTP 6000 и программы «Fiberizer Desktop». Синей стрелкой на рисунке указано место на рефлектограмме, соответствующее тестируемому участку оптической линии.

Протокол испытаний партии специализированных оптических кабелей для модернизированной электроники жидкоаргонового калориметра детектора АТЛАС приведён в приложении 6.

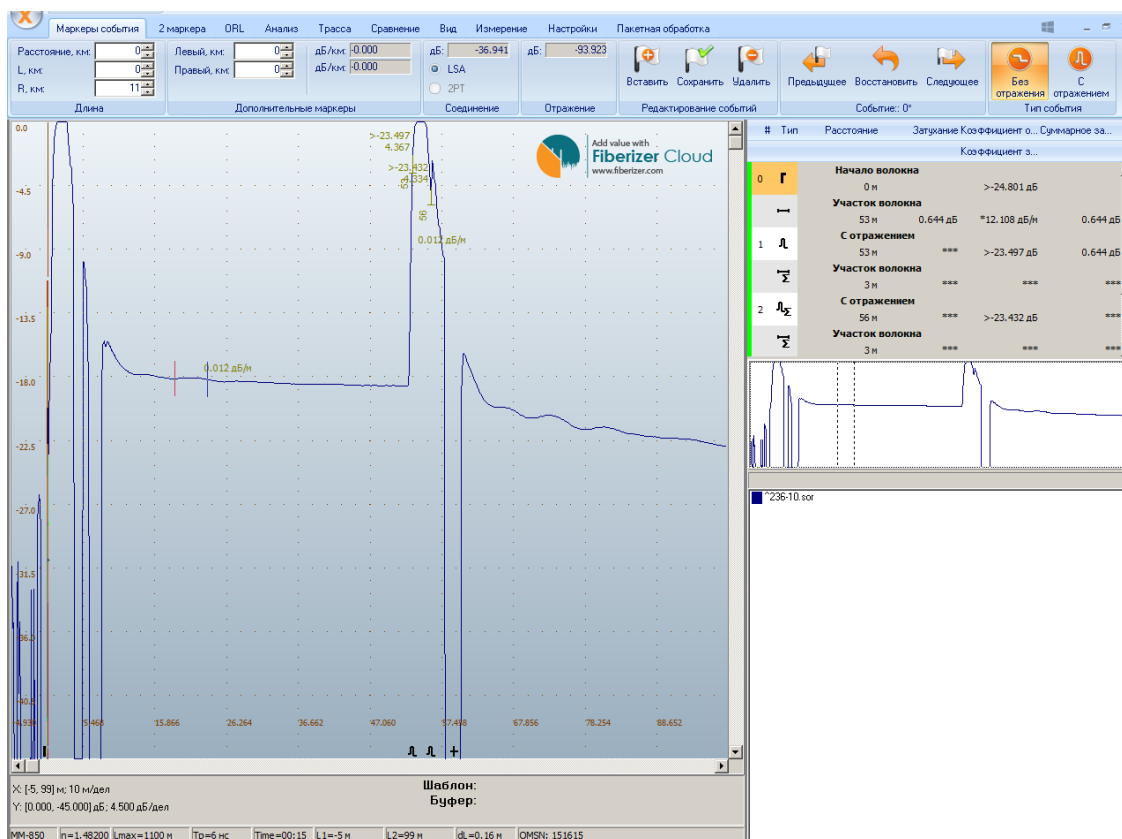


Рисунок 43 – Вид рефлектограммы на экране компьютера.

На рисунке 44 представлена та же рефлектограмма, что и на рисунке 43, но в измененном масштабе (растянута по оси X) для детального изучения исследуемого волокна тестируемого патч-корда.

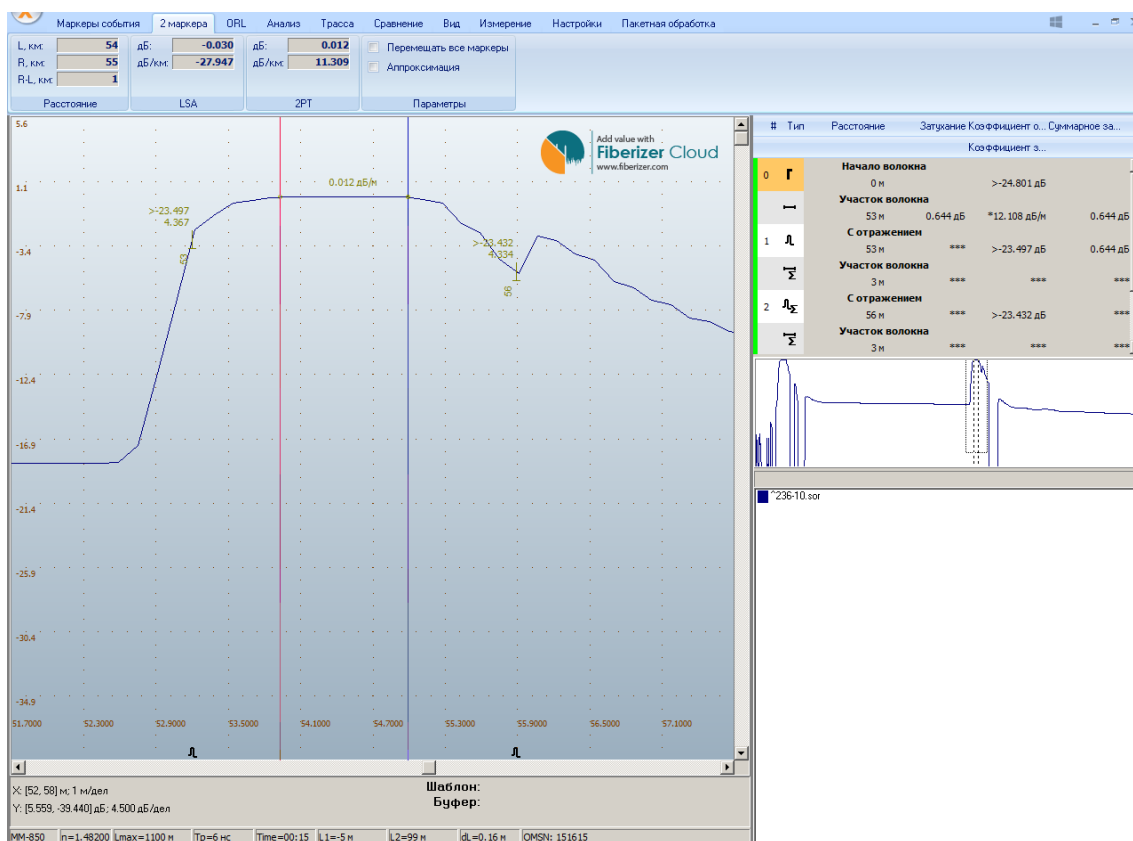


Рисунок 44 – Растянутое изображение рефлектограммы тестируемого патч-корда.



Красный и синий маркеры (вертикальные линии на участке рефлектограммы) соответствуют началу и концу исследуемого объекта. Из анализа результатов измерений видно, что ослабление сигнала на исследуемом участке составляет 0,012 дБ. Это отвечает требованиям технического задания и позволяет считать данное волокно патч-корда успешно прошедшим контроль качества.

9. Испытания новой электроники считывания сцинтилляционного адронного калориметра в составе установки

Новая электроника, предлагаемая для модернизации АТЛАС калориметра в 2025-2026гг, делится на две части: одна расположена непосредственно в модулях (on-detector), другая вынесена за пределы детектора (off-detector). Связь между ними осуществляется по волоконно-оптической линии. В отличие от существующей электроники, в предлагаемом варианте полностью исключается передача аналоговых сигналов от модулей, вся информация передается в цифровом виде.

Он-лайн электроника расположена в длинных выдвижных модулях. Каждый модуль механически разделен на 4 минимодуля. Минимодули содержат в себе 12 ФЭУ, 12 карт входной электроники (Front-End Board (FEB)), одну основную карту (Main Board (MB)) и одну дочернюю карту (Daughterboard (DB)). По оптоволоконной линии электроника детектора связана с платами препроцессора (TilePPr).

На сегодня предложено три варианта карт входной электроники (FEB): два варианта QIE (Charge Integrator and Encoder) и FATALIC основаны на использовании ASIC-микросхем, специально спроектированных для первичной обработки сигналов с ФЭУ. Третий является усовершенствованной версией существующего FEB 3-в-1 и основан на коммерчески доступных комплектующих. Каждый из вариантов FEB предусматривает калибровку электроники, усиления ФЭУ и световыхода сцинтиллятора.

Связь основной карты MB с платой препроцессора осуществляет дочерняя карта DB. Скорость передачи данных от детектора 9,6 Gbps, а от препроцессора к детектору 4,8 Gbps. Программное обеспечение для сбора данных и управления картами написано на языках C++ и Python.

В сентябре-октябре 2016 г. был проведен тестовый сеанс на ускорителе SPS CERN (канал T4-N8) для испытаний новой электроники сцинтилляционного калориметра. Испытания проводились по «Программе и методике испытаний новой электроники считывания сцинтилляционного адронного калориметра в составе установки». В установку входили: три черенковских счетчика, триггер пучка на сцинтилляционных пластинах, две проволочных камеры контроля положения пучка, три модуля калориметра и мюонный годоскоп.

Основной задачей сеанса были испытания новой электроники считывания сцинтилляционного адронного калориметра в составе установки. Требования, предъявляемые к новой электронике:

- совместимость со старым вариантом электроники;

- быстродействие не менее 40 МГц;
- возможность восстановления энергии и идентификации (разделения) частиц.

В данном сеансе были проверены все три типа карт входной электроники (FEB). Новая электроника работала совместно со старой электроникой и показала полную совместимость. Исследования быстродействия новой электроники подтвердило ее возможность регистрировать события с частотой более 40 МГц. В течение сеанса были проведены облучения мюонами (180 ГэВ), электронами (20 ГэВ) и электронами/пионами при 100 ГэВ. Сравнение сигналов с калориметра для старой и новой электроники при облучении пучком электронов с энергией 20 ГэВ подтверждает возможность восстановления энергии частиц на прежнем уровне.

Рисунок 45 иллюстрирует возможность идентификация частиц при облучении калориметра электрон/пионном пучком при 100 ГэВ.

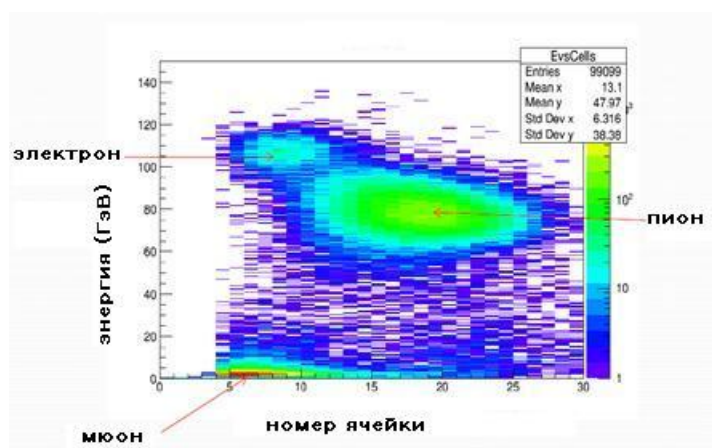


Рисунок 45 - Идентификация (разделение) частиц на электрон/пионном пучке с энергией 100 ГэВ.

Видно, что пионы, электроны и мюоны хорошо разделяются по энерговыведению в калориметре.

Таким образом, созданный прототип новой электроники прошел испытания на пучке ускорителя в составе установки АТЛАС. В результате исследований показано полное соответствие разработанного прототипа техническим требованиям: достигнута совместимость новой и старой электроники; достигнуто требуемое быстродействие электроники; показана возможность восстановления энергии на прежнем уровне и возможность идентификации частиц. Новая электроника готова к дополнительной модернизации и тиражированию. Итоги испытаний включены в «Протокол испытаний новой электроники сцинтилляционного калориметра в составе установки» (см. приложение №7).

10. Разработка и реализация нового функционала программ для пакетного обновления данных с помощью интерфейса управления системы АГИС.

Компьютерная модель эксперимента АТЛАС активно использует современную технологию географически распределенных вычислений инфраструктуры ГРИД. Ключевым информационным элементом в распределенной системе обработки эксперимента АТЛАС является информационная ГРИД система AGIS (ATLAS Grid Information System, <http://atlas-agis.cern.ch>), описывающая вычислительные ресурсы эксперимента и компьютерную модель в целом. Возросший поток данных с детектора требует совершенствования матобеспечения и увеличения производительности системы распределенной обработки и передачи данных эксперимента АТЛАС. В свою очередь, развитие и расширение распределенной системы обработки затрагивают обновление информационного обеспечения ГРИД сети - системы AGIS.

Информационная система AGIS представляет собой совокупность технического и программного обеспечения, осуществляющего централизованное хранение описания топологии сети, вычислительных ресурсов, их всевозможных конфигурационных параметров, статических и динамических данных, необходимых для настройки, управления и функционирования систем и сервисов распределенной ГРИД-сети эксперимента АТЛАС.

Благодаря внутренней реализации информационной модели, AGIS, скрывая разнородность компьютерной инфраструктуры эксперимента, предоставляет единое описание топологии вычислительных ресурсов АТЛАС сайтов. Для осуществления контроля и управления данными система AGIS предоставляет пользовательские клиентские пакеты управления - пользовательский WebUI интерфейс (Web User Interface) и CLI интерфейс (Command Line Interface), а также интерфейс прикладного программирования API (Application Programming Interface). Данный этап работ был непосредственно посвящен развитию пользовательского WebUI интерфейса управления и обновлению программного API интерфейса для расширения возможностей системы и предоставления функционала пакетного обновления данных.

Интерфейс WebUI представляет собой совокупность средств, при помощи которых пользователь взаимодействует с информационной системой через Web браузер. Пользовательский WebUI интерфейс управления включает в себя набор интерактивных HTML страниц и форм для регистрации новых объектов в системе (например, создание нового ГРИД-сайта или службы, вычислительного ресурса, или обновление информации об элементах хранения данных), а также позволяет отображать содержимое базы данных

информационной системы в структурном, удобном для пользователей, виде. Например, администраторы ГРИД-сайтов эксперимента АТЛАС непосредственно используют WebUI для обновления информации о ресурсах сайта (ATLAS Site), настройки параметров объектов Panda Queue запуска заданий системы PandDA (The PanDA Production ANd Distributed Analysis system), создания и редактирования высокоуровневых объектов DDMEndpoint системы хранения данных DDM (Distributed Data Management System). В рамках данного этапа работ был разработан и реализован набор форм для пакетного обновления (bulk update) информации и параметров объектов PandaQueue и DDMEndpoint.

С функциональной точки зрения, данное обновление позволяет администраторам системы изменять параметры вышеперечисленных объектов в рамках единой операции. Такое усовершенствование существенно облегчает работу пользователей. Так например, администратор сайта, используя реализованный функционал, может предварительно выбрать список объектов DDM и изменить для него различные атрибуты, например FTS (File Transfer Server) или LFC (Local File Catalog) элементы. Возможность изменения одновременно нескольких объектов в рамках единой операции (пакетное обновление данных) несомненно облегчает работу с системой в целом.

В рамках данного этапа работ было также произведено обновление API интерфейса, и реализован пакетный функционал (с использованием JSON структур данных) для модификации свойств объектов PandaQueue, DDMEndpoint, а также моделей подсистем, позволяющих временно исключить ресурс из производства в связи с поломкой или плановым простоем (DDM, PanDA blacklisting system)

Разработанные модули и инструментарий по пакетному обновлению данных были установлены на основные сервера системы AGIS и на сегодняшний день успешно используются в работе.

11. Разработка системы мониторинга прохождения задач в сети распределённых вычислений ГРИД.

Важной задачей системы обработки данных в эксперименте АТЛАС, как и в любом современном научном эксперименте, является мониторинг задач вычислений.

Система AGIS непосредственно не проектировалась для задач мониторинга и фактически не осуществляет хранение самих данных мониторинга. Тем не менее, в рамках глобальной кампании консолидации описания компьютерных ресурсов в системе AGIS, а также актуальной задачи миграции программного обеспечения PanDA Pilot, было принято решение о расширении области применимости системы AGIS. Таким образом, пользовательский WebUI интерфейс был расширен функционалом мониторинга прохождения задач, необходимого для успешного завершения кампании миграции модулей sitemovers на новую версию в системе PanDA Pilot.

В рамках данного этапа работ в системе AGIS были разработаны специальные страницы отображения данных мониторинга в графическом виде для каждого объекта PandaQueue. Страницы мониторинга задач включают в себя интегрированные графики выполнения задач в сети ГРИД по времени, и позволяют отслеживать работоспособность новой реализации модулей sitemovers по сравнению с предыдущей версией. Система мониторинга позволяет отображать отдельно графики для тестовых заданий (hammer cloud jobs) и непосредственно пользовательских задач анализа данных в эксперименте (production and analysis jobs). Также, для удобства анализа ситуации страницы мониторинга содержат ссылки на другие ресурсы контроля для данного сайта, такие как монитор выполнения задач в системе PandDA, исходные графические представления в системе Kibana. Для реализации страниц мониторинга активно использовались инструменты JQuery и технология AJAX для интеграции рисунков и динамической подгрузки данных.

На рисунке 46 отображен пример страницы мониторинга в системе AGIS для сайта pragueicg2.

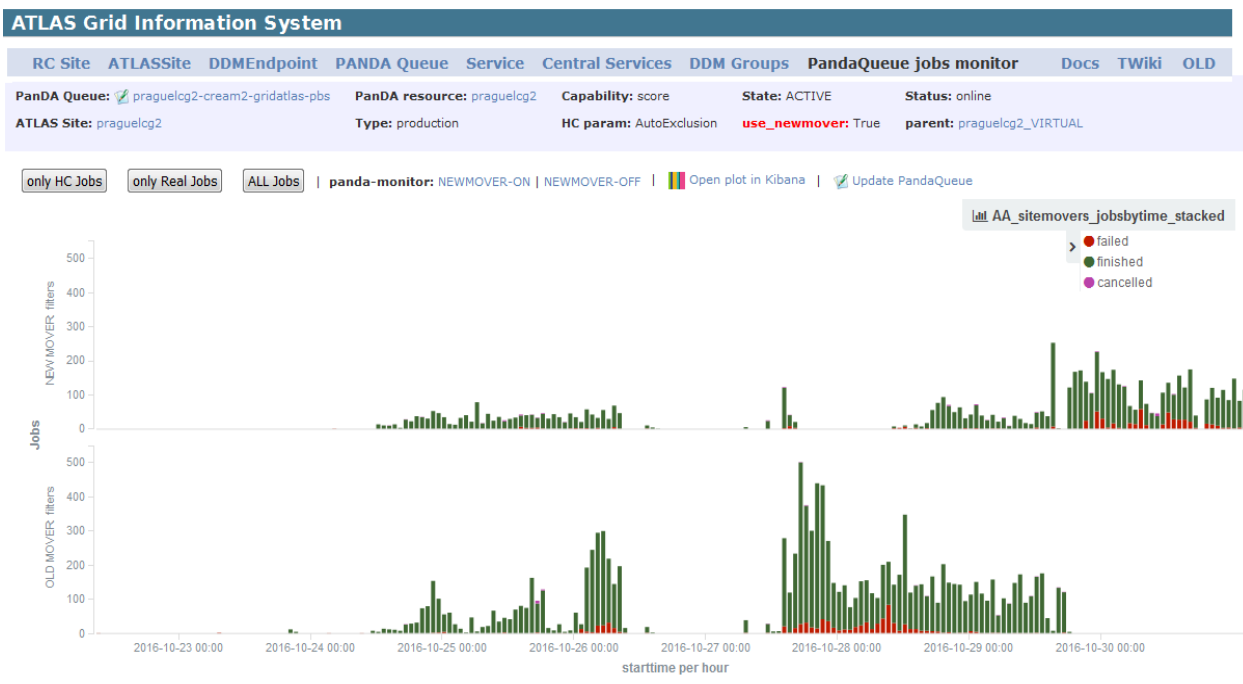


Рисунок 46 - Пример страницы мониторинга прохождения задач в системе AGIS для сайта prague1cg2 в момент миграции сайта на новую версию PanDA Pilot с использованием нового модуля site movers. Верхний график отражает мониторинг задач с обновленной программой Pilot, в то время как нижний график описывает статистику для старой версии.

На рисунке отчетливо виден момент переключения сайта (миграция) на использование новой реализации модулей sitemovers в системе Pilot. Следует отметить, что разработкой новой версии модулей sitemovers, а также централизованным переводом ГРИД сайтов эксперимента АТЛАС на новую архитектуру модулей sitemovers в системе PanDA Pilot также занимались и осуществили специалисты ИЯФ СО РАН.

В рамках данного этапа работ, в системе Kibana были созданы шаблоны для отображения мониторирующих графиков. На рисунке 47 изображен пример отображения матрицы итоговых состояний (успешное завершение или расшифровка кода ошибки) операций передачи данных (модулями sitemovers) задач сети ГРИД в зависимости от используемого модуля sitemover за определенный интервал времени.

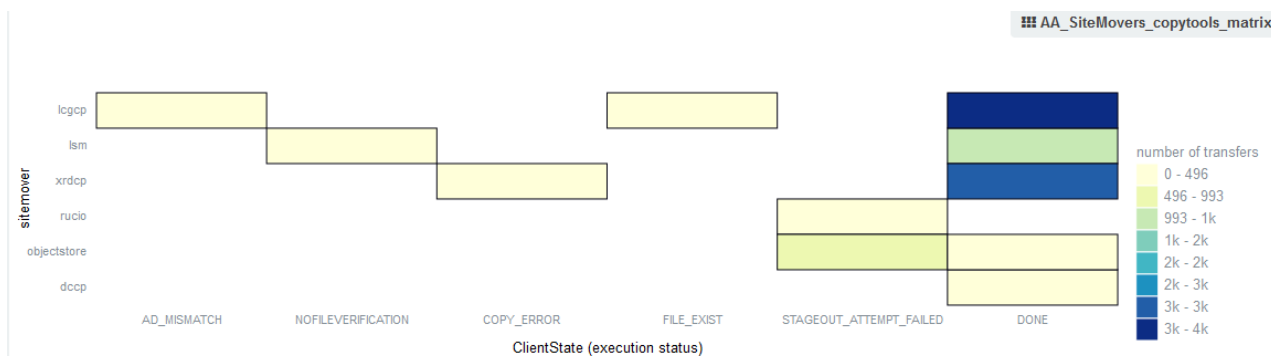


Рисунок 47 - Пример страницы мониторинга (матрица используемых модулей sitemovers загрузки и передачи данных). Отображает статистику операций передач данных в зависимости от итогового статуса на основе мониторируемых данных записанных в системе Kibana.

Данный вид мониторинга позволяет идентифицировать ошибки конфигурации в системе AGIS или неработоспособность определенного протокола (sitemover) при передаче данных.

Разработанные страницы мониторинга были успешно внедрены в эксплуатацию и в частности активно использовались во время миграции новых модулей передачи данных (sitemovers) в системе PanDA Pilot.



12. Работы по модернизации специального программного обеспечения.

12.1. Оценка эффективности идентификации электронов в ТДПИ при загрузках, соответствующих светимости БАК после первой фазы его модернизации

В ходе подготовки к новому сеансу работы БАК была произведена оптимизация алгоритмов идентификации электронов в условиях повышенной загрузки Трекового Детектора Переходного Излучения (ТДПИ).

Во втором сеансе работы БАК детектор заполняется как ксеноновой ( $Xe/CO_2/O_2$ ), так и аргоновой ( $Ar/CO_2/O_2$ ) газовыми смесями. Это является необходимой мерой по причине утечек газа из детектора и высокой стоимости ксенона. Схемы наполнения ТДПИ газом для случаев базовой геометрии 2015 и 2016 годов приведены на рисунках 48 и 49.

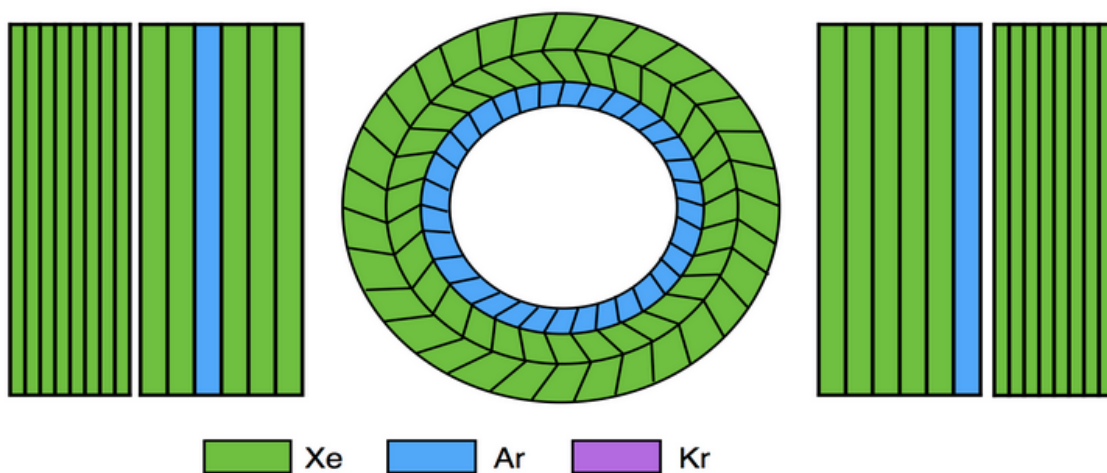


Рисунок 48 - Схема наполнения ТДПИ газовыми смесями для базовой геометрии в сеансе 2015 года. Зелёным цветом показаны модули, наполненные ксеноновой смесью, синим - модули, наполненные аргоновой смесью.

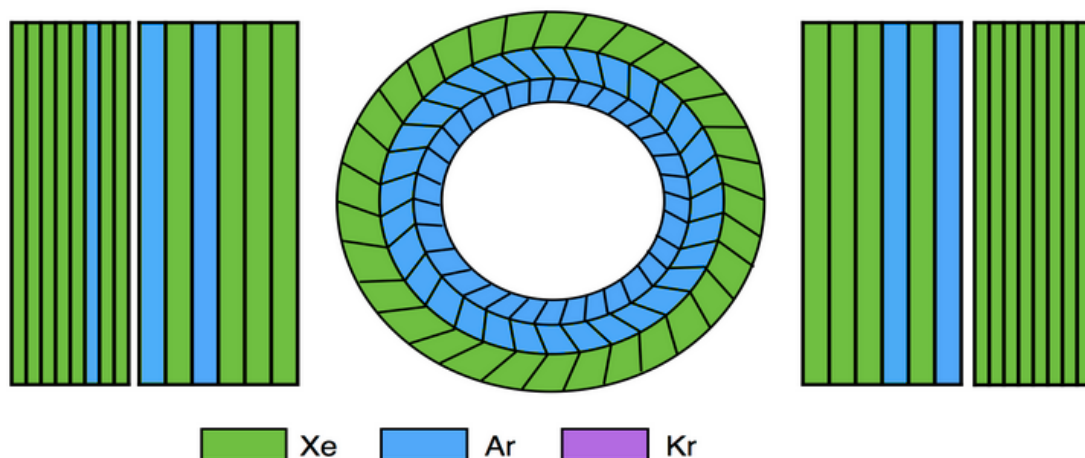


Рисунок 49 - Схема наполнения ТДПИ газовыми смесями базового сценария в сеансе 2016 года. Зелёным цветом показаны модули, наполненные ксеноновой смесью, синим - модули, наполненные аргоновой смесью.

В данном разделе описана процедура вычисления функции правдоподобия с использованием всех методов указанных в прошлых отчётных периодах.

Чтобы получить функцию правдоподобия необходимо определить вероятность образования сигнала высокого порога ( $p_{HT}$ ), которая в первом приближении зависит в основном от  $\gamma$ -фактора частицы.  $\gamma$ -фактор используется для того, чтобы разделить минимально ионизирующие частицы (МИЧ), имеющих низкие значения  $\gamma$ , от электронов, имеющих высокие значения  $\gamma$ . После параметризации вероятности образования сигнала высокого уровня можно составить функцию правдоподобия для каждого трека, предполагая, что трек получен от электрона или от МИЧ, такой как мюон.

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

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

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

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

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

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

Данное выражение включает в себя все эффекты, не зависящие от загрузки ТДПИ, в членах  $p_{HT}^e$  для нулевой загрузки. Для учёта эффекта загрузки детектора используется разница вероятностей для МИП частиц для выбранной и нулевой загрузки  $p_{HT}^\mu(Occ) - p_{HT}^\mu(0)$ , которая входит в выражение как пропорциональный фактор члена, описывающего вероятность не получить сигнал высокого порога от электрона при нулевой загрузке  $(1 - p_{HT}^e(0))$ .

Подобная модель позволяет предсказать поведение вероятности получения сигнала

высокого порога от электрона как функции загрузки детектора с минимальным числом степеней свободы. Зависимость от загрузки растёт достаточно медленно и её легко описать полиномом второй степени.

Как уже говорилось вероятность получения сигнала высокого порога в первом приближении зависит в основном от  $\gamma$ -фактора, который достигает нескольких порядков, если брать в расчёт диапазон энергий МИЧ и электронов, получаемых на БАК. Зависимость от  $\gamma$ -фактора имеет характер логистической функции, поэтому для описания зависимости выбрана сигмоида. Так же рост вероятности сигнала высокого порога в области переходного излучения достаточно медленный, поэтому в качестве переменной величины используется десятичный логарифм  $\gamma$ -фактора ( $\log_{10}\gamma$ ). Данная функция хорошо ложится на результаты измерений за исключением области высоких  $\gamma$ , где зависимость носит линейный характер. Для учёта этой особенности функция линейно экстраполируется с учётом сохранения непрерывной дифференцируемости.

$$p_{HT}(\gamma) = \begin{cases} c_1 + \frac{c_2}{1 + \exp(-c_3(\log_{10} \gamma - c_4))} & \text{если } \gamma < \gamma_0 = c_0 \\ p_{HT}(\gamma_0) + p'_{HT}(\gamma_0)(\log_{10} \gamma_0 - \log_{10} \gamma) & \text{если } \gamma \geq \gamma_0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Используя уравнение (3.1) для описания кривой зависимости вероятности НТ от  $\gamma$  фактора для нулевого уровня загрузки и используя параметризацию зависимости  $p_{HT}$  от загрузки для мюонов, можно получить аналитическую функцию для двумерной кривой:

$$OF(Occ) = c_1 + c_5 \cdot Occ + c_6 \cdot Occ^2 \quad (3.2)$$

$$p_{HT}(Occ, \gamma) = p_{HT}(\gamma) + (1 - p_{HT}(\gamma))(OF(Occ) - c_1) \quad (3.3)$$

Так же можно улучшить качество разделения в ТДПИ, учитывая дополнительную информацию. За счёт параметризации вероятности образования сигнала высокого порога через номер блока ТДПИ (SL) и координату траектории частицы в трубке (ZR) можно учесть зависимость роста переходного излучения по ходу продвижения частицы через материал детектора. Дополнительно можно принять в расчёт расстояние от траектории частицы до анодной проволоки в трубке (TW).

Со всеми этими дополнительными параметрами, задача поиска аналитической функции вероятности значительно усложняется. Однако, поскольку данные параметры отвечают за эффекты второго порядка приближения, то задачу можно упростить, предположив, что эти параметры можно факторизовать и учитывать как независимые величины. Таким образом, аналитическую функцию вероятности образования сигнала высокого порога можно описать так:

$$p_{HT}(\gamma, Occ, SL, ZR, TW) = p_{HT}(\gamma, Occ) \cdot CF(SL) \cdot CF(ZR) \cdot CF(TW),$$

где  $CF(X)$  – фактор коррекции соответствующего параметра, который вычисляется как значения вероятности образования сигнала высокого порога при определенном значении параметра по отношению к средней величине вероятности для данного параметра.

На рисунках 50 и 51 приведены примеры результатов аппроксимации зависимости вероятности образования сигнала высокого порога от  $\gamma$ -фактора для аргоновой смеси в центральной части и торце Б в случае двух уровней загрузки.

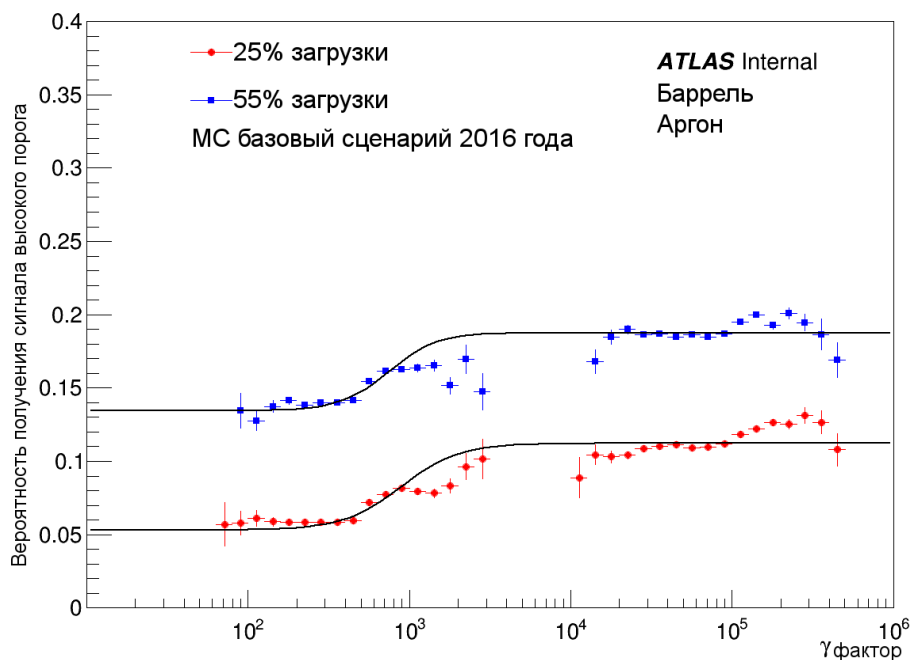


Рисунок 50 - Зависимость  $r_{HT}$  от  $\gamma$ -фактора частиц для аргона в центральной части при среднем уровне загрузки в 25% (красные точки) и уровне загрузки в 55% (синие точки).

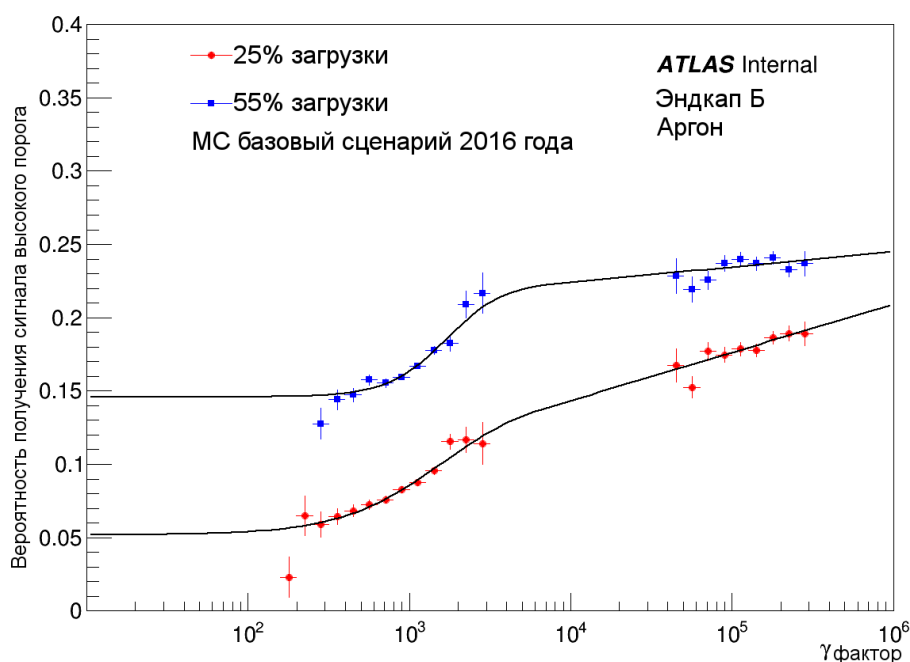


Рисунок 51 - Зависимость  $r_{HT}$  от  $\gamma$ -фактора частиц для аргона в торце Б при среднем уровне загрузки в 25% (красные точки) и уровне загрузки в 55% (синие точки).

На рисунках 52 и 53 показано двумерное распределение вероятности  $p_{HT}$  как функции  $\gamma$ -фактора и загрузки детектора для аргона в центральной части, и результат аппроксимации с использованием выражений (3.1), (3.2) и (3.3).

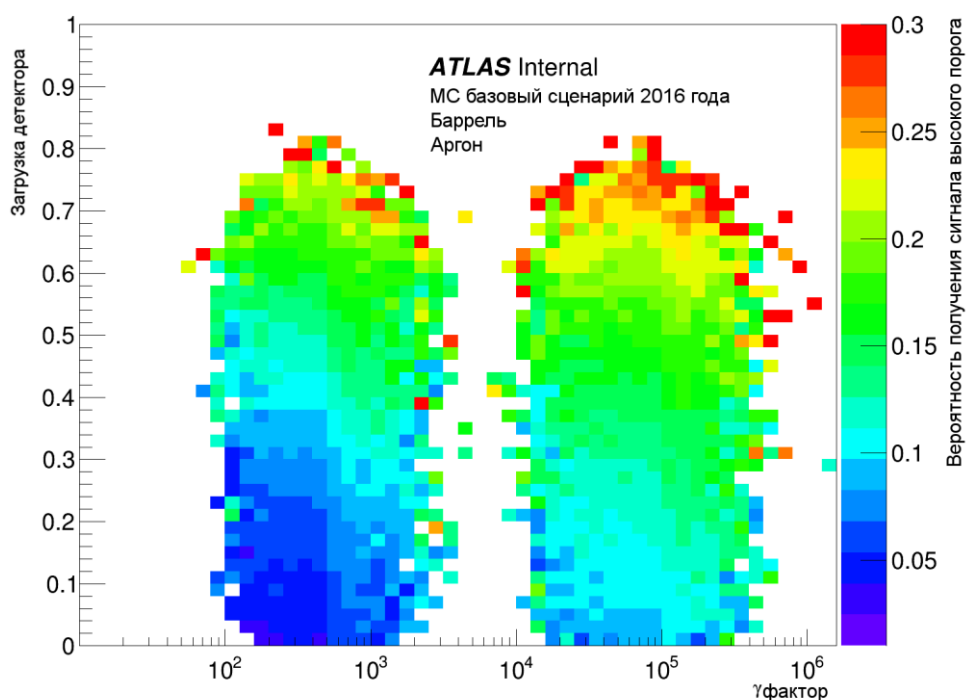


Рисунок 52 - Двумерное распределение  $p_{HT}$  в зависимости от  $\gamma$ -фактора и загрузки детектора в центральной части детектора для аргоновых трубок в случае базового сценария 2016 года.

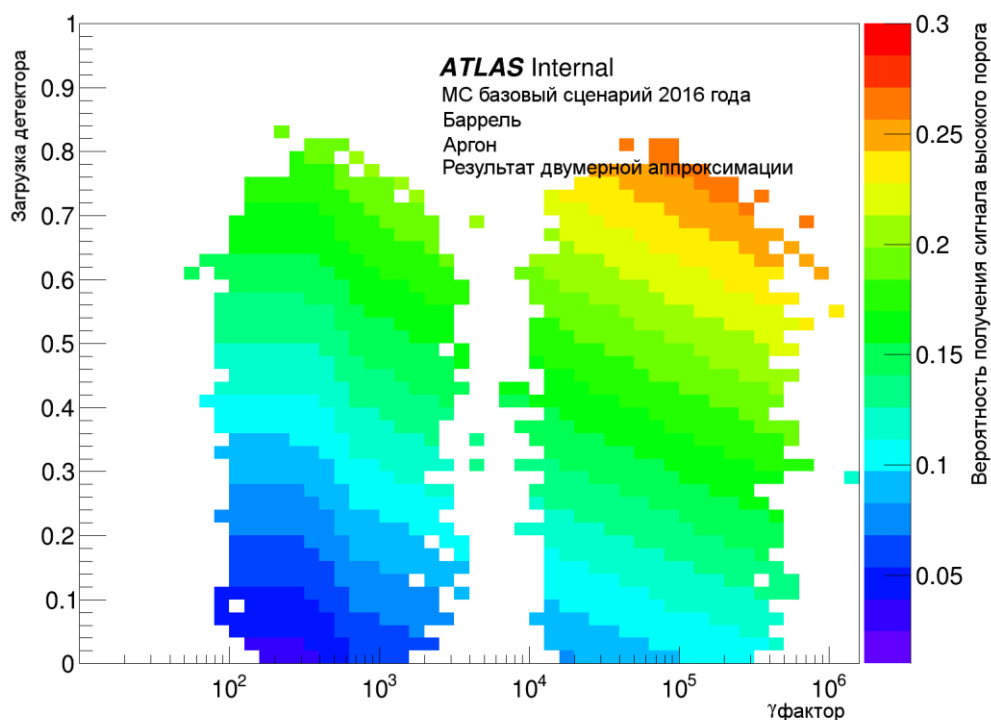


Рисунок 53 - Результат аппроксимации распределения  $p_{HT}$  в зависимости от  $\gamma$ -фактора и загрузки детектора в центральной части детектора для аргоновых трубок в случае базового сценария 2016 года.

На рисунках 54 и 55 приведены аналогичные распределения для ксеноновой смеси.

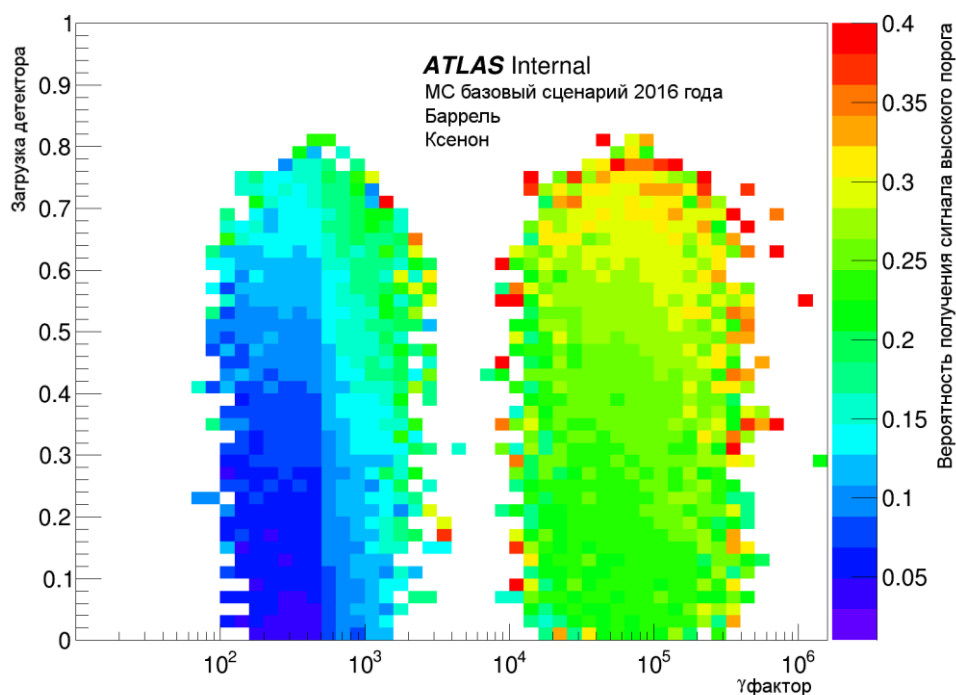


Рисунок 54 - Двумерное распределение  $p_{HT}$  в зависимости от  $\gamma$ -фактора и загрузки детектора в центральной части детектора для ксеноновых трубок в случае базового сценария 2016 года.

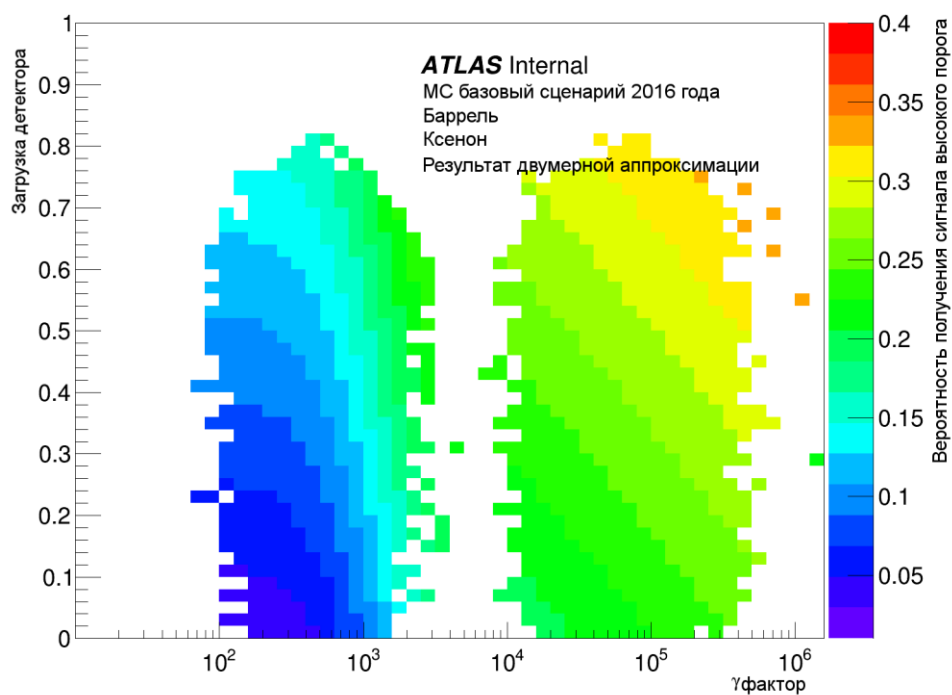


Рисунок 55 - Результат аппроксимации распределения  $p_{HT}$  в зависимости от  $\gamma$ -фактора и загрузки детектора в центральной части детектора для ксеноновых трубок в случае базового сценария 2016 года.

Как можно видеть, выбранный вид двумерной функции хорошо описывает

результаты измерений и может использоваться для получения значений вероятности образования сигнала высокого порога в зависимости от загрузки детектора и  $\gamma$ -фактора частицы.

В дополнение, на рисунках 56 и 57 приводятся кривые ошибок, вычисленные при помощи описанного метода, с использованием и без использования дополнительной информации о загрузке детектора и с учётом факторов коррекции.

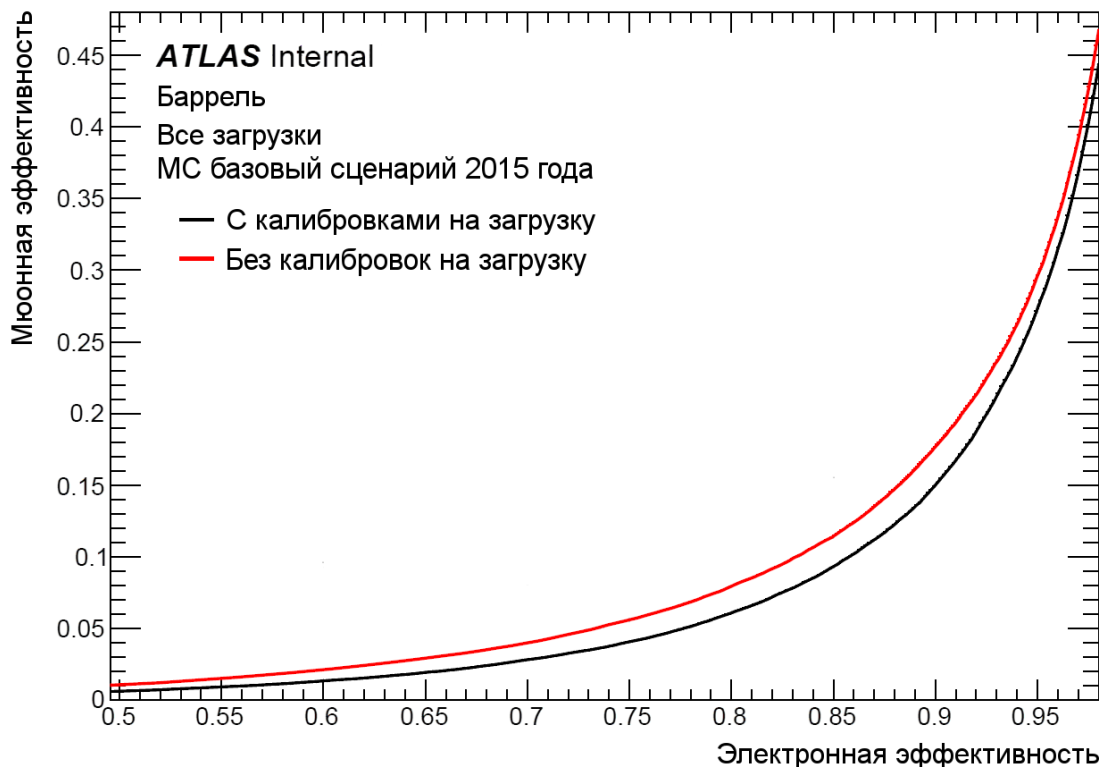


Рисунок 56 - Кривая ошибок в центральной части детектора с учётом калибровок на загрузку (черная линия) и без учёта калибровок (красная линия) в случае геометрии 2015 года.

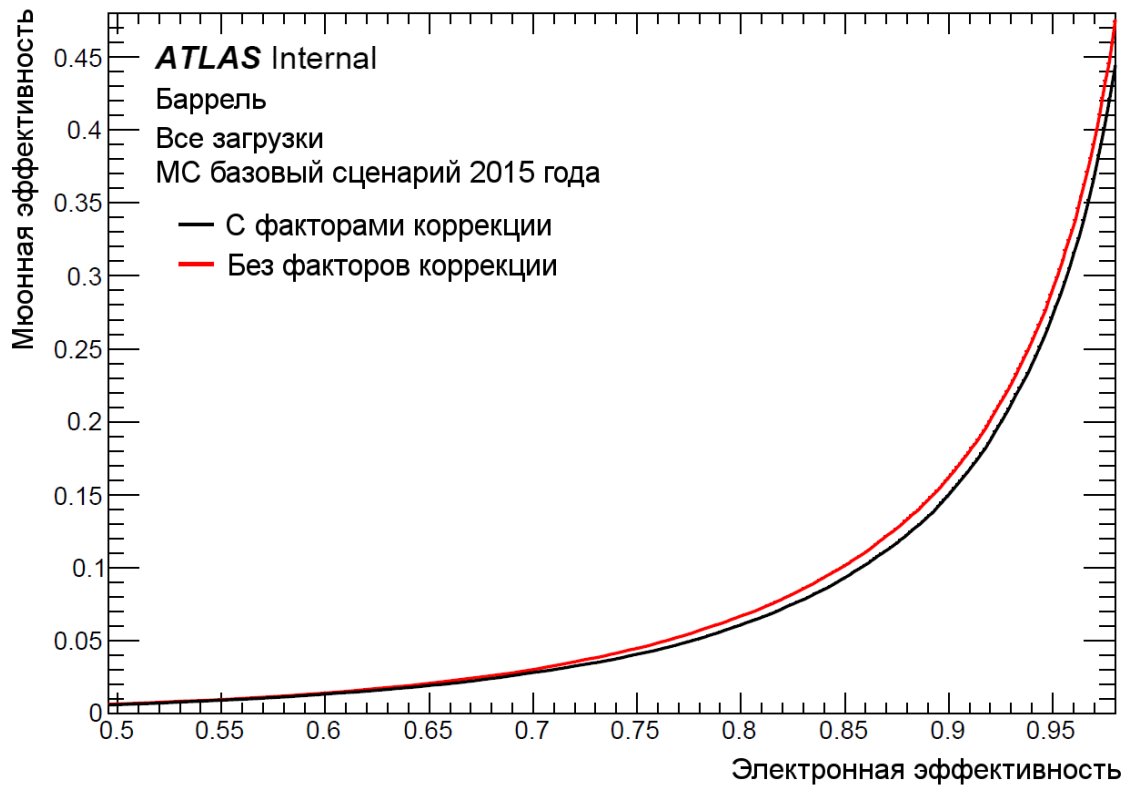


Рисунок 57 - Кривая ошибок в центральной части детектора с учётом факторов коррекции (черная линия) и без учёта коррекций (красная линия) в случае геометрии 2015 года.

Можно видеть, что применение двумерной аппроксимации с параметризацией загрузки детектора и применение факторов коррекции улучшает эффективность разделения электронов и мюонов в ТДПИ.



## 12.2. Оптимизация алгоритмов транспортировки трековой информации, включая параметры трека и их матрицу ошибок, между элементами трекового детектора, основанных на методе фильтра Кальмана

Во время первого сеанса работы ускорителя (Run-1) эксперимент АТЛАС набрал приблизительно  $25 \text{ фбн}^{-1}$  данных при энергии столкновений 7 ТэВ и 8 ТэВ с интервалом следования сгустков друг за другом 50 нс. После плановой длительной остановки в 2013-2014, в июне 2015 года начался второй сеанс работы ускорителя (Run-2) с энергией 13 ТэВ. Во время Run-2 ускоритель достигнет проектной светимости примерно  $1 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  с интервалом следования сгустков 25 нс, и эксперимент АТЛАС планирует набрать около  $100 \text{ фбн}^{-1}$  данных. В период длительной остановки вместе с обновлением детектора, также были переработаны алгоритмы реконструкции треков.

Первые предложения для оптимизации программного обеспечения трекинга были вынесены еще в 2012 году, когда высокие пиковые значения светимости выявили увеличение процессорного времени для выполнения реконструкции. Однако основные работы по оптимизации были выполнены во время длительной остановки ускорителя. Был проведен тщательный анализ программных модулей, описывающих геометрию детектора, модель данных событий (EDM) [1], алгоритмы трекинга, а также среды выполнения обработки экспериментальных данных с использованием программных инструментов оценки производительности. Были использованы программные инструменты, такие как KCachegrind [6], gperftools [7], а также другие средства. Кроме того, по итогам работы во время периода Run-1 был выполнен обзор структуры программного обеспечения трекинга, с целью оценки качества кода, простоты поддержки, и возможности использования современных подходов и методов, таких как параллельные вычисления [8].

В итоге были определены два основных направления для улучшения программного обеспечения: обновление и оптимизация инфраструктуры (в том числе общих служб и модели данных событий EDM) и оптимизация алгоритмов. Дополнительные улучшения коснулись чисто технической инфраструктуры, например, переход от 32-х к 64-битной архитектуре или переход на новую версию операционной системы Scientific Linux 6.

Алгоритмы реконструкции треков во многом основаны на матричных манипуляциях и использовании стандартных математических функций, которые потребляют значительное количество процессорного времени. Программа реконструкции треков во время периода Run-1 была основана на математической библиотеке CLHEP, которая использовалась для геометрических и алгебраических операций. Очевидно, что скорость выполнения алгоритмов реконструкции треков, таких как, например,

преобразование локальных координат на выбранном типе поверхности (соответствующей реальной геометрии детекторных элементов) в глобальное представление, транспортировка матрицы ковариаций или фильтр Кальмана, тесно связана с производительностью матричных манипуляций в библиотеке CLHEP. Обычный размер матриц в этих алгоритмах менее или равен пяти (по числу параметров трека). По этой причине было проведено сравнение современных математических библиотек (CLHEP, MKL, SMatrix и Eigen), поддерживающих матричные вычисления. По итогам сравнения был выполнен перевод программного обеспечения реконструкции на использование новой, более быстрой матричной библиотеки Eigen. Переход к использованию новой библиотеки потребовал внесения изменений в ~1000 программных пакетах, что повлекло за собой длительный этап тестирования, верификации результатов и отладки.

Переход от CLHEP к новой математической библиотеки также повлек за собой переписывания программных модулей модели данных событий EDM. Модель данных событий АТЛАС была разработана в 2003 году в соответствии с рекомендациями группы разработчиков программного обеспечения реконструкции. В основе модели EDM лежит класс-контейнер трека, который содержит представления измерений, параметризацию трека, соответствующую матрицу ковариаций и объекты, определяющие свойства материала и качество трека. Выбранный дизайн модели EDM был специально адаптирован для работы в среде обработки и анализа данных АТЕНА, используемой в эксперименте АТЛАС. Одна из основных стратегий при разработке модели заключалась в том, что вызываемые члены классов рассчитываются только при первом вызове и затем кэшируются (т.н. ленивая инициализация).

Негативной стороной “ленивой инициализации” оказалось динамическое выделение памяти и негативные эффекты связанные с тем, что время выделения памяти для членов класса оказалось неконтролируемым. Первоначально модель EDM была разработана для заряженных частиц (рисунок 58), однако необходимость включения в модель нейтральных частиц привело к массивному дублированию кода.

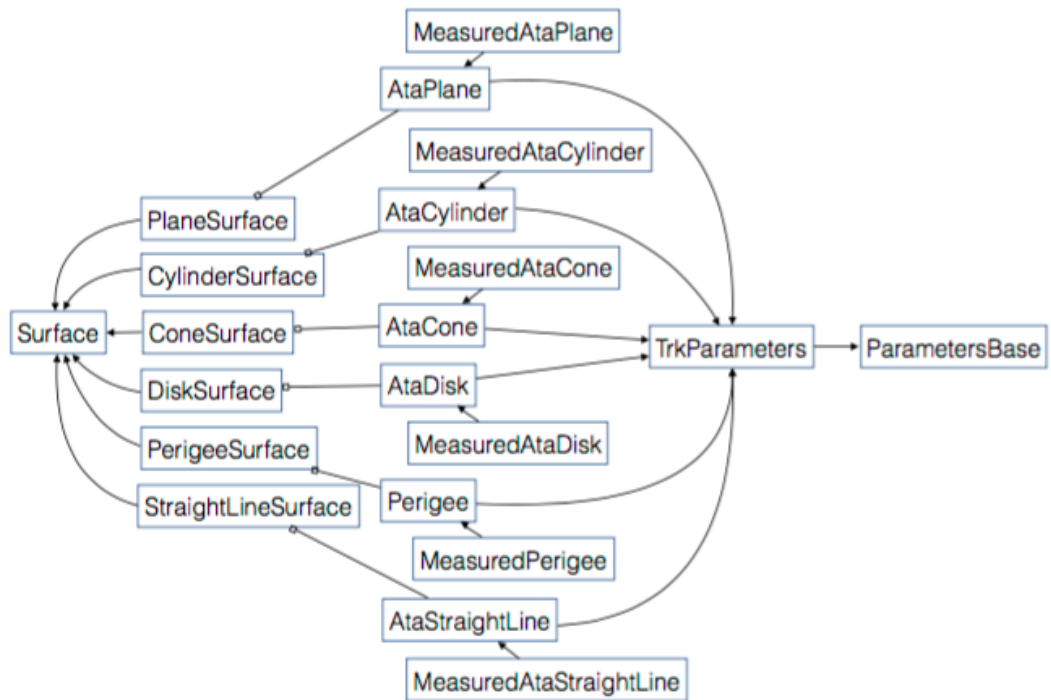


Рисунок 58 - Модель данных событий EDM для представления параметров трека во время периода Run-1. Здесь “PlaneSurface”, “CylinderSurface”, “ConeSurface”, “DiskSurface”, “PerigeeSurface” – объекты класса «Поверхность», соответственно – плоскость, цилиндр, конус, диск, перигей, прямая линия. «TrkParameters» – класс «ПараметрыТрека», “ParametersBase” – класс «БазовыеПараметры».

Аналогично при расширении списка параметров трека, включив параметр массы привело к дополнительному излишнему дублированию кода. Одним из ограничивающих факторов было то, что математическая библиотека CLHEP не позволяет работать с векторами и матрицами нефиксированного размера.

Модель EDM включает описание ключевых классов для процесса трекинга, таких как трек (и его параметры), элементарная частица, вершина распада, геометрия детектора и т.д. Определение класса трека включает как локальные, так и глобальные координаты. В расширенных версиях трек может содержать дополнительную информацию об условиях, в которых были получены параметры: информация об используемых алгоритмах, создавших трек и информацию о качестве фитирования. Трек, проходя через детектор АТЛАС, пересекает множество поверхностей (детекторных элементов). Таким образом, параметры трека всегда выражены по отношению к измерениям на такой поверхности. Коллекция типов поверхностей, предложенная моделью EDM, обеспечивает перекрытие всех реальных поверхностей, соответствующих считывающим элементам.

Транспортировка параметров трека (т.е. представление трека по отношению к данной поверхности) и связанных с ним ковариаций является одной из наиболее частых задач при реконструкции трека. Самые прогрессивные методы фитирования, такие как

фильтр Кальмана основаны на предсказании параметров трека на каждой пересекаемой им поверхности (рисунок 59).

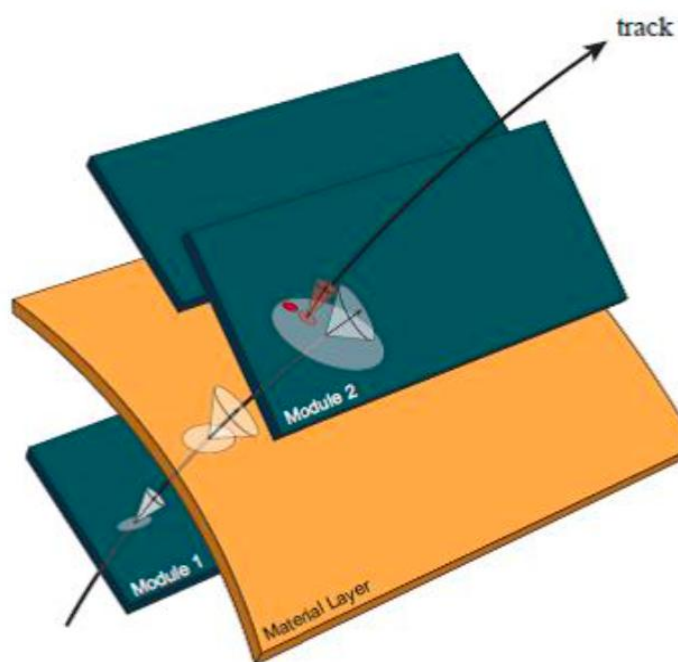


Рисунок 59 - Упрощенная иллюстрация типичного процесса экстраполяции на одном шаге фильтра Кальмана. Параметры трека (track) на модуле 1 (Module 1) могут быть распространены, что делает возможным предсказание параметров трека на модуле 2 (Module 2). Прохождение слоя вещества (Material Layer) между двумя модулями увеличивает неопределенность направления и, следовательно, вызывает корреляции в предсказаниях параметров трека.

Для алгоритмов фитирования трека необходима правильная последовательная обработка, учитывающая взаимодействие частицы с пройденным ею материалом детектора. Экстраполяция трека также необходима при фитировании вершин. В эксперименте АТЛАС состояние трека на поверхности описывается пятью параметрами: две локальные координаты на поверхности, две глобальные координаты, задающие вектор импульса частицы, и отношение заряда к значению импульса. Кроме этого, может быть использована расширенная форма параметров, включающая значение массы частицы. Программное обеспечение трекинга содержит пакет с классами параметров трека, реализованных для каждого типа поверхности: прямая, плоскость, конус, и т.д. Кроме этого, отдельные классы содержат как вышеописанные параметры треков, так и ковариантную матрицу ошибок измерений.

В результате проведенных работ модель EDM была полностью переписана и реализована на основе единственного класса с представлением таких параметров как заряд, тип поверхности и размерность матрицы в виде шаблонов. Это позволило сократить количество строк кода более чем на 90 процентов, сохраняя при этом ту же

функциональность модели. Проведенные тесты построения параметров трека с определением их типа и получением связанных с ними ковариаций показал трехкратное увеличение скорости работы новой реализации.

### 12.3. Разработка версий триггерных алгоритмов для В-физики с использованием данных быстрого трекинга

Увеличение энергии и светимости БАК требует адекватного усовершенствования триггерной системы детектора АТЛАС для поддержания высокой эффективности отбора событий, интересных с точки зрения физики, при сохранении приемлемого для обработки и сохранения потока событий.

Подсистема быстрого трекинга (БТ, FastTracKer (FTK)) - новая система быстрого поиска треков во внутреннем детекторе АТЛАСа, реализованная на аппаратном уровне. Она позволит (в окончательном варианте) осуществлять реконструкцию треков с поперечным импульсом  $p_T > 1 \text{ ГэВ}$ , во всем внутреннем детекторе с частотой отбора событий вплоть до 100 кГц. В 2016г. первая часть системы БТ была запущена в тестовом режиме (центральная часть внутреннего детектора), в 2017г система будет покрывать всю область (при 50% вычислительной мощности) и во время Второй остановки БАК (2018-2019 гг.) вся подсистема БТ будет введена в эксплуатацию. К этому времени необходимо разработать, протестировать на модельных и реальных данных и интегрировать в общую систему триггера алгоритмы отбора физических подпроцессов с использованием трековых данных системы БТ.

Для задач В-физики использование подсистемы БТ предоставляет следующие преимущества по сравнению с традиционными программными алгоритмами реконструкции треков.

Возможность исследования чисто адронных распадов  $b$ -адронов, отсутствовавшая до сих пор в связи с необходимостью использования мюонного триггера первого уровня (L1). При использовании БТ, реконструкция треков и построения из них кандидатов адронных распадов может производиться инклюзивно для всех событий, проходящих отбор какими-либо триггерами L1, тем самым выделяя  $b$ -адроны, родившиеся в одном из многих  $pp$ -взаимодействий (pile-up). Примерами представляющих интерес распадов такого типа являются  $B \rightarrow h^+h^-$  (важный источник фона для редкого распада  $B_0(s) \rightarrow \mu^+\mu^-$ , интересны также с точки зрения исследования CP-нарушения),  $B_s \rightarrow \phi(K^+K^-)\phi(K^+K^-)$  (измерение CP-нарушающей фазы).

Быстрая реконструкция адронных треков в триггерах для распадов  $B \rightarrow \mu^+\mu^-X$  ( $b\text{Витихv}2$ ). В настоящее время для их поиска используются программные алгоритмы реконструкции в широкой ( $\pm 0,75$  по азимутальному углу и псевдобыстроте) области вокруг мюонов (RoI), идентифицированных в L1, тем самым создавая существенную вычислительную нагрузку на триггерную компьютерную ферму. В дальнейшем это может стать ключевым фактором, ограничивающим работу таких триггеров. БТ сможет решить

проблему вычислительных ресурсов, а также позволит реконструировать эти адронные треки за пределами RoI.

Реконструкция адронных треков при поиске дважды и трижды тяжёлых барионов. Один из подходов триггерного отбора событий с рождением таких частиц состоит в поиске их каскадных адронных распадов с  $\Xi$  или  $\Omega$  гиперонами в конечном состоянии. Последние хорошо идентифицируются по своим адронным распадам  $\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 \pi^- \rightarrow p \pi^- \pi^-$  и  $\Omega^- \rightarrow \Lambda^0 K^- \rightarrow p \pi^- K^-$ , тогда как на уровне L1 можно использовать одно-, двух- или трёх-мюонный триггер, в предположении, что эти мюоны служат меткой полуплептонных распадов других двух (трёх) тяжёлых адронов, присутствующих в событии с рождением дважды (трижды) тяжёлых адронов. Программная реконструкция треков в RoI в данном случае неэффективна, т. к.  $\Xi$  или  $\Omega$  гипероны с высокой вероятностью находятся за пределами RoI не связанных с ними мюонов. В то же время использование БТ во всём объёме внутреннего детектора решает эту проблему.

На первом этапе требуется оценить качество реконструкции событий и эффективность алгоритмов отбора событий, в которых вместо используемых в настоящее время треков, реконструируемых стандартными алгоритмами триггера высокого уровня, используются треки, восстановленные алгоритмами БТ.

Для тестирования был выбран канал распада  $\Lambda_b \rightarrow \mu^+ \mu^- \Lambda(p\pi)$ , так как ожидается, что возможность использования трековой информации со всего объёма внутреннего детектора (в системе БТ) может дать прирост эффективности именно для событий с большим количеством заряженных частиц в конечном состоянии. При анализе использовались Монте-Карло события, полученные в рамках стандартной процедуры моделирования, принятой в сотрудничестве АТЛАС (наборы данных серии MC15). 50 тыс. событий, сгенерированных программой PYTHIA8 и прошедших полную процедуру моделирования отклика детекторов установки АТЛАС, затем обрабатывались программой эмуляции системы БТ, полностью повторяющей логику работы специализированных процессоров системы БТ. Полученные в итоге параметры реконструированных треков записывались в виде стандартных массивов данных (`xAOD::TrackParticleContainer`), которые можно использовать в алгоритмах триггера высокого уровня для on-line отбора событий. Для работы с этим новым источником трековой информации была проведена модернизация стандартного алгоритма, позволяющая анализировать событие как с использованием БТ-треков, так и в обычном режиме.

В общее триггерное меню была добавлена специальная цепочка алгоритмов для отбора событий с использованием данных БТ (`EF_2mu4_bVmu4v2_Ftk`) На рисунках 59 и 60 показаны эффективности восстановления треков мюонов (рисунок 60) и протонов

(рисунок 61) в зависимости от их псевдобыстроты и поперечного импульса для частиц, реконструированных традиционным алгоритмом (IDTrig) и реконструированных системой быстрого трекинга (FTK).

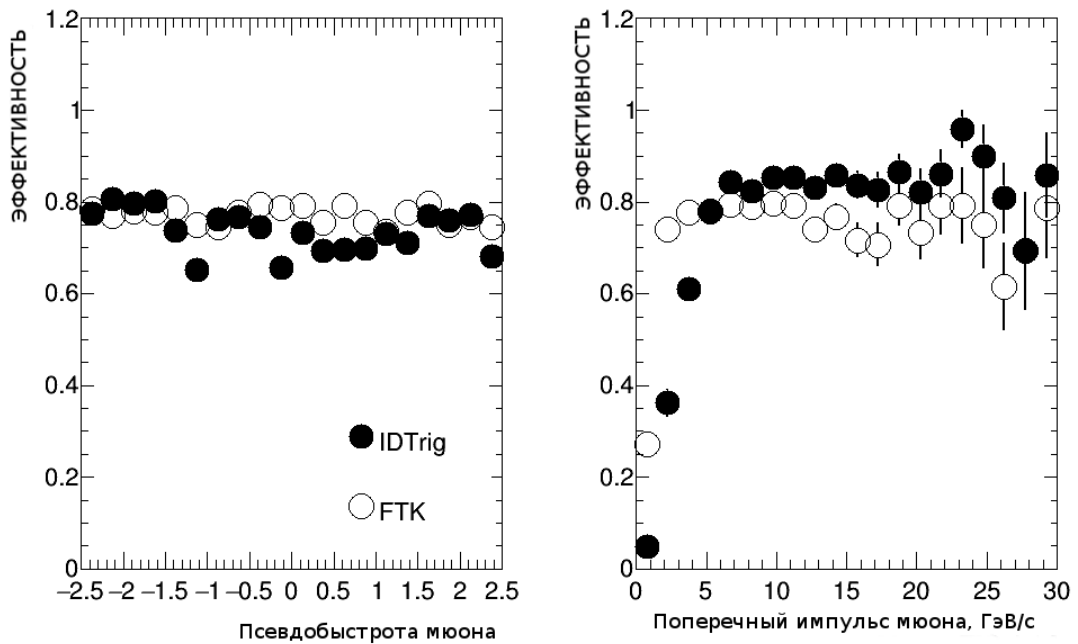


Рисунок 60 - Эффективность восстановления треков мюонов в зависимости от псевдобыстроты (слева) и импульса (справа) системой БТ (FTK) и стандартной процедурой реконструкции (IDTrig). Монте-Карло события распада  $\Lambda_b \rightarrow \mu^+ \mu^- \Lambda(p\pi)$

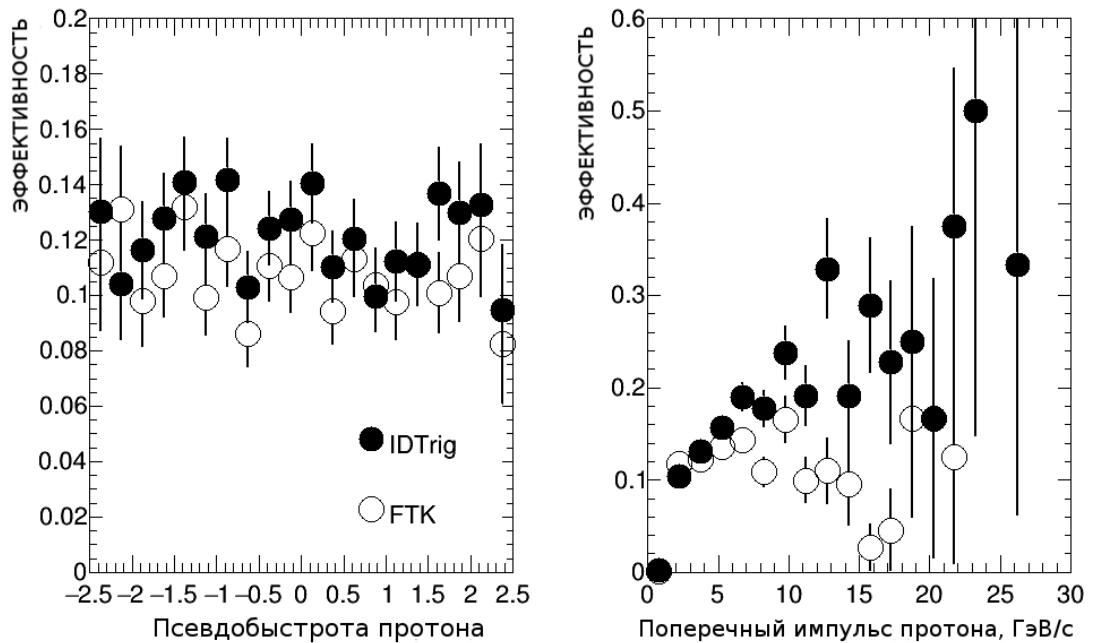


Рисунок 61 - Эффективность восстановления треков протонов в зависимости от псевдобыстроты (слева) и импульса (справа) системой БТ (FTK) и стандартной процедурой реконструкции (IDTrig). Монте-Карло события распада  $\Lambda_b \rightarrow \mu^+ \mu^- \Lambda(p\pi)$



Эффективность определяется как отношение числа восстановленных  $N_{рек}$  к числу сгенерированных  $N_{ген.}$  частиц в соответствующих интервалах. Соответствие реконструированного трека треку монте-карловской частицы определялось по стандартному критерию близости их параметров в пространстве псевдобыстрота-поперечный импульс ( $\eta, p_T$ ):

$$\Delta R = \sqrt{(\eta_{рек} - \eta_{ген.})^2 + (p_{Tрек} - p_{Tген.})^2} < 0,01$$

Как следует из графиков, система быстрого трекинга обеспечивает сравнимую с обычной процедурой триггерной реконструкции эффективность поиска мюонов, а для области малых импульсов,  $p_T < 6$  ГэВ/с, показывает лучшую производительность.

Эффективность восстановления протонов (рисунок 2) существенно ниже эффективности восстановления мюонов в данном канале распада. Это ожидаемый эффект, т. к. протоны и пионы являются продуктами распада  $\Lambda$ -гиперона, который, в основном, происходит на значительном удалении от первичной вершины pp-взаимодействия, в то время как алгоритмы восстановления треков заряженных частиц оптимизированы для поиска частиц, возникших в первичном взаимодействии или вблизи (несколько см.) него.

Сравнение выхода событий, отобранных триггерным алгоритмом в режиме использования данных БТ по сравнению с выходом событий стандартной цепочки  $EF_{2\mu 4_b V_{min} \eta v_2}$  показало, что выход в режиме БТ примерно в 2 раза ниже. Это объясняется тем, что эффективность восстановления треков системой БТ (как мюонов, так и адронов) несколько ниже в области поперечных импульсов  $p_T > 4-5$  ГэВ/с. Однако, оптимизация параметров отбора, возможность использования треков частиц за границами «области интереса» (RoI), в которой работают стандартные алгоритмы, а также сверхвысокое быстродействие системы БТ позволят компенсировать эту неэффективность. Изучение этих вариантов будет продолжено в 2017 г. как с использованием моделирования, так и с реальными данными с использованием системы БТ.

Для полного моделирования и оптимизации процедуры триггерного отбора физических процессов, упомянутых выше, необходимо наличие большого количества смоделированных событий, что требует значительных вычислительных ресурсов. Для увеличения скорости генерации событий с характеристиками, специфичными для отбора системой БТ (поперечные импульсы вторичных частиц  $p_T < 1$  ГэВ/с и псевдобыстроты  $|\eta| < 2,5$ ), были проведены тесты по генерации наборов событий при разных внутренних параметрах Монте-Карло генератора (PYTHIA 8). Анализировались искажения спектров наблюдаемых вторичных частиц по сравнению со спектрами, полученными при генерации со стандартными параметрами. В результате были определены параметры, позволяющие

существенно ускорить процедуру моделирования при минимальных изменениях спектров.

Эти результаты используются при продолжении работ по разработке новых алгоритмов с использованием данных БТ.

## 12.4. Поиск ТБХ на экспериментальных данных АТЛАС

### Результаты анализа данных, набранных при энергии 8 ТэВ

Рабочей группой сотрудничества АТЛАС по поиску ТБХ, в которую входит и группа ИТЭФ, была проведена окончательная обработка всех данных, набранных при энергии 8 ТэВ. Анализ событий в канале  $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$  привел к ограничению на сечение рождения в механизме  $ggF$  (VBF) 40 фбн (15 фбн) при массе 1,5 ТэВ в интерпретации модели NWA [9], см. рисунок 62.

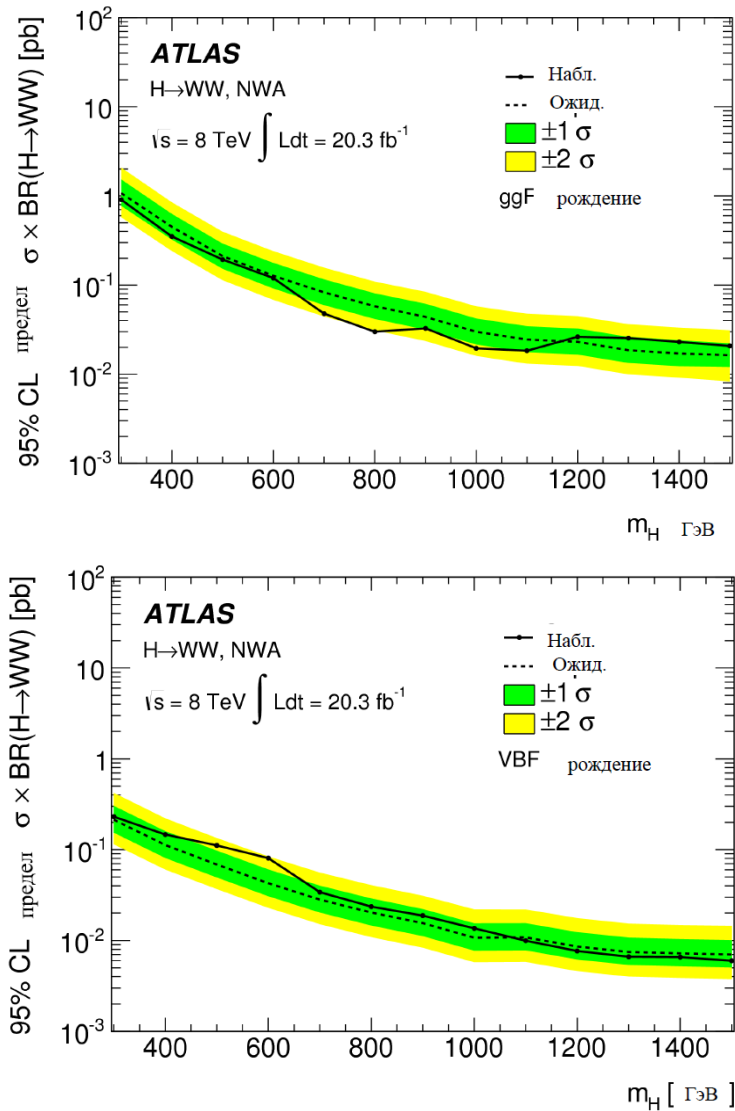


Рисунок 62 - Экспериментальный верхний предел на сечение рождения ТБХ при энергии столкновения протонов 8 ТэВ в зависимости от его массы в канале распада  $H \rightarrow WW$  в интерпретации модели NWA [9] в механизме слияния глюонов (сверху) и в механизме слияния векторных бозонов (снизу) .

Статистически значимого сигнала от ТБХ в указанном диапазоне масс найдено не было.

### Предварительные результаты анализа данных, набранных при энергии 13 ТэВ

Рабочей группой ТБХ проведена обработка 100% реальных данных, набранных в 2015 г. Нами изучалась кинематика событий сигнала и фона и на основании этого вырабатывались критерии отбора. В частности, мы внедрили класс специальных профильных гистограмм в коды алгоритма. Итоговые критерии отбора приводятся в Таблице 6.

Таблица 6 – Критерии отбора событий с ТБХ, основанные на анализе смоделированных данных при энергии 13 ТэВ [10].

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

На рисунке 63 для примера показано распределение по поперечной массе  $m_T$  после отбора событий с двумя жесткими изолированными лептонами ( $e\mu$  или  $\mu e$ ) и адронной струей в кинематической области сигнала.

Распределение по  $m_T$  в области сигнала

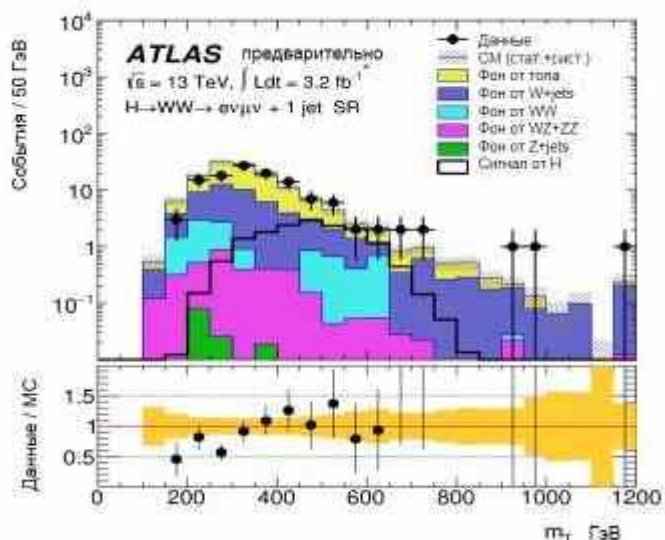


Рисунок 63 - Распределение по поперечной массе  $m_T$  [10] после отбора событий с двумя жесткими изолированными лептонами в сигнальной кинематической области (верхний рисунок). Показаны как реальные данные, так и результаты MC-моделирования, для сигнала показаны расчеты при массе ТБХ 750 ГэВ. Отношение данные/MC (нижний рисунок).

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

На рисунке 64 показан экспериментальный верхний предел на сечение рождения ТБХ при энергии столкновения протонов 13 ТэВ в зависимости от его массы в канале распада  $H \rightarrow WW$  в интерпретации модели NWA [11] в механизме слияния глюонов (сверху) и в механизме слияния векторных бозонов (снизу).

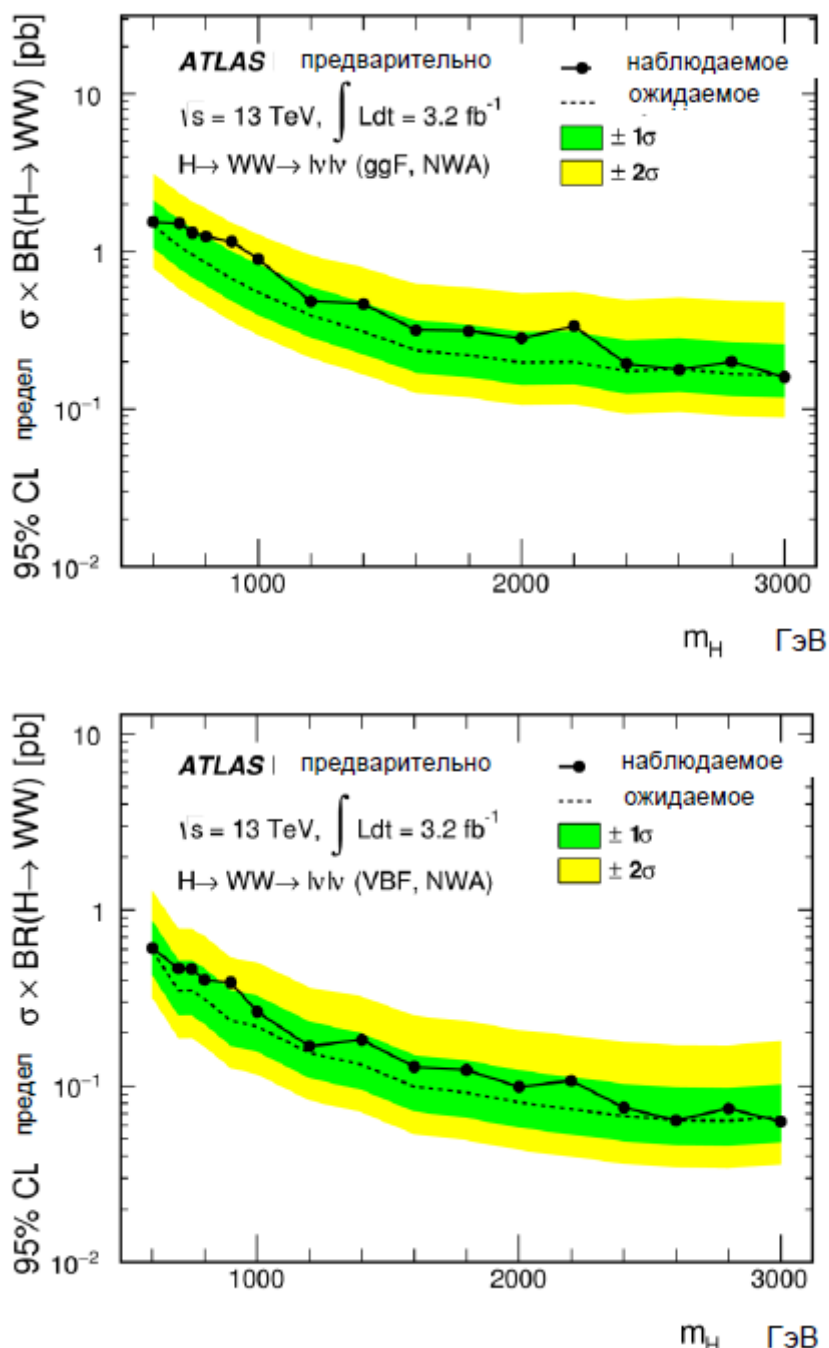


Рисунок 64. Экспериментальный верхний предел на сечение рождения ТБХ, помноженное на относительную вероятность распада по каналу  $H \rightarrow WW$  при энергии столкновения протонов 13 ТэВ в зависимости от его массы в интерпретации модели NWA [10] в механизме слияния глюонов (сверху) и в механизме слияния векторных бозонов (снизу).

Использовалась полная статистика данных, набранных в 2015 г.

Верхний предел на 95%-ном уровне достоверности для  $\sigma_{BR}(H \rightarrow WW)$  варьируется от 150 до 1500 фб в сканируемой области масс ТБХ от 600 до 3000 ГэВ в случае рождения его через механизм ggF. Аналогичный предел для механизма VBF составляет 60-600 фб.

Летом был проведен предварительный анализ всех событий при энергии 13 ТэВ, набранных до середины 2016 г. Их статистика вчетверо превышает ту, которая была набрана в 2015 г. Кроме того, были внесены существенные изменения в анализ. Расширен в меньшую сторону (с 600 до 300 ГэВ) диапазон сканируемых масс ТБХ. С помощью специального алгоритма были предложены новые кинематические области для сигнала в соответствии с разными механизмами рождения ТБХ и соответствующие им новые критерии отбора. Естественно, они стали мягче в связи с изменением нижней границы поиска по массе ТБХ.

Новые критерии отбора таковы:  $p_T(\text{lead}) > 45$  ГэВ  $p_T(\text{second}) > 30$  ГэВ для лидирующего и второго лептонов, соответственно; отсутствие b-струй в событии; инвариантная масса лептонов более 55 ГэВ. Для событий в сигнальной области VBF1J дополнительно требуется наличие одной передней адронной струи с  $p_T(\text{jet}) > 30$  ГэВ. В области VBF2J должно быть две или более адронных струи с VBF-сигнатурой (т.е. инвариантной массой лидирующих струй более 500 ГэВ и разницей их быстрот в как минимум 4 единицы). Для области ggF требуется полное отсутствие жестких адронных струй. Количество событий, прошедших отборы, показано в Таблице 7.

Таблица 7 – Измеренное число событий в трех сигнальных кинематических областях после отборов. Показано также предсказанное число событий фона [11].

| Процесс / область сигнала | SR (ggF)    | SR (VBF1J) | SR (VBF2J) |
|---------------------------|-------------|------------|------------|
| WW                        | 5300 ± 400  | 197 ± 31   | 53 ± 15    |
| Top                       | 4200 ± 400  | 141 ± 26   | 124 ± 19   |
| Z/g                       | 557 ± 25    | 20 ± 7     | 12 ± 4     |
| W+jets                    | 450 ± 120   | 22 ± 6     | 7,5 ± 2,2  |
| VV                        | 323 ± 12    | 9.5 ± 1.0  | 5,7 ± 0,8  |
| Полный фон                | 10790 ± 110 | 389 ± 22   | 202 ± 14   |
| Данные                    | 10718       | 384        | 203        |

Видно, что в каждой из трех сигнальных областей экспериментально наблюдаемые и предсказанные для фона числа событий согласуются. Сигнала от ТБХ нет. На рисунке 65 для примера представлено распределение по поперечной массе  $m_T$  после отбора

событий с двумя жесткими изолированными лептонами и двумя адронными струями в сигнальной кинематической области (верхний рисунок).

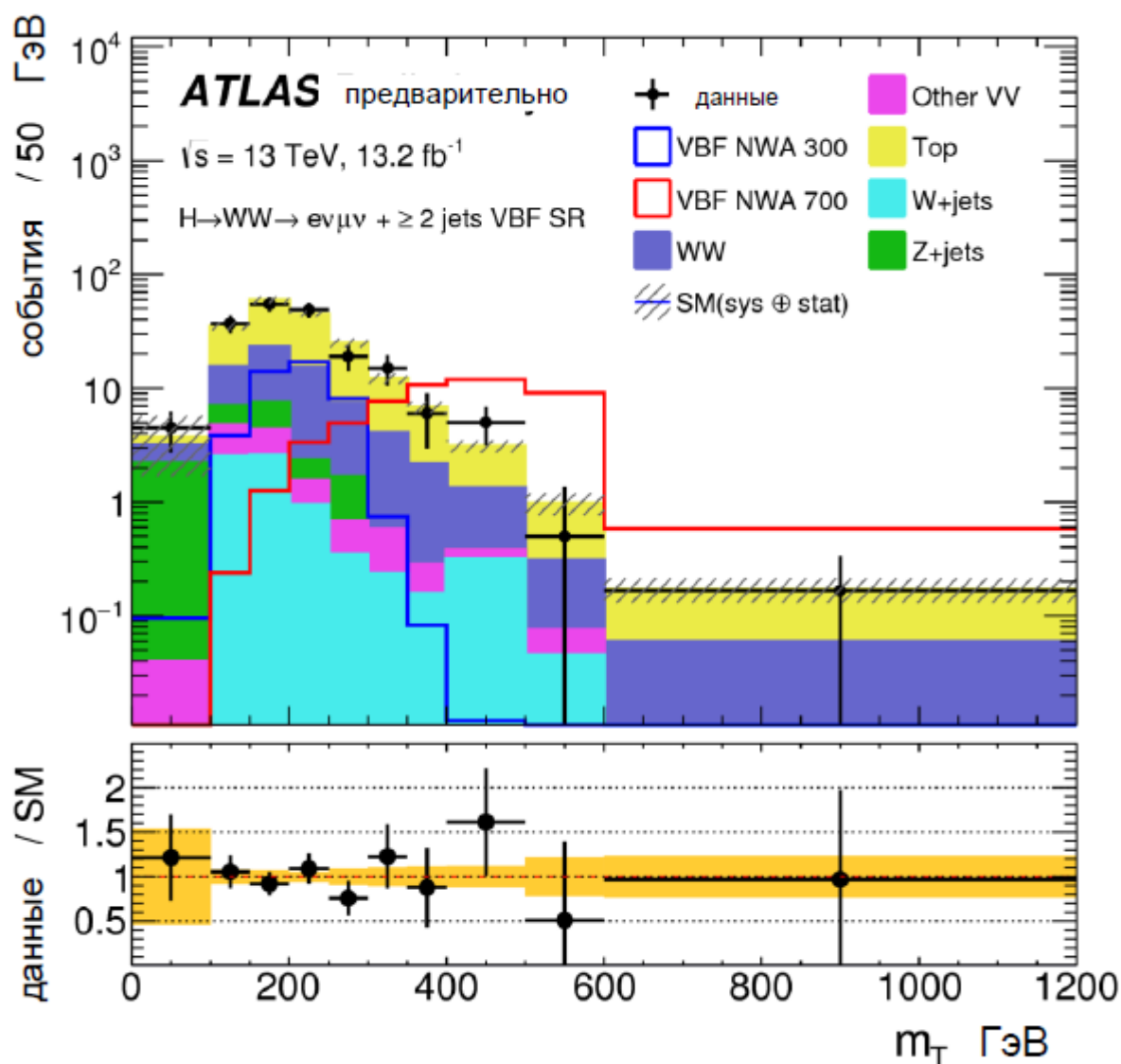


Рисунок 65 - Распределение по поперечной массе  $m_T$  после отбора событий с двумя жесткими изолированными лептонами и двумя адронными струями в сигнальной кинематической области (верхний рисунок). Показаны как реальные данные, так и результаты MC-моделирования, для сигнала показаны расчеты при массе ТБХ 300 ГэВ и 750 ГэВ. Отношение данные/MC (нижний рисунок).

Экспериментальный верхний предел на сечение рождения ТБХ, помноженное на относительную вероятность распада по каналу  $H \rightarrow WW$  при энергии столкновения протонов 13 ТэВ в зависимости от его массы в интерпретации модели NWA показано на рисунке 66 в механизме слияния глюонов (сверху) и в механизме слияния векторных бозонов (снизу).

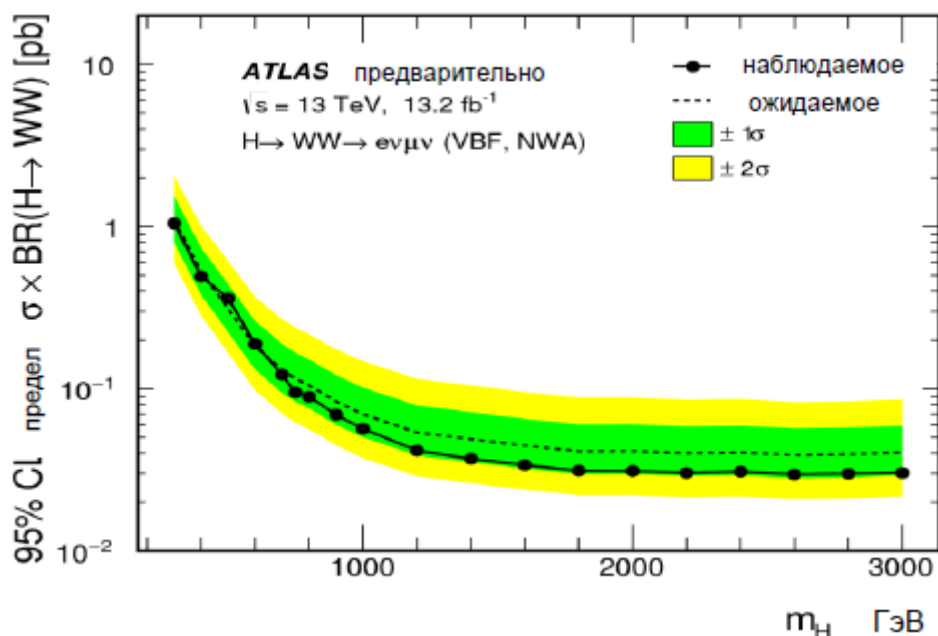
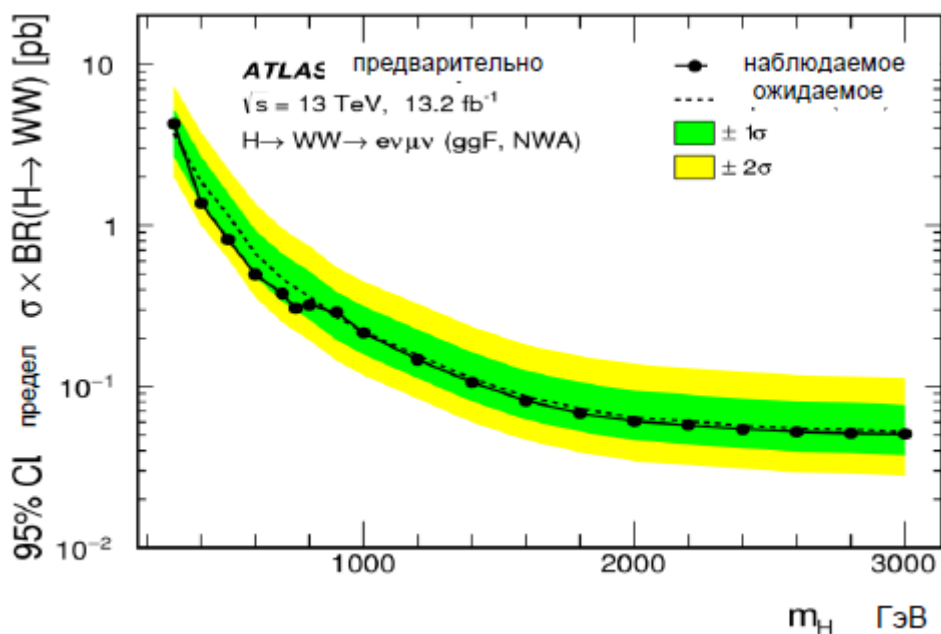


Рисунок 66 - Экспериментальный верхний предел на сечение рождения ТБХ, помноженное на относительную вероятность распада по каналу  $H \rightarrow WW$  при энергии столкновения протонов 13 ТэВ в зависимости от его массы в интерпретации модели NWA в механизме слияния глюонов (сверху) и в механизме слияния векторных бозонов (снизу).

Использовалась полная статистика данных, набранных в 2015 г и часть статистики, набранная в 2016 г.

Напомним, что в отличие от рисунка 64 здесь использовалась полная статистика данных, набранных в 2015 г и часть статистики, набранная в 2016 г. Суммарный набор используемых данных вчетверо превышает статистику 2015 г.

Таким образом, на 95%-ном уровне достоверности установлены новые верхние



пределы на сечение рождения ТБХ в канале  $H \rightarrow WW$  при энергии протонов 13 ТэВ. В интерпретации модели NWA они варьируются от 4,3 пб при массе ТБХ 300 ГэВ до 51 фб при массе 3 ТэВ в механизме ggF. Для механизма VBF соответствующие величины – 1,1 пб и 30 фб.

Итак, по сравнению с предыдущим анализом [10], удалось понизить верхний предел на сечение рождения ТБХ при массе 3 ТэВ в 2-3 раза [11].

#### Поиск ТБХ в других каналах распада

В эксперименте АТЛАС поиск ТБХ проводился не только в канале  $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ , но и в других каналах с участием бозонов:  $H \rightarrow ZZ$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$  и  $H \rightarrow Z\gamma$ . В случае  $H \rightarrow ZZ$  рассматривались цепочки распадов  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ ,  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\nu\nu$ ,  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell qq$  и  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \nu\nu qq$ . Исследования проводились как при энергии 8 ТэВ, так и 13 ТэВ. Ни в одном случае статистически значимого превышения сигнала над фоном не было найдено и установлены новые верхние пределы на 95% уровне достоверности на сечение рождения ТБХ в механизмах VBF и ggF в широком диапазоне масс в интерпретации «игрушечной» модели NWA. Результаты сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Верхние пределы на 95% уровне достоверности на сечение рождения ТБХ в механизмах VBF и ggF в широком диапазоне масс в интерпретации «игрушечной» модели NWA.

| Мода распада                                  | Диапазон масс, ГэВ | Энергия | 95% CL на:                         | Величина                              | Ссылка |
|---|--------------------|---------|------------------------------------|---------------------------------------|--------|
| $H \rightarrow ZZ$<br>комбинация              | 200-1000           | 8 ТэВ   | $\sigma BR(H \rightarrow ZZ)$      | 8-530 фб (ggF)<br>9-310 фб (VBF)      | [12]   |
| $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu qq$     | 500-3000           | 13 ТэВ  | $\sigma BR(H \rightarrow WW)$      | 2,5-1000 фб (ggF)                     | [13]   |
| $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$          | 200-1000           | 13 ТэВ  | $\sigma BR(H \rightarrow 4\ell)$   | 0.22-4.6 фб (ggF)<br>0.2-1.9 фб (VBF) | [14]   |
| $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\nu\nu$ | 300-1000           | 13 ТэВ  | $\sigma BR(H \rightarrow ZZ)$      | 30-2000 фб (ggF)                      | [15]   |
| $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell qq$    | 300-3000           | 13 ТэВ  | $\sigma BR(H \rightarrow ZZ)$      | 60-1200 фб (ggF)<br>50-600 фб (VBF)   | [16]   |
| $H \rightarrow ZZ \rightarrow \nu\nu qq$      | 500-3000           | 13 ТэВ  | $\sigma BR(H \rightarrow ZZ)$      | 3-5000 фб (ggF)                       | [16]   |
| $H \rightarrow Z\gamma$                       | 250-2400           | 13 ТэВ  | $\sigma BR(H \rightarrow Z\gamma)$ | 5-215 фб                              | [17]   |

13. Технические требования и предложения по разработке, изготовлению и эксплуатации усовершенствованных детекторных устройств супердетектора АТЛАС. Разработка рекомендаций по усовершенствованию детекторных устройств супердетектора АТЛАС для проведения экспериментальных исследований взаимодействий протонов на пучках реконструированного БАК. Обобщение и выводы по результатам ПНИЭР

Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН) продолжает работу над программой модернизации ускорительного комплекса и детекторов для БАК. Научный совет ЦЕРН утвердил расходы, начиная с 2008 года, в размере 250 млн. швейцарских франков для модернизации комплекса инжектора БАК. К настоящему времени работа над созданием нового линейного ускорителя ионов водорода для комплекса инжектора БАК почти завершена. Также близка к завершению работа над созданием новых фокусирующих магнитов с низким параметром  $\beta$  ( $\beta$  это расстояние от точки фокуса на котором ширина пучка удваивается по сравнению с шириной в фокусе), которые планируется установить к 2020 году. Предлагаемый второй этап модернизации будет включать в себя дополнительную модернизацию комплекса инжектора, позволяющую инжектировать в БАК пучок с большим током. Эта работа в сочетании с развитием новых резонаторов (stab cavities), которые позволят эффективно обеспечить почти лобовое столкновения пучков в точке пересечения, несмотря на то, что пучки пересекаются под некоторым углом, что позволит увеличить интегральную светимость. Одновременно это даст возможность ограничить пиковую светимость, используя так называемый метод выравнивания светимости. Ожидается, что после модернизации пиковая светимость достигнет значения  $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , или  $5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  с выравниванием светимости. Общий план модернизации БАК показан на следующей диаграмме (см. рисунок 67).

|      |         |   |
|------|---------|---|
| 2009 |         | Запуск БАК, $\sqrt{s} = 900$ ТэВ  |
| 2010 |         |   |
| 2011 |         | $\sqrt{s} = 7-8$ ТэВ, светимость = $6 \times 10^{33}$ , интервал сгустков 50 нс.  |
| 2012 |         | Максимальная светимость в 2012 г. = $7,7 \times 10^{33}$  |
| 2013 | ДО<br>1 | Работы по получению проектной энергии и светимости  |
| 2014 |         |   |
| 2015 |         |   |
| 2016 |         | $\sqrt{s} = 13-14$ ТэВ, светимость $\sim 1 \times 10^{34}$ , интервал сгустков 25 нс.                                     |
| 2017 |         |   |
| 2018 | ДО2     | Фаза 1. Новый инжектор, достижение предельной проектной светимости  |
| 2019 |         |   |
| 2020 |         | $\sqrt{s} = 14$ ТэВ, светимость $\sim 2 \times 10^{34}$ , интервал сгустков 25 нс.  |
| 2021 |         |   |
| 2022 | ДО3     | Фаза 2. «Crab» резонаторы ?   |
| 2023 |         |   |
| .... |         |   |
| 2030 |         | $\sqrt{s} = 14$ ТэВ, светимость $\sim 5 \times 10^{34}$ , выравнивание светимости.<br>?? К энергии $\sqrt{s} = 14$ ТэВ ?? |

Рисунок 67 - Общий план модернизации БАК.

Начатая модернизация БАК уже после предстоящей длительной остановки в 2018 году позволит превзойти проектную светимость, а после 2020 года, возможно, достичь её пятикратного увеличения по сравнению с проектным значением (High Luminosity LHC). Помимо этого в ЦЕРН'е уже начались исследования по возможному обновлению дипольных магнитов, которые могут позволить удвоить энергии пучков, что позволит достичь энергии протон-протонных столкновений 28 ТэВ (HighEnergy LHC). Однако этот проект может стать реальностью в 2030-х годах, только при соответствующей физической мотивации, вытекающей из результатов, полученных на БАК в 2020-х годах.

Детектор АТЛАС может работать с максимальной светимостью не превышающей  $2 \times 10^{34}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Для работы при более высокой светимости Большого адронного коллайдера АТЛАС детектор необходимо модернизировать. Модернизацию детектора АТЛАС можно подразделить на три фазы:

1. Фаза-0: Осуществлена во время первой длительной остановки (ДО1) БАК (Long Shutdown - LS1) в 2013-2014 годах. Включает в себя установку нового дополнительного слоя детектора Pixel расположенного в непосредственной близости к протонным пучкам (~15 см), для улучшения идентификации В-мезонов.
2. Фаза-I: Планируется к выполнению во время второй длительной остановки (ДО2) БАК (Long Shutdown – LS2) в 2018 году. Предполагается закончить строительство детектора АТЛАС в том виде, как он был спроектирован для работы на проектной светимости БАК  $3 \times 10^{34}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Как оказалось, некоторые системы не смогут работать при

этой светимости в связи с сильной фоновой загрузкой. Так, например, требуется модернизация внутреннего слоя мюонных камер мюонного спектрометра детектора АТЛАС, так называемые малые мюонные колеса (New Small Wheels). Это позволит эксперименту АТЛАС сохранить низкий порог триггирования одиночных изолированных мюонов в передней области и проводить реконструкции мюонных треков при работе на высокой светимости БАК.

3. Фаза-II: Планируется к выполнению во время третьей длительной остановки (ДОЗ) БАК (Long Shutdown – LS3) в 2022 году. Включает в себя дальнейшую модернизацию детектора АТЛАС, необходимую для устойчивой работы при светимости  $5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и более. С этой целью планируется полностью заменить существующий внутренний детектор установки АТЛАС, предназначенный для реконструкции треков заряженных частиц, модернизировать передние калориметры и обновить почти всю электронику для считывания данных во всех подсистемах. Потребуется также значительная модернизация триггерной системы запуска установки АТЛАС. Окончательное решение о проведении этого этапа модернизации будет основываться на физических результатах, полученных на БАК в ближайшие годы. Рекомендуется, однако, уже сейчас вести научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки, чтобы предложить пути модернизации детектора АТЛАС, соответствующие планам модернизации БАК.

В ходе работ по соглашению выполнены разработки конструкций и технологий изготовления как новых детекторов для установки АТЛАС, так и модернизации существующих, изготовлено технологическое оборудование и испытательные стенды.

По разработанной технологии на созданном оборудовании изготовлены экспериментальные образцы детекторов и компонентов систем установки АТЛАС.

Производственный контроль и последующие испытания образцов камер новых малых колёс мюонного спектрометра АТЛАС показали выполнимость требований технического задания. Предлагается использовать разработанные технические решения при производстве рабочих камер НМК.

Передний жидкоаргоновый миникалориметр предложенной конструкции с зазором между электродами 119 мкм, как показали испытания его прототипа, удовлетворяет условиям работы установки АТЛАС при повышенной светимости БАК и может быть рекомендован к использованию в составе установки.

Результаты работ по изготовлению сцинтилляторов для горячих зон установки АТЛАС могут быть рекомендованы к использованию при разработке и изготовлении детекторов частиц для работы в условиях повышенной радиации.

Схемные решения и технологии, разработанные при модернизации электроники

детекторов и систем установки АТЛАС, могут быть рекомендованы для использования при разработке аналогичных приборов.

Результаты работ по развитию и модернизации системы распределённых вычислений ГРИД предлагаются в качестве проверенного варианта возможной архитектуры при разработке других систем распределённых вычислений.

Работы по развитию критериев отбора событий и формированию триггеров образуют хорошую методическую базу для рекомендуемого дальнейшего физического анализа на большей статистике процессов с образованием тяжёлых мезонов и барионов и поиска тяжёлого бозона Хиггса.

Обобщая результаты работ по изготовлению и проверке лабораторных и экспериментальных образцов детекторов и электроники, отметим адекватность принятых технических решений и соответствие изготовленных образцов предъявляемым техническим требованиям. Рекомендуется использовать разработанные в ходе ПНИЭР технические решения и технологии при проектировании и изготовлении аналогичных детекторов для работы при высоких нагрузках регистрируемыми частицами.

В целом результаты работ, выполненных в рамках подотчётного соглашения, позволяют сделать вывод о выполнимости в срок модернизации установки АТЛАС, предусмотренной планом фазы 1. Учитывая сказанное, рекомендуется продолжить работы по изготовлению оборудования для модернизации установки АТЛАС, используя результаты субсидированной по Соглашению ПНИЭР.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

В рамках работ по камерам НМК выполнено:

- изготовление и испытания экспериментальных образцов ТЗК;
- проведение испытаний экспериментальных образцов ТЗК с помощью РС.

Выполнено оснащение экспериментальных образцов мюонных камер из ДТМ регистрирующей электроникой и проведено исследование физических характеристик на космических частицах.

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

Изготовлен экспериментальный образец миникалориметра. Проведены испытания экспериментального образца миникалориметра в пучке частиц с интенсивностью до  $10^{12}$  частиц/с на ускорителе У-70 ИФВЭ.

Проведены измерения оптических свойств облучённых образцов сцинтиллятора для горячих зон.

Проведены радиационные испытания новой электроники ЖАК и сцинтилляционного калориметров.

Изготовлена и испытана партия экспериментальных образцов оптических кабелей для ЖАК с распечаткой рефлектограмм по каждому волокну.

Испытана новая электроника считывания сцинтилляционного адронного калориметра в составе установки.

Выполнена разработка и реализация нового функционала программ для пакетного обновления данных с помощью интерфейса управления системы АГИС.

Разработана система мониторинга прохождения задач в сети распределённых вычислений ГРИД.

Выполнены следующие работы по модернизации специального программного обеспечения:

- оценка эффективности идентификации электронов в ТДПИ при загрузках, соответствующих светимости БАК после первой фазы его модернизации;
- оптимизация алгоритмов транспортировки трековой информации, включая параметры трека и их матрицу ошибок, между элементами трекового детектора, основанных на методе фильтра Кальмана;

- разработка версий триггерных алгоритмов для В-физики с использованием данных быстрого трекинга;
- поиск ТБХ на экспериментальных данных АТЛАС.

Разработаны рекомендации по усовершенствованию детекторных устройств супердетектора АТЛАС для проведения экспериментальных исследований на пучках реконструированного БАК. Сформулированы выводы по результатам ПНИЭР.

Подготовлены и приняты к защите две диссертации на соискание степени кандидата физ.-мат. наук:

- Солдатов Евгений Юрьевич, «Ассоциированное рождение Z бозона с фотоном в протон-протонных столкновениях в эксперименте ATLAS», диссертация принята к защите 14 декабря 2016 г. диссертационным советом Д 212.130.07, планируемая дата защиты: 15 февраля 2017 г. [18];
- Маевский Артём Сергеевич, «Прецизионные измерения характеристик В(s)-мезонов и их распадов в эксперименте ATLAS», диссертация принята к защите 28 декабря 2016 г. диссертационным советом Д 501.001.77, планируемая дата защиты - 21 апреля 2017 г. [19].

С использованием системы распределённых вычислений GRID (см. п. 13.1 отчёта 1 этапа, п. 10.4 отчёта 3 этапа и п 10 данного отчёта) подготовлена журнальная публикация о поиске новых резонансов, распадающихся на W, Z и Хиггс бозоны в pp-взаимодействиях на установке АТЛАС [20].

Работы пятого этапа выполнены в полном соответствии с техническим заданием и планом графиком работ по соглашению, что позволит продолжить работы, запланированные сотрудничеством АТЛАС в рамках первой и второй фаз модернизации установки.

Эффект от использования разработок в установке АТЛАС может быть надёжно оценен после первых нескольких месяцев её работы на пучках модернизированного БАК.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 ATLAS New Small Wheel Technical Design Report. CERN-LHCC-2013-006, ATLAS-TDR-20-2013, June, 2013.
- 2 М.Ю.Боголюбский, А.Н.Исаев, А.С.Кожин и др. Система сбора данных и управления в стандарте электроники МИСС для детектора на дрейфовых трубках. Приборы и техника эксперимента, 2013, №2, ISSN 0032-8162, с.39-48.
- 3 M. Bulavin, et al., Irradiation Facility at the IBR-2 Reactor for Investigating Material Radiation Hardness, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 343 (2015) 26–29
- 4 E. Shabalin et al., Spectrum and Density of Neutron Flux in the Irradiation Beam Line No. 3 of the IBR-2 Reactor, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 336–343.
- 5 А.Чеплаков, Постерный доклад на конференции «Физика на LHC» (LHCP 2015), Санкт-Петербург, 31 августа - 5 сентября 2015 г.
- 6 Teterin P E et al. Development of scanning technique for sTGC detector production quality control. J. Phys.: Conf. Series 675 (012015) (2016)
- 7 Filippov K A et al. Gas mixtures for quality control of the sTGC chambers. J. Phys.: Conf. Series 675 (012024) (2016)
- 8 Tikhomirov V O et al. Visualization tool for X-ray scanner for sTGC detector production quality control. J. Phys.: Conf. Series 675 (012018) (2016)
- 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, JHEP01 (2016) 032.
- 10 ATLAS Collaboration, Search for a high-mass Higgs boson decaying to a pair of W bosons in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2016-021, April 2016.
- 11 ATLAS Collaboration, Search for a high-mass Higgs boson decaying to a pair of W bosons in pp collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2016-074, August 2016.
- 12 ATLAS Collaboration, Search for an additional, heavy Higgs boson in the  $H \rightarrow ZZ$  decay channel at 8 TeV in pp collision data with the ATLAS detector, EPJC 76 (2016) 45.
- 13 ATLAS Collaboration, Search for diboson resonance production in the  $\ell\nu qq$  final state using pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector at the LHC, ATLAS-CONF-2016-062, August 2016.
- 14 ATLAS Collaboration, Search for an additional, heavy Higgs boson in the  $H \rightarrow ZZ$  decay



- channel at 8 TeV in pp collision data with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2016-074, August 2016.
- 15 ATLAS Collaboration, Search for new phenomena in the  $Z(\rightarrow \ell\ell) + E_{T\text{miss}}$  final state at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2016-056, August 2016.
  - 16 ATLAS Collaboration, Searches for heavy ZZ and ZW resonances in the  $\ell\ell qq$  and  $\nu\bar{\nu} qq$  final states in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2016-082, August 2016.
  - 17 ATLAS Collaboration, Search for new resonances decaying to a Z boson and a photon in  $13.3 \text{ fb}^{-1}$  of pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2016-044, August 2016.
  - 18 Солдатов Е.Ю., «Ассоциированное рождение Z бозона с фотоном в протон-протонных столкновениях в эксперименте ATLAS», кандидатская диссертация, <http://ods.mephi.ru/announcements?ds=7>
  - 19 Маевский А.С., «Прецизионные измерения характеристик B(s)-мезонов и их распадов в эксперименте ATLAS», кандидатская диссертация, <http://sinp.msu.ru/ru/dissertation/25350>
  - 20 Search for new resonances decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the  $\ell+\ell-b\bar{b}$ ,  $\ell\nu b\bar{b}$ , and  $\nu\bar{\nu} b\bar{b}$  channels with pp collisions at  $\sqrt{s}=13\text{TeV}$  with the ATLAS detector, Physics Letters B765(2017)32–52

г. Гатчина

25 ноября 2016 г.

**АКТ**  
изготовления однослойных  
экспериментальных образцов ТЗК

Соглашение с Минобрнауки России  
от «20.10.2014 г.» № 14.610.21.0005

Комиссия в составе:

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

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

**1. Комиссии предъявлено:**

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

**2. В результате проверки установлено:**

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

**3. Вывод**

Пять собранных лабораторных образца ТЗК камер удовлетворяют требованиям, предъявляемым при проведения испытания лабораторных образцов тонкозачерненных камер и пригодны для проведения дальнейших испытаний.

Председатель



О. Л. Федин

члены комиссии



В. П. Малеев



С. К. Патричев



А. Т. Сулейманов.

## Протокол №2

испытаний экспериментальных образцов тонкозольных камер с помощью  
высоковольтного и рентгеновского стенов

г. Гатчина

25 ноября 2016 г.

1. Объект испытания: экспериментальные образцы однослойных тонкозольных камер для передней части мюонного спектрометра эксперимента АТЛАС в количестве 5 шт.
2. Цель испытания: проверка параметров объектов испытания на соответствие техническим требованиям по программам и методике испытаний тонкозольных камер.
3. Дата начала испытания: 3 октября 2016 г.
4. Дата окончания испытания: 25 ноября 2016 г.
5. Место проведения испытания: лаборатория адронной физики ОФВЭ ПИЯФ.
6. Средства проведения испытаний: стенд для высоковольтных испытаний ТЗК камер, рентгеновский стенд для измерения тока ТЗК камер во время облучения, микрометр, поверочная линейка,
7. Результаты испытаний

| Номер образца | Исследуемый параметр   | Требования к параметру |  | Измеренное значение   |
|---------------|--|------------------------|--|---|
|               |  | Номинальное значение   | Предельное значение                                      |   |
| 1             | Измерение плоскостности ТЗК камеры в 120 точках по ее поверхности с каждой стороны | 5,9±0,1 мм             | RMS<80 мкм<br>Единичное максимальное отклонение <300 мкм | 5,97±0,05 мм<br>RMS=78 мкм<br>Единичное максимальное отклонение 250 мкм |
| 2             |  |                        |  | 5,92±0,05 мм<br>RMS=76 мкм<br>Единичное максимальное отклонение 280 мкм |

|   |   |  |             |  |
|---|---|--|-------------|--|
| 3 |   |  |             | 5,82±0,07 мм<br>RMS=72 мкм<br>Единичное<br>максимальное<br>отклонение 290<br>мкм |
| 4 |   |  |             | 5,88±0,09 мм<br>RMS=79 мкм<br>Единичное<br>максимальное<br>отклонение 270<br>мкм |
| 5 |   |  |             | 5,96±0,05 мм<br>RMS=76 мкм<br>Единичное<br>максимальное<br>отклонение 288<br>мкм |
| 1 | Долговременные (7<br>дней)<br>высоковольтные<br>испытания ТЗК<br>камеры под<br>напряжением 3,3 кВ | Отсутствие в<br>течении<br>периода<br>испытаний<br>пробоев и<br>превышения<br>тока | Отсутствует | Высоковольтные<br>пробои<br>отсутствуют,<br>темновой ток не<br>превышает 60 нА.  |
| 2 |   |  |             | Высоковольтные<br>пробои<br>отсутствуют,<br>темновой ток не<br>превышает 80 нА   |
| 3 |   |  |             | Высоковольтные<br>пробои<br>отсутствуют,<br>темновой ток не<br>превышает 90 нА   |
| 4 |   |  |             | Высоковольтные<br>пробои<br>отсутствуют,<br>темновой ток не<br>превышает 70 нА   |
| 4 |   |  |             | Высоковольтные<br>пробои<br>отсутствуют,<br>темновой ток не<br>превышает 60 нА   |

|   |  |       |        |   |
|---|--|-------|--------|---|
| 1 | Измерение тока ТЗК камеры при сканировании ее поверхности узким рентгеновским пучком | 10 нА | 100 нА | Максимальное измеренное значение тока 51 нА |
| 2 |  |       |        | Максимальное измеренное значение тока 95 нА |
| 3 |  |       |        | Максимальное измеренное значение тока 32 нА |
| 4 |  |       |        | Максимальное измеренное значение тока 23 нА |
| 5 |  |       |        | Максимальное измеренное значение тока 76 нА |

8. Выводы:

Объекты испытаний прошли испытания в соответствии с п. 4.1 и 4.2 программы и методики испытаний АТЛАС.МЮОН.ТЗК.ПМ и пункта 4.1 программы и методики испытаний АТЛАС.МЮОН.ТЗК.ПМ.РС

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

Испытания проводили:

Зав. лабораторией адронной физики



О. Л. Федин

научный сотрудник



В. П. Малеев

инженер



А. Т. Сулейманов

Протокол №1  
испытаний экспериментального образца (макета)  
миникалориметра спектрометра АТЛАС в пучке протонов  
на ускорителе У-70 ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

г. Протвино

30 ноября 2016 г.

1. Объект испытаний: экспериментальный образец (макет) миникалориметра спектрометра АТЛАС.
2. Цель испытаний: проверка соответствия характеристик макета миникалориметра требованиям к работе миникалориметра спектрометра АТЛАС в условиях повышенной светимости коллайдера LHC.
3. Дата начала испытания: 15 ноября 2016 г.
4. Дата окончания испытания: 22 ноября 2016 г.
5. Место проведения испытания: канал № 23 ускорителя У-70 ФГБУ ГНЦ ИФВЭ.
6. Средства проведения испытаний: пучок протонов с энергией 50 ГэВ, сцинтилляционные счётчики, годоскопы и камера вторичной эмиссии для мониторинга и измерения положения пучка протонов, криостат с жидким аргоном, система криогенного обеспечения испытаний и электроника регистрации сигналов с макета.
7. Результаты испытаний:
  - изменение амплитуды ионизационного сигнала макета миникалориметра с зазором между электродами 119 мкм, связанное с образованием пространственного заряда ионами аргона, не превысило 10% при интенсивности протонного пучка, соответствующей светимости sLHC;
  - изменение амплитуды ионизационного сигнала макета миникалориметра после трёх суток облучения пучком протонов с максимальной интенсивностью  $10^{11}$  протонов/с не превысило 6%.
8. Выводы:
  - 8.1 Макет миникалориметра прошёл испытания в соответствии с п.3.5 программы и методики испытаний.
  - 8.2 Как по своим физическим характеристикам, так и по радиационной стойкости передний жидкоаргоновый миникалориметр предложенной конструкции с зазором между

электродами 119 мкм удовлетворяет требованиям технического задания и пригоден для проведения экспериментов на установке АТЛАС при повышенной светимости коллайдера LHC (sLHC).

Испытания проводили:

Главный научный сотрудник



С.П.Денисов

Ведущий научный сотрудник



А.В.Козелов

Старший научный сотрудник



А.А.Щукин

## ПРОТОКОЛ

испытаний оптических свойств облучённых  
образцов сцинтилляторов для горячих зон

№ 1

21 октября 2016 г.

1. **Объекты испытаний:** образцы сцинтилляторов UPS 923D, облучённые разными дозами нейтронов (S1, S2 и S3) на установке ИБР2 ОИЯИ, S0- контрольный (необлученный) образец.
2. **Цель испытания:** Соответствие объектов испытаний техническим требованиям.
3. **Дата начала испытаний:** 26 сентября 2016 г.
4. **Дата окончания испытаний:** 20 октября 2016 г.
5. **Место проведения испытаний:** ЛЯП ОИЯИ, корпус 36, комната 019.
6. **Средства проведения испытаний:** электроника в стандартах КАМАК и NIM, ФЭУ, спектрофотометр SolidSpec-3700 DUV, пикоамперметр Keithley 6487.
7. **Результаты испытаний:**

| Номер образца, суммарный поток нейтронов/см <sup>2</sup> | Исследуемый параметр  | Номера пунктов      |                    | Требования к параметру |            | Измеренное значение |
|--|---|---------------------|--------------------|------------------------|------------|---------------------|
|  |   | Программы испытаний | Методики испытаний | Номинальное            | Предельное |                     |
| S1, $1.8 \cdot 10^{14}$                                  | Изменение прозрачности облученного образца по отношению к контрольному (необлученному) в диапазоне 400-550 нм | 3.1                 | 5.1                | 0%                     | 10%        | ~ 10%               |
| S2, $1.7 \cdot 10^{13}$                                  |   |                     |                    |                        |            | 1-2%                |
| S3, $3.8 \cdot 10^{12}$                                  |   |                     |                    |                        |            | 1-2%                |
| S0, 0  |   |                     |                    |                        |            | 0%                  |
| S1, $1.8 \cdot 10^{14}$                                  | Изменение световыхода облученного образца по отношению к контрольному   | 3.2                 | 5.2                | 0%                     | 25%        | 28%                 |
| S2, $1.7 \cdot 10^{13}$                                  |   |                     |                    |                        |            | 10%                 |
| S3, $3.8 \cdot 10^{12}$                                  |   |                     |                    |                        |            | 2%                  |
| S0, 0  |   |                     |                    |                        |            | 0%                  |

8. **Выводы:**

8.1 Объекты испытаний – облучённые образцы сцинтилляторов S2 и S3 прошли испытание по пунктам 3.1 и 3.2 программы испытаний. Объект испытаний, образец S1 не



прошел испытания по пунктам 3.1 и 3.2 программы испытаний и не соответствует техническим требованиям.

8.2 Объекты испытаний – образцы S2 и S3 соответствуют техническим требованиям, предъявляемым ТЗ к образцам сцинтилляторов для горячих зон установки АТЛАС. Таким образом, допустимый поток нейтронов для сцинтилляторов для горячих зон не должен превышать  $10^{14}$  н/см<sup>2</sup>.

**Испытания проводили:**

Начальник сектора



А.М.Артиков

Научный сотрудник



А.В.Симоненко

Инженер



В.Ю.Баранов

## ПРОТОКОЛ

радиационных испытаний новой электроники ЖАК и сцинтилляционного калориметра.

14 октября 2016 г.

- 1. Объекты испытания:** новая электроника сцинтилляционного калориметра: основная (Main Board) и дочерняя (Daughter Board) платы, располагающиеся в модулях калориметра (on-detector) и плата предусилителя ЖАК.
- 2. Цель испытания:** проверка соответствия объектов испытания техническим требованиям после облучения.
- 3. Дата начала испытания:** 19 сентября 2016 г.
- 4. Дата окончания испытания:** 13 октября 2016 г.
- 5. Место проведения испытания:** ЦЕРН, тестовая установка в корпусе 175.
- 6. Средства проведения испытаний:** тестовый модуль калориметра, электроника съема информации, прототип системы сбора данных, источники высоковольтного и низковольтного питания, генераторы.
- 7. Результаты испытания**

| Номер образца, Название платы | Исследуемый параметр                         | Номера пунктов      |                    | Требования к параметру                                       | Измеренное значение                               |
|-------------------------------|--|---------------------|--------------------|--|---|
|                               |  | Программы испытаний | Методики испытаний |  |   |
| 1, Основная плата             | Функциональность платы                       | 3.1                 | 5.1                | Необходимо сохранение функциональности платы после облучения | Сохранена полная функциональность платы           |
| 2, Дочерняя плата             | Частота однобитных восстанавливаемых ошибок  | 3.2                 | 5.2                | < 10 однобитных восстанавливаемых ошибок в день              | ~ 4,5 однобитных восстанавливаемых ошибок в день  |
|                               | Частота двух-битных восстанавливаемых ошибок | 3.3                 | 5.3                | < 1 двух-битной восстанавливаемой ошибки в день              | ~ 0.2 двух-битных восстанавливаемых ошибок в день |

Толщина (в мм) платы ЖАК в 6-ти контрольных точках

| Контрольная точка | Плата 1      |                 | Плата 2      |                 |
|-------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
|                   | До облучения | После облучения | До облучения | После облучения |
| GC20              | 2,25         | 2,25            | 2,26         | 2,26            |
| GC24              | 2,22         | 2,21            | 2,26         | 2,26            |
| GC27              | 2,24         | 2,25            | 2,25         | 2,24            |
| GC35              | 2,30         | 2,31            | 2,31         | 2,31            |
| GC39              | 2,31         | 2,31            | 2,33         | 2,32            |
| GC42              | 2,30         | 2,30            | 2,30         | 2,30            |

Измерения 208 соединительных линий плат

показали, что как до, так и после облучения они имели сопротивления меньше 10 МОм.

Механических повреждений на платах не обнаружено.

## 8. Выводы

8.1 Объект испытаний новая электроника сцинтилляционного калориметра (Основная и Дочерняя платы) прошли испытания по пунктам 3.1, 3.2, 3.3 Программы испытаний.

8.2 Объекты испытаний Основная и Дочерняя платы соответствует техническим требованиям, предъявляемым к новой электронике сцинтилляционного калориметра установки АТЛАС, и могут быть использованы в модернизированном детекторе.

8.3 Объект испытания плата предусилителя ЖАК прошли испытания по пунктам 3.4 и 3.5 Программы испытаний и могут быть использованы в модернизированном детекторе АТЛАС

### Испытания проводили

Начальник группы

Старший инженер

Инженер



*В.В.Терещенко*

*А.Н.Шалюгин*

*Н.В.Антонов*

**ПРОТОКОЛ**

испытания партии специализированных оптических кабелей для модернизированной электроники жидкоаргонового калориметра детектора АТЛАС  
№ 1 от 30 ноября 2016 г.

**1. Объект испытания:** пробные оптические кабели (патч-корды) в составе:

- патч-корды MTP-10 LC – 160 штук;
- патч-корды MTP-8 LC – 40 штук.

**2. Цель испытания:** проверка параметров объектов испытания на соответствие техническим требованиям по программе и методике стендовых испытаний от 21 ноября 2015 г.

**3. Дата начала испытания:** 21 ноября 2016 г.

**4. Дата окончания испытания:** 29 ноября 2016 г.

**5. Место проведения испытания:** Лаборатория электронов высоких энергий, ФИАН, Москва.

**6. Средства проведения испытаний**

Оптический рефлектометр MTP 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. Результаты измерений вносимых потерь по каждому оптическому волокну каждого патч-корда хранятся в виде сводных таблиц и рефлектограмм в формате SOR в базе данных контроля качества.

**8. Замечания и рекомендации**

Замечаний и рекомендаций нет.

**9. Выводы**

9.1 Специализированные оптические кабели (патч-корды) выдержали испытание.

9.2 Специализированные оптические кабели (патч-корды) соответствуют предъявленным техническим требованиям.

**Испытание проводили**

Старший научный сотрудник

Ведущий инженер

Инженер 2-ой категории



А.В. Багуля

В.А. Кондратюк

А.Е. Колбасин

**ПРОТОКОЛ**

испытаний новой электроники считывания сцинтилляционного калориметра  
в составе установки

10 октября 2016 г.

1. **Объект испытания:** новая электроника сцинтилляционного калориметра.
2. **Цель испытания:** проверка соответствия объекта испытания техническим требованиям.
3. **Дата начала испытания:** 21 сентября 2016 г.
4. **Дата окончания испытания:** 4 октября 2016 г.
5. **Место проведения испытания:** ЦЕРН, ускоритель SPS, канал Т4-Н8.
6. **Средства проведения испытаний:** тестовая установка в канале Т4-Н8.
7. **Результаты испытания:**

| Номер образца | Исследуемый параметр                       | Номера пунктов      |                    | Требования к параметру                                 | Измеренное значение   |
|---------------|--|---------------------|--------------------|--|---|
|               |  | Программы испытаний | Методики испытаний |  |   |
| 1             | Совместимость новой и старой электроники   | 3.1                 | 5.1                | Необходима совместимость со старой электроникой        | Полная совместимость  |
|               | Быстродействие новой электроники           | 3.2                 | 5.2                | > 40 МГц   | > 40 МГц  |
|               | Восстановление энергии и разделение частиц | 3.3                 | 5.3                | Возможность восстановления энергии и разделения частиц | Показана возможность восстановления энергии и разделения частиц |

**8. Выводы**

8.1 Объект испытаний новая электроника сцинтилляционного калориметра прошла испытания по пунктам №3.1, 3.2 и 3.3 Программы испытаний.

8.2 Объект испытаний соответствует техническим требованиям, предъявляемым к новой электронике сцинтилляционного калориметра установки АТЛАС, техническому заданию и готов к дальнейшему развитию и тиражированию.

## Испытания проводили

*Начальник группы*



*V.V.Терещенко*

*Старший инженер*



*A.N.Шалюгин*

*Инженер*



*N.V.Антонов*