

K-339

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-2007-134

На правах рукописи

УДК 539.1.074

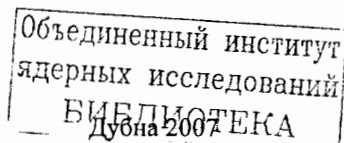
КЕКЕЛИДЗЕ
Георгий Дмитриевич



СОЗДАНИЕ ДЕТЕКТОРА
ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — ТРЕКЕРА «В»-ТИПА
ДЛЯ УСТАНОВКИ АТЛАС
БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА

Специальность: 01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Пешехонов Владимир Дмитриевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Долгошеин Борис Анатольевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Топурия Тенгиз Петрович

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики
Московского государственного университета, Москва.

Защита диссертации состоится “ ” 2007 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.05 в Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛФЧ ОИЯИ.

Автореферат разослан “ ” 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кривохижин Василий Геннадиевич

Актуальность

Предназначенная для экспериментов на ускорителе ЛНС (Большой адронный коллайдер) установка АТЛАС содержит несколько крупных детектирующих систем, в том числе Внутренний Детектор (ВД), работающий в условиях экстремально высокой загрузки. В состав ВД входит трекер на основе кремниевых детекторов и детектор переходного излучения - трекер (TRT) на основе тонкостенных дрейфовых трубок (строу). Разработанные совместно с коллаборацией, модули TRT прямого и обратного направлений (end-cup) изготавливались затем в ЛФЧ ОИЯИ (тип «В») и ПИЯФ (тип «А»). Число дрейфовых трубок в TRT ATLAS составляет 298 304.

Требования высокой эффективности восстановления треков заряженных частиц и разделения электронов от пионов с фактором режекции около 100 в условиях больших нагрузок определили основные требования к TRT:

- точность позиционирования каждой строу в пространстве не хуже 50 мкм;
- собственное пространственное разрешение строу не хуже 150 мкм;
- однородность параметров всех детектирующих каналов не хуже $\pm 5\%$;
- минимальная величина потерь рабочего газа на основе Хе.

В процессе исследований были изучены свойства как самих строу, так и материалов, применяемых для изготовления отдельных элементов детектора. Были разработаны также методы тестирования детекторов в процессе сборки, использованные при создании высококачественных детекторов типа «В» и пригодные для использования при создании подобных детекторов на основе строу.

Цель диссертационной работы

Разработка и создание технологии изготовления и тестирования модулей детектора переходного излучения – трекера, ее применение для создания модулей детектора типа - «В» с полным количеством каналов регистрации (строу) – 104448, а также, связанное с этим, исследование материалов для детекторов, работающих в условиях высоких нагрузок.

Научная новизна работы

- Разработаны методы тестирования детекторов переходного излучения-трекеров на всех этапах их создания, в частности:
 - разработан метод проверки прямолинейности строу, основанный на анализе формы светового пятна, образованного проходящим через него параллельным пучком света.
 - разработана и создана автоматизированная система контроля качества установки строу, обеспечивающая проверку прямолинейности строу, отсутствия замыкания между рамами детектора и строу, а также – соседних строу между собой.
 - разработан и создан прибор для контроля максимально допустимой

толщины пленочных радиаторов, подготовленных к установке в детектор.

• Исследована радиационная стойкость органических материалов, используемых при создании координатных детекторов, в частности полисульфона и поликарбоната, а также отечественных эпоксидных клеев-компанудов ЭЛК-5 и ЦМК-5.

Практическая ценность работы

1. На основе отработанной технологии был создан детектор переходного излучения - трекер типа «В» на основе строу для внутреннего детектора установки АТЛАС Большого адронного коллайдера.
2. Результаты исследования полимеров и клеев показали слабую зависимость механических свойств от поглощенной дозы, что позволило не только использовать их при изготовлении детекторов в рамках проекта ЛНС, но и указало на возможность их применения в других проектах, например, для изготовления детекторов по проекту ИЛС.
3. Разработанный метод проверки прямолинейности строу, также как и методы поэтапного тестирования создаваемых детекторов и их элементов, обеспечивают возможность оперативного устранения дефектов, способных негативно влиять на работу детектора и способствуют тем самым более качественной сборке детекторов.
4. Разработана технология сборки и тестирования модулей TRT типа «В», которая частично может быть использована при создании подобных детекторов на основе строу.
5. Результаты тестирования детекторов показали соответствие созданного детектора требуемым параметрам для эксперимента АТЛАС.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на рабочих совещаниях коллаборации АТЛАС, семинарах Лаборатории физики частиц и опубликованы в работах [1÷6].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, а также основных результатов и выводов. Диссертация содержит 103 страницы, включая 63 рисунка, 9 таблиц и список цитируемой литературы из 33 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненных исследований, сформулирована цель диссертационной работы, показана научная новизна работы и описана структура диссертации.

Первая глава содержит описание многопроволочных газонаполненных детекторов, применяемых в ускорительных экспериментах в радиационных полях высокой интенсивности для определения траектории частиц. Такими детекторами являются многопроволочные пропорциональные и дрейфовые камеры. Эти координатные детекторы часто используются и как детекторы переходного излучения для идентификации заряженных частиц большой энергии по переходному излучению, испускаемому ими при пересечении границ раздела сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Для организации необходимого числа таких границ перед детекторами размещают радиаторы переходного излучения, содержащие большое число тонких пленок.

Многопроволочная пропорциональная камера регистрирует координаты частицы с точностью $\sigma = \pm s/\sqrt{12}$, где s - расстояние между соседними анодными проволочками. Типичная величина пространственного разрешения МПК ~ 700 мкм.

Пространственное разрешение дрейфовой камеры обычно около 200 мкм. Частным случаем дрейфовой камеры являются детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок (строу) [1]. Детекторы состоят из набора строу, анодами которых являются обычно проволоки диаметром 20-30 мкм, а катодом является проводящее покрытие внутренней поверхности стенки трубок. Эти детекторы имеют следующие преимущества по сравнению с обычными дрейфовыми камерами:

- пространственное разрешение ~ 150 мкм;
- собственное быстродействие может достигать величины $\sim 10^7$ 1/с;
- малая радиационная толщина детектора;
- цилиндрическая геометрия каналов регистрации обеспечивает высокую однородность электрического поля и оптимальный временной сбор первых электронов, дрейфующих к анодам;
- достаточно простая конструкция камер позволяет их унифицировать и широко использовать промышленные возможности для изготовления целого ряда элементов детекторов;
- высокая эксплуатационная надежность детектора, связанная с его дискретностью;

Вторая глава содержит описание конструкции координатного детектора/детектора переходного излучения (TRT АТЛАС) на основе тонкостенных дрейфовых трубок. Особенностью работы детектора является экстремально высокая его загрузка и отсутствие доступа к детектору в течение всего времени жизни установки, что накладывает жесткие требования на технологичность его создания.

Детектор переходного излучения - трекер на основе строу представляет собой набор из 320 плоскостей строу с расположенными перед ними радиаторами переходного излучения. В состав детектора входят восемь модулей типа «В» прямого направления, состоящие из 64 строу - плоскостей, и 8-мь модулей обратного направления, также состоящие из 64 плоскостей.

С целью уменьшения габаритных размеров и уменьшения количества вещества вне чувствительной площади детектора была принята "кольцевая" конструкция модулей end-cap TRT. Каждый модуль состоит из двух идентичных субмодулей, собираемых отдельно. Четыре слоя строу устанавливаются в отверстия двух (внутреннее и наружное) углепластиковых колец, образуя самоподдерживающую конструкцию типа "колеса" - субмодуль. Диаметры колец 1268,2 мм и 2006,3 мм, соответственно. Между слоями строу устанавливаются радиаторы переходного излучения. Строу каждого слоя установлены по радиусу колеса с заданным угловым интервалом между ними и смещены относительно строу соседнего слоя на $3/8$ интервала, что обеспечивает полное перекрытие чувствительной площади детектором из 8-и модулей с 64-я слоями строу. Около внутреннего и внешнего несущих углепластиковых колец, путем установки третьего углепластикового кольца диаметром 2058,3 мм, материнских плат считывания информации, а также дополнительных каптоновых и стеклотекстолитовых сборочных элементов, создаются герметичные газовые объемы, соединенные с внутренним газовым объемом строу. В дальнейшем два четырехслойных субмодуля объединяются в модуль. Внешний вид восьмислойного модуля без экранов показан на рис. 1.

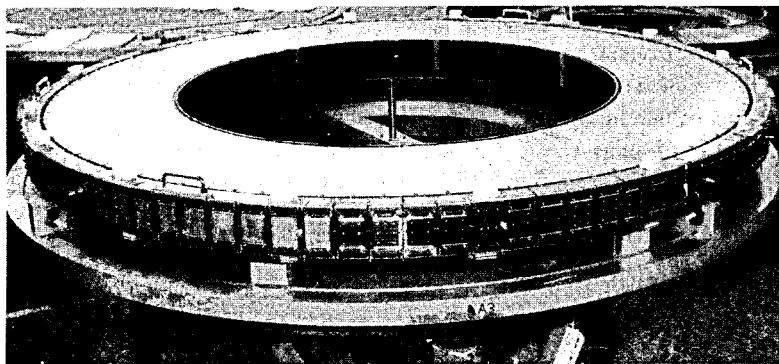


Рис. 1. Внешний вид восьмислойного модуля TRT без металлизированных экранов

В детекторе используются полиимидные строу с внутренним диаметром $4,00^{+0,02}$ мм. Внутренняя и наружная поверхности строу содержат проводящее графитовое покрытие.

Одними из основных элементов субмодуля являются радиаторы переходного излучения, состоящие из слоев полипропиленовой пленки толщиной 15 мкм. Для организации фиксированного зазора между слоями радиатора расположены сетки из ортогональных полипропиленовых нитей диаметром 100 мкм и с ячейками 8×8 мм.

Для прецизионной установки анодных проволок в строу используются пластиковые втулки (end-plugs). Толщина стенок втулок составляет $0,2 \pm 0,02$ ÷

$0,3 \pm 0,03$ мм, что обеспечивает требуемые соосности анода с внутренним диаметром строу.

Для обеспечения необходимой радиационной стойкости детектора были исследованы свойства всех материалов, используемых для его изготовления, в том числе механические свойства полисульфона и поликарбоната [2], а также отечественных эпоксидных клеев (ЭЛК-5, ЦМК-5) [3] от величины радиационной дозы.

На импульсном реакторе ОИЯИ ИБР-2 проводились облучения образцов потоком быстрых нейтронов до $10^{10} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с энергией выше 100 кэВ на площади $20 \times 40 \text{ см}^2$. Для оценки суммарной поглощенной дозы использовался биологический эквивалент.

Для определения предельной, предельно допустимой нагрузки и твердости по Бринеллю в зависимости от поглощенной дозы, 7 групп образцов полисульфона и поликарбоната в виде наборов пластинок подвергались облучению на реакторе. Полное время облучения составляло 300 ч и содержало 7 циклов. После каждого цикла образцы соответствующей группы вынимались из активной зоны и проводилось исследование их механических свойств. Поглощенная за все время облучения γ -доза составляла 536 кГр, а сопутствующая ей доза, обусловленная быстрыми нейтронами, составляла 474 кГр.

По величине прогиба образца под действием приложенной к его центру силы определялась предельная нагрузка F_{max} и предельно допустимая нагрузка F , равная $0,6 F_{\text{max}}$. Результаты для полисульфона и поликарбоната приведены на рис. 2.

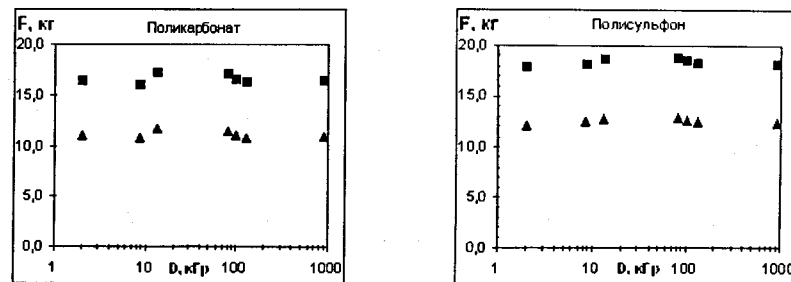


Рис 2. Зависимость предельной (■) и предельно допустимой (▲) нагрузок от величины поглощенной дозы.

Зависимости твердости образцов по Бринеллю от поглощенной дозы представлены на рис. 3.

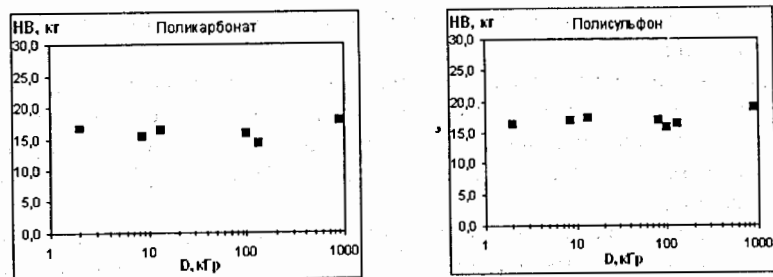


Рис. 3. Зависимость твердости по Бринеллю от величины поглощенной дозы.

Как видно из полученных зависимостей, полисульфон и поликарбонат практически сохраняют механические свойства после облучения: наблюдается небольшое увеличение предельных и предельно допустимых нагрузок при средних дозах и увеличение на 15 % твердости по Бринеллю при больших дозах. Контроль плотности образцов показал её незначительное увеличение (~ 0,25 %) при больших поглощенных дозах.

Разработанные в Институте неметаллов ОАО «НПО Композит» двухкомпонентные клеи типа ЭЛК-5 и ЦМК-5 обладают высокой текучестью и хорошей адгезией с майларовыми и полиимидными пленками, что представляет большой интерес.

Для определения относительного удлинения и предела прочности при растяжении, из вышеперечисленных клеев были приготовлены образцы в виде пленок толщиной 0,2 – 0,3 мм методом полива на фторопластовой подложке.

Результаты определения предела прочности для исследованных клеев приведены на рис. 4. Измерения показали слабую зависимость механических свойств исследованных эпоксидных клеев от поглощенной дозы до величины ~ 100 кГр.

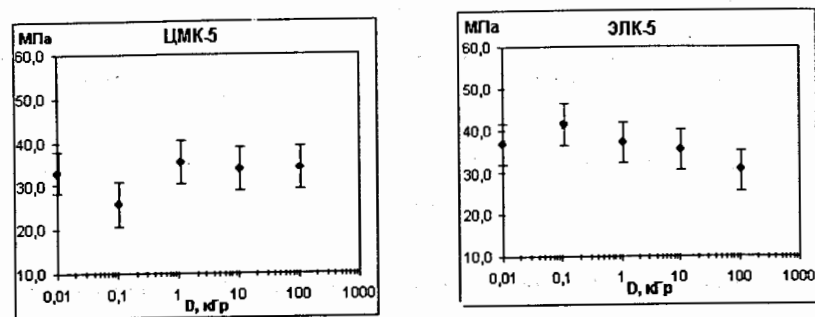


Рис. 4. Зависимость предела прочности при растяжении от величины поглощенной дозы для образцов клеев.

По результатам данных исследований коллаборацией TRT ATLAS было принято решение о применении поликарбоната для изготовления литевых пластиковых элементов детектора. Опытные партии трех типов тонкостенных поликарбонатных втулок в количестве 20 000 шт. каждого типа были изготовлены в России, как для отработки технологии производства высокоточных литевых изделий, так и для создания прототипов детектора в ОИЯИ и в ЦЕРНе.

Клеи ЭЛК-5 и ЦМК-5 в дальнейшем были также применены для создания строу-детекторов установок COMPASS и «Термализация».

В третьей главе описываются операции сборки детекторов [4].

Процедура сборки делилась на 4 основных этапа:

1. Армирование строу;
2. Подготовка строу к установке в рамы субмодуля;
3. Сборка четырехслойного субмодуля;
4. Сборка восьмислойного модуля.

1. Армирование строу предназначено для обеспечения механической стабильности, жесткости строу и уменьшения зависимости механических свойств строу от влажности. С этой целью на строу по всей длине наклеиваются четыре ребра жесткости, состоящие каждое из 1000 углеволоконных нитей диаметров 8 мкм, пропитанных эпоксидной смолой. Эта операция проводится с помощью специально разработанной пневмоэлектрической программно-управляемой машины для армирования строу.

В процессе работ было армировано 91993 длинных строу. Повреждено в процессе армирования было всего 573 строу. Таким образом, на выходе было получено 91420 готовых строу, что составляет 99,4 % от общего количества.

2. Подготовка строу к установке в рамы субмодуля состояла из следующих процедур:

- резка длинных строу на четыре коротких строу в размер с допуском;
- процедура гальванического объединения токопроводящих внешней и внутренней поверхностей строу на одном их конце;
- вклеивание в строу концевых элементов;
- финальная обрезка строу в размер с точностью ± 100 мкм.

Полный выход строу с участка составил 82,7 % от входящих, а с учетом строу, использованных для тестов, – 86,1 %.

3. Сборка четырехслойного субмодуля производилась на специальных металлических столах четырех типов, имеющих плоскостность менее 100 мкм,

и предназначенных для определенных операций каждый. Сборка submodule состояла из следующих процедур:

- приклеивание заземляющих проволочек к углепластиковым кольцам для обеспечения в дальнейшем равного электрического потенциала между ними и “земляной” шиной детектора;
- вклеивание строу в submodule и установка пленочных радиаторов между слоями строу;
- кольцевое приклеивание гибких плат считывания информации к торцу внешнего кольца;
- установка анодных проволочек в строу;
- создание двух внешних газовых герметичных объемов и электрическое объединение колец с “землей” плат считывания.

4. Сборка восьмислойного модуля содержала следующие процедуры:

- герметичное объединение газовых объемов submodule;
- установка элементов высоковольтного питания строу;
- установка элементов жидкостной системы охлаждения модуля;
- установка металлизированных экранов и элементов газового охлаждения модуля.

В четвертой главе описываются методы поэтапного тестирования создаваемых детекторов, разработанные и созданные для этого приборы, а также представлены результаты тестирования.

К детектору переходного излучения – трекеру предъявлялись жесткие требования:

- точность позиционирования каждой строу в пространстве не хуже 50 мкм;
- собственное пространственное разрешение строу не хуже 150 мкм;
- однородность параметров всех детектирующих каналов не хуже $\pm 5\%$;
- минимальная величина потерь рабочего газа на основе Хе.

Поэтому при создании детектора на всех этапах сборки проводились процедуры тестирования.

Для получения требуемого пространственного разрешения требовалось, чтобы кривизна строу в детекторе при длине 40 см не превышала 300 мкм. По этой причине, кривизна проверялась несколько раз на разных этапах сборки. Первая проверка проводилась после армирования строу, вторая – на участке подготовки строу к установке в детектор. Третья проверка проводилась после клейки строу в submodule.

Кривизна строу, устанавливаемых в End-cap, допустимая на участке армирования, не должна была превышать 8 мм (для строу длиной 165 см). Для баррельной части детектора TRT ATLAS требования по кривизне строу были более слабые, но их внешний диаметр не должен был превышать 4,2 мм.

Все армированные строу проверялись на кривизну, а требуемое для баррельного детектора количество строу - на внешний диаметр. Результаты работ по армированию приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты работ по армированию строу

Армировано	Всего	91993	100%	Результаты работ по армированию строу			
				Выход	91420	99.4%	< 3мм
Кривизна	Тест	91420	100%	< 3мм	3-4 мм	4-8 мм	> 8 мм
	Выход	91183	99.7%	47590	21604	2029	1691
Внешний диаметр	Тест	60731	66.6%	17524	21604	20298	1305
	Выход	60692	99.9%	17523	21603	20283	1283
Выход после тестов		91144	99.1%	47589	21603	20283	1669

На участке подготовки строу к установке в рамы submodule проводились следующие тесты:

- Проверка электрического сопротивления внутренней поверхности длинных строу.
Проверка электрического сопротивления поверхности строу проводилась перед их резкой, так как поверхность строу является катодом и ее токопроводящее покрытие не должно иметь разрывов. При этом сопротивление внутренней поверхности строу между ее концами не должно было превышать 480 Ом.
- Проверка наличия электрического контакта между внутренней и внешней проводящими поверхностями строу проводилась после гальванического объединения поверхностей и заключалась в измерении величины сопротивления между поверхностями строу в точках, наиболее удаленных от места объединения. Допустимым являлось сопротивление, не превышающее 10 кОм.
- Проверка на герметичность готовых строу производилась для максимально возможного уменьшения утечек рабочего газа из детектора. Допускались утечки в пределах 0,1 мбар/мин/бар на строу.
- Проверка готовых строу на кривизну и цилиндричность проводилась методом измерения смещения центральной оси строу в пяти равноудаленных позициях по длине строу. При этом, вертикально установленное строу вращалось вокруг своей оси. Перемещаемая вдоль строу цифровая камера фотографировала строу в семи равноудаленных друг от друга позициях. На каждой позиции вращающееся строу фотографировалось 36 раз. Годными признавались строу с кривизной менее 200 мкм, а строу с кривизной 200 – 300 мкм считались ограниченно годными.

Таблица 2. Результаты работ по подготовке строу

Процедура	Всего вошло	Брак	Использовано для тестов	Принято	Выход (%)
Проверка резистивности длинных строу	33301	20	1998	31283	93,9
Первый тест резистивности	124875	15	0	124860	100,0
Финальная обрезка строу	123724	201	64	123459	99,8
Второй тест резистивности	123459	205	2046	121208	98,2
Проверка на герметичность	121208	31	0	121177	100,0
Проверка на кривизну	121177	8046	466	112665	93,0
Визуальная инспекция	112665	2538	0	110127	97,7
Всего:		12423	4600	110127	82,7

На участке сборки детекторов проводились следующие тесты:

1. Для обеспечения требуемой точности установки строу в детектор (точность позиционирования каждой строу в пространстве не хуже 50 мкм) проводился входной контроль углепластиковых колец, состоящий из проверки высоты и толщины колец, диаметра отверстий в кольцах и их позиционирования, деформации кольца под собственным весом и под нагрузкой, а также визуальный контроль колец.

2. Для обеспечения заземления углепластиковых колец проводилась проверка качества контакта между углепластиковыми кольцами и заземляющими проволочками. Измерялось электрическое сопротивление между соседними проволоками, вклеенными в кольцо, которое не должно было превышать 0,2 Ом для внутреннего кольца субмодуля и 0,15 Ом для двух других.

3. Окончательная проверка прямолинейности строу проводилась после их вклейки в субмодуль. Эта проверка совмещалась с проверкой отсутствия электрического контакта между соседними строу в слое, а также между строу и кольцами. Метод наружного осмотра строу, аналогичный применяемому на участке подготовки строу, был не пригоден к использованию в данном случае. Наиболее универсальным и простым методом проверки строу являлось тестирование ПЗС-матрицей светового пятна от проходящего сквозь них пучка света. Этот метод исследовался в ОИЯИ и представлен в работе [5]. Световой поток от источника света формировался в параллельный пучок с расходимостью не более 0,2 мрад и проходил через тестируемое строу. Интегральное изображение этого строу, после прохождения фокусирующей линзы, проецировалось на ПЗС-матрицу. Метод позволял измерять деформацию строу с точностью до 200 мкм, давал возможность выявления

локальных дефектов на внутренней поверхности строу, а также возможность тестирования строу, установленных в субмодуль.

На основе этих исследований была разработана и изготовлена автоматизированная система проверки строу, состоящая из двух отдельных устройств с общей системой управления [6]. Структурная схема прибора приведена на рис. 5.

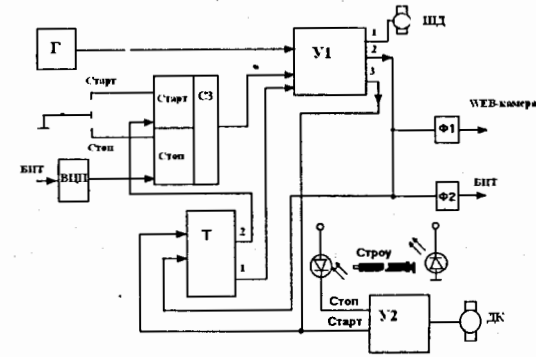


Рис. 5. Структурная схема блока управления: Г - тактовый генератор; У1 - устройство управления шагового двигателя; Т - таймер; У2 - устройство управления двигателя каретки; Ф1, Ф2 - формирователи импульсов; ВЦП - время-цифровой преобразователь; БИТ - блок измерения тока с высоковольтным источником; ШД - шаговый двигатель, ДК - двигатель каретки, СЗ - схема запуска.

Устанавливаемые в субмодуль строу с концевыми пластиковыми элементами имели внутренний диаметр 4,0 мм для одного конца и 1,8 мм для второго. Отражаемый от однородного экрана свет попадает через отверстие диаметром 1,8 мм в исследуемое строу с внутренним диаметром 4,00 мм. С противоположного конца строу установлена WEB-камера с дополнительной оптической системой, обеспечивающей глубину резкости не менее ± 5 см относительно центра строу. WEB - камера фиксирует и передает в компьютер световое изображение в виде набора концентричных колец, степень искажения которых характеризует меру кривизны строу. Полученные изображения просматриваются оператором. Каждое из них сравнивается с контрольными изображениями от строу, имеющих различную кривизну с шагом в 50 мкм в диапазоне от 0 до 300 мкм.

Одновременно с записью в базу данных изображения проверяемой на прямолинейность строу, проводилась проверка отсутствия резистивного контакта другой строу проверяемого слоя с ее соседними и с углепластиковыми кольцами. С помощью шагового двигателя обеспечивалось подключение контактов к трем соседним строу, вклеенным в собираемый субмодуль (Рис. 6). При этом на поверхность центральной строу подавалось напряжение 1 кВ, соседние - находились под потенциалом "земли".

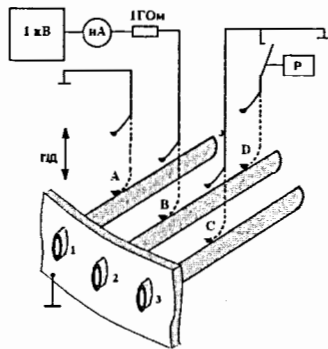


Рис. 6. Схема подключения измерительных контактов к строю для измерения тока между ним: 1, 2, 3 – строю; А, В, С, D – пружинные контакты; Р – реле.

4. Контроль максимально допустимой толщины пленочных радиаторов был необходим, так как натянутые радиаторы могли создавать волны, изгибая вклеенные в submodule строю. Толщина радиаторов не должна была превышать $5 \div 6$ мм. Для измерения толщины радиаторов в ОИЯИ было изготовлено приспособление с набором находящихся под электрическим потенциалом проволок. Установленное на сборочном столе, над растянутым радиатором, устройство сигнализировало о несоответствии толщины радиатора нормам замыканием контактов проволоками, изогнутыми при наличии волн на радиаторе, или превышении его толщины другим образом.

5. Проверка герметичности детектора производилась измерением утечки газа из закрытого газового объема, заполненного аргоном под давлением, превышающим атмосферное на 20 мБар. Тест проводился три раза на разных этапах сборки. Величина утечки (мБар/мин/Бар) измерялась по уменьшению давления во времени и рассчитывалась согласно выражению (1):

$$\text{Течь} = \frac{P(t1) - P(t2)}{t1 - t2} \times \frac{1000}{P(t1) - P(\text{атм})} \quad (1)$$

где: $t1$ и $t2$ - время начала и окончания измерения (мин); $P(t1)$ и $P(t2)$ - давление (мБар) в газовом объеме за соответствующее время; $P(\text{атм})$ - атмосферное давление (мБар).

Результаты проведения последнего газового теста приведены на рис. 7. Как видно из рисунка, течь в среднем составляла 0,46 мБар/мин на Бар, что более чем вдвое лучше нормативного требования 1 мБар/мин на Бар.



Рис. 7. Газовые течи модулей по результатам финального газового теста

6. В детекторе для защиты от аварийных ситуаций на каждые 8 строю установлен один специальный высоковольтный предохранитель с собственным сопротивлением 91 кОм. Контролировалось величина сопротивления предохранителей в допустимых пределах 85 – 95 кОм. По результатам тестирования было заменено более 50 предохранителей.

7. Высоковольтные тесты проводились на трех этапах сборки submodule. Высокое напряжение подавалось на катоды submodule и доводилось до величин от 1800 до 2100 В в зависимости от этапа сборки, на котором проводился тест. Контролировались токи стекания между анодами и катодами детектора. Допустимыми считались “темновые” токи менее 50 нА для 32 подключенных одновременно строю.

8. Для обеспечения требуемого пространственного разрешения требовалось убедиться в том, что детектор не имеет провисших или перетянутых анодных проволочек. Проверка натяжения анодных проволочек производилась акустическим методом. Над submodule устанавливался динамик. На ячейку из 32 строю подавалось постоянное напряжение ~ 500 В. Под воздействием звуковых волн изменяющейся частоты определялась резонансная частота механических колебаний анодных проволочек. Допустимым являлось натяжение в пределах 55 – 80 г.

9. К габаритам модуля предъявлялись жесткие требования:

- высота модуля 114±0,4 мм;
- минимальный внутренний радиус колеса модуля R_{min} 623,75 мм;
- максимальный внешний радиус модуля 1044 мм

В связи с этим проверялись геометрические размеры восьмислойного модуля.

Для измерения габаритов использовались индикаторы часового типа, установленные на специальной вращающейся оси, укрепленной в центре сборочного стола. Два индикатора измеряли внутренний радиус модуля в

районе центров каждого из четырехслойных submodule, составляющих модуль. Два других измеряли толщину модуля в районе второго и третьего углепластиковых колец, а пятый – внешний радиус модуля. Типичные результаты измерений одного модуля приведены на рис. 8.

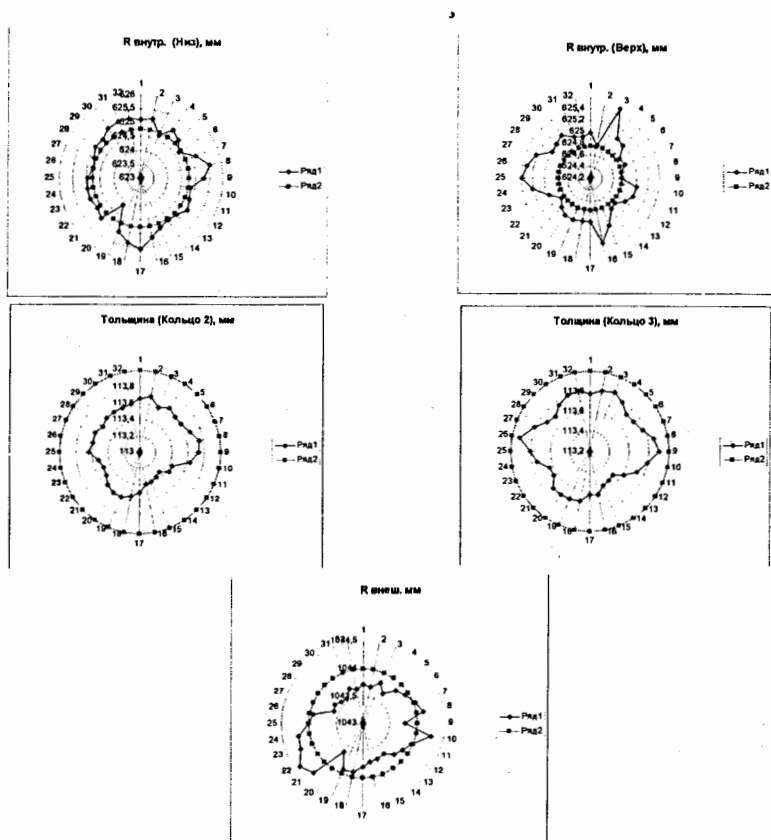


Рис. 8. Габаритные размеры модуля № 2.

10. Измерение веса submodule проводилось, чтобы в дальнейшем можно было рассчитать радиационную массу детектора. Четырехслойный submodule устанавливался на трех калиброванных подставках, расположенных на столе. Подставки поочередно заменялись электронными весами, имеющими точность измерения 0,1 г. Полученные веса суммировались. Распределение веса submodule приведено на диаграмме (Рис. 9). Как видно из рисунка, разброс веса submodule был в диапазоне от 13700 г. до 15000 г.

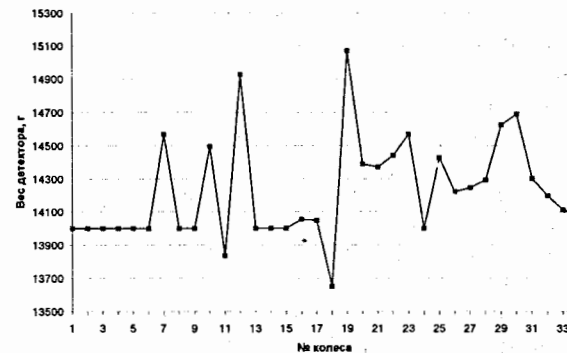


Рис. 9. Распределение веса submodule

11. Тестирование детектора с помощью радиоактивных источников. Для автоматизированного тестирования кольцевых модулей TRT был создан стенд, позволяющий набирать данные для каждой из 6144 строу восьмислойного модуля в 6 точках по их длине. Использовалась газовая смесь – Ag/CO_2 (70/30%). Модули детекторов облучались набором коллимированных источников Fe-55, расположенных на радиальных держателях в различной позиции по радиусу модуля для каждого. Держатели имели возможность вращаться. В зону облучения от каждого коллимированного источника попадало по 8 строу каждого слоя.

Результаты тестирования показали, что количество неработоспособных каналов составило 0,2 % от общего числа измеренных каналов (требование по спецификации – 1 %), а количество каналов с неоднородностью величины газового усиления более 9 % (что соответствует возможному изгибу строу более 300 мкм) было менее 0,4 %. Таким образом, результаты тестов показали высокое качество изготовленных в ЛФЧ ОИЯИ кольцевых модулей TRT ATLAS.

Основные результаты и выводы

1. Создан детектор переходного излучения - трекер типа «В» на основе тонкостенных дрейфовых трубок для внутреннего детектора установки ATLAS Большого адронного коллайдера. Созданный детектор является одной из наиболее важных систем установки ATLAS и содержит 17 восьмислойных модулей детектора (16 рабочих и один резервный) с общим числом дрейфовых трубок равным 104448. В настоящее время детектор полностью протестирован в ЦЕРНе, установлен в шахте эксперимента ATLAS и на нем ведется набор статистики от космических лучей. Результаты тестирования показали высокое качество кольцевых модулей детектора переходного излучения - трекера ATLAS. Количество неработоспособных каналов всего составляет 0,2 % от общего числа измеренных каналов, что существенно ниже требований по спецификации – 1%).

2. Для создания детектора разработана методика его производства, которая может быть применена в дальнейшем для создания новых проволочных детекторов разных типов.

3. По техническим требованиям Внутренний детектор установки АТЛАС должен работать в течение 10 лет, при этом максимальная доза облучения составит ~ 1000 кГр. Для обеспечения этих условий была исследована радиационная стойкость используемых при создании координатных детекторов органических материалов, в частности полисульфона и поликарбоната, а также эпоксидных клеев-компаундов ЭЛК-5 и ЦМК-5. Результаты измерений показали слабую зависимость механических свойств исследованных полимеров и клеев от поглощенной дозы, что позволило использовать их при изготовлении детекторов в рамках проектов LHC, COMPASS, «Термализация» и других.

4. Разработаны методы тестирования детекторов переходного излучения – трекеров на всех этапах их создания, в частности:

- разработан метод проверки прямолинейности строу, основанный на анализе формы светового пятна, образованного проходящим через него параллельным пучком света;
- разработана и создана автоматизированная система контроля качества установки строу, которая на этапе установки строу в детектор обеспечивает проверку прямолинейности строу, отсутствия замыкания между рамами детектора и строу, а также – соседних строу между собой. Применение системы обеспечивает возможность своевременного устранения дефектов, которые могут в дальнейшем повлиять на работу детектора;
- создан прибор для контроля максимально допустимой толщины пленочных радиаторов, подготовленных к установке в детектор.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Г.Д.Кекелидзе, В.Д.Пешехонов, Прецизионные трековые детекторы на основе тонкопленочных дрейфовых трубок (straw), Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2002, Т.33.
2. S.Nayviller, L.S.Almaeva, V.N.Bytchkov, V.V. Golikov, G.D.Kekelidze, S.P.Lobastov, V.I.Luchikov, V.D.Peshekhonorov, Radiation Hardness of Polysulphone and Polycarbonate Elements for LHC Detectors. ОИЯИ, E14-98-245, 1998 г, ATL-INDET-98-218.
3. С.Н.Гладких, В.В.Голиков, Г.Д.Кекелидзе, С.В.Мишин, В.Д.Пешехонов, Радиационная стойкость некоторых полимеров и эпоксидных клеев, ОИЯИ, P13-2001-275.
4. И.В.Богуславский, В.Н.Бычков, КС.Вирясов, Н.Григалашвили, Ю.В.Гусаков, Г.Д.Кекелидзе, В.Н.Круглов, К.А.Левтеров, В.М.Луценко, В.М.Лысан, С.В.Мишин, В.В.Мялковский, В.Д.Пешехонов, А.А.Савенков, Е.М.Хабарова. Изготовление детекторов переходного

- излучения – трекеров типа «В» в ОИЯИ для внутреннего детектора установки ATLAS LHC. Письма в ЭЧАЯ, 2006. № 3 [132], С 103 – 110.
5. Р.А.Астабатьян, Г.Д.Кекелидзе, С.П.Лобастов, В.Д.Пешехонов, А.В.Рябов, Л.М.Смирнов. Метод интегрального измерения прямолинейности тонкопленочных дрейфовых трубок. ОИЯИ, P13-98-270, 1998 г.
 6. А.О.Голунов, Н.С.Григалашвили, Ю.В.Гусаков, Г.Д.Кекелидзе, В.В.Ливинский, С.В.Муравьев, В.Д.Пешехонов, А.А.Савенков, Автоматизированная система контроля качества установки тонкостенных дрейфовых трубок в детектор TRT ATLAS Письма в ЭЧАЯ, 2003. № 2 [117].

Получено 12 сентября 2007 г.