

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2006-55

На правах рукописи
УДК 539.1.074

БЫЧКОВ
Виктор Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ
МИКРОСТРИПОВЫХ КАМЕР И ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР
НА ОСНОВЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОК**

Специальность: 01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2006

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
старший научный сотрудник

ВОДОПЬЯНОВ
Александр Сергеевич

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

ЗАЛИХАНОВ
Борис Жанакитович

Ведущее научно-исследовательское учреждение —
Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского
государственного университета, Москва.

Защита состоится “ _____ ” _____ 2006 г. на заседании
диссертационного совета Д 720.001.05 при Лаборатории физики частиц
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московская
область

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



КРИВОХИЖИН
Василий Геннадьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Существующие в настоящее время многочисленные методы регистрации частиц не являются универсальными. Чтобы сделать правильный выбор между различными методами, необходимо учитывать их практическую реализуемость, точность и ограничения применений в тех или иных условиях. Одним из наиболее востребованных методов в современной физике высоких энергий является метод регистрации частиц с помощью газонаполненных координатных детекторов – многопроволочных пропорциональных и дрейфовых камер. Несмотря на то, что эти камеры прекрасно зарекомендовали себя во многих физических экспериментах и стали фактически классикой при создании трекеров, их характеристики все чаще оказываются недостаточными для удовлетворения всех потребностей современных задач. Особый толчок в развитии новых типов газонаполненных детекторов для физики высоких энергий дало в конце 80-х годов прошлого столетия начало строительства новейших суперколлайдеров в Европе, США и Советском Союзе. Поиски решений для удовлетворения появившихся требований привели к появлению новых типов газонаполненных детекторов, таких как микростриповая газовая камера (MSGC), газовый электронный умножитель (GEM), детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок (стру).

Целью диссертационной работы являлась разработка и исследование новых типов газонаполненных координатных детекторов для современных экспериментов на ускорителях.

Научная новизна исследования

- Одной из первых в России была изготовлена и исследована микростриповая газовая камера.
- Произведены исследования механических и электрофизических характеристик новых элементов газонаполненных детекторов – тонкостенных дрейфовых трубок (ТДТ).
- Разработаны и исследованы прототипы 2-х типов камер на основе ТДТ с катодным считыванием. Показана перспективность развития данного направления детекторов. Максимально достигнутое пространственное разрешение составило 74 мкм.

- Впервые разработан, изготовлен и исследован полномасштабный прототип детектора с системой газового охлаждения модулей TRT прямого направления установки ATLAS LHC.

Практическая ценность работы

- Результаты исследований характеристик тонкостенных дрейфовых трубок легли в основу разработки и создания строу-трекеров для экспериментов COMPASS, ATLAS, «Термализация» СВД и могут быть использованы для создания других детекторов на основе ТДТ.
- Разработанные двухкоординатные детекторы на основе ТДТ с катодным считыванием могут быть использованы при создании высокоточных трекеров для современных физических установок.
- Результаты исследований термометрии прототипа TRT модуля легли в основу разработки и создания системы газового охлаждения TRT детекторов установки ATLAS LHC.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на рабочих совещаниях коллаборации ATLAS, семинарах Лаборатории физики частиц и опубликованы в работах [1+7].

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 92 страниц, включая 56 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава содержит результаты исследования характеристик микростриповой газовой камеры. Для исследования характеристик МСГК была разработана и изготовлена микростриповая газовая камера (рис. 1) с микростриповым электродом площадью

$50 \times 50 \text{ мм}^2$, нанесенным на стеклянную подложку толщиной 2,5 мм [1]. Структура электрода представляла собой чередование с шагом 200 мкм тонких $\sim 1 \text{ мкм}$ алюминиевых катодных и анодных стрипов шириной 30 мкм и 3 мкм соответственно. Электрод изготавливался способом фотолитографии. Для переднего катода использовался алюминизированный майлар. Зазор между передним катодом и микростриповым электродом составлял 8 мм.

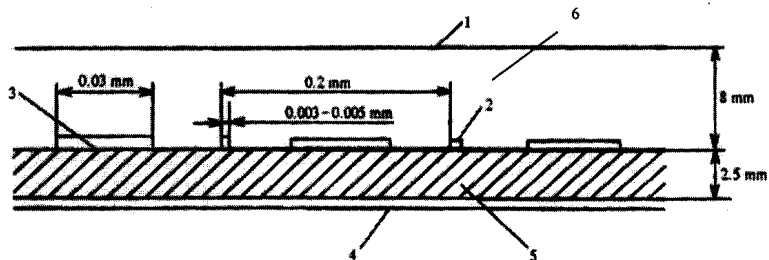


Рис. 1. Конструкция микрострипового детектора: 1) передний катод; 2 и 3) анодные и катодные стрипы; 4) задний катод; 5) стеклянная подложка; 6) дрейфовый промежуток

Задний катод был изготовлен из медной фольги и вплотную прилегал к нижней поверхности изолирующей подложки микрострипового электрода. В качестве рабочего газа использовалась аргон-метановая смесь (80% Ar, 20% CH_4).

Для определения характеристик МСГК использовались источник γ -излучения ^{55}Fe и рентгеновская трубка с медным анодом. Все катодные стрипы были объединены между собой. Напряжение на них подавалось через ограничивающий ток резистор номиналом 1 МОм. Анодные стрипы объединялись в группы по семь штук. Считывание информации с групп осуществлялось малошумящими токовыми усилителями.

Амплитудный спектр сигналов с анодных стрипов при регистрации γ -квантов с энергией 8 кэВ показан на рис. 2. Полученное энергетическое разрешение составляет 23 %.

Величина максимально достигнутого значения коэффициента газового усиления составила $K_{\text{макс}} = 6 \times 10^4$, отношение сигнал/шум при этом было более 80.

Загрузочная способность детектора исследовалась с помощью пучка γ -квантов с энергией 8 кэВ от рентгеновской трубки с медным анодом. Диаметр пучка составлял 0,6 мм.

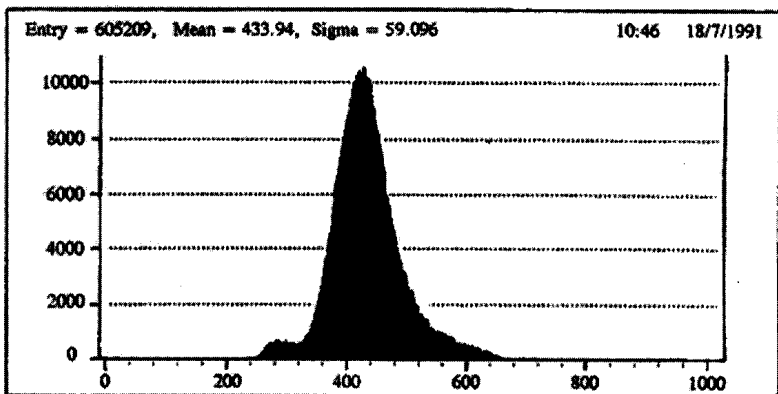


Рис. 2. Спектр амплитуд сигналов с анодных стрипов при регистрации γ -квантов с энергией 8 КэВ.

График зависимости амплитуды сигнала от величины загрузки показан на рис. 3, где A/A_0 – отношение амплитуды сигнала при данной загрузке к амплитуде сигнала при малой интенсивности пучка. Для сравнения, на графике дана загрузочная способность для многопроволочной пропорциональной камеры с шагом сигнальных проволочек 2 мм (кривая 2)¹.

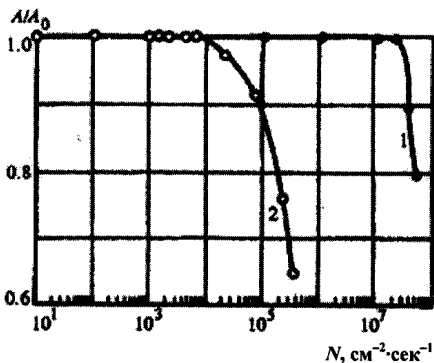


Рис. 3. Графики зависимости амплитуды сигнала от величины загрузки:

1 – МСГК, 2 - МПК

¹ F. Angelini, R. Bellazzini, A. Brez et al., Particle World (1990) vol. 3 p.85.

Результаты исследований микроstriповой газовой камеры показали что она:

- имеет высокую загрузочную способность (до 10^6 частиц/мм²сек);
- имеет хорошее энергетическое разрешение (23 % для γ -квантов энергии $5 \div 10$ кэВ);
- обладает хорошими пространственно-временными характеристиками (пространственное разрешение ~ 60 мкм при эффективности регистрации 95% для частиц с минимальной ионизацией);
- позволяет простым способом получить вторую координату (с достаточно высокой² точностью ~ 160 мкм).

Однако МСГК отличается одним существенным недостатком – она не обладает хорошей временной надежностью. Для повышения надежности детектора приходится работать при пониженных напряжениях, что приводит к ухудшению пространственно-временных характеристик. Несмотря на это, МСГК явилась перспективным путем развития, т.к. привела к появлению нового (разработанного в CERN) вида высокоточных координатных газонаполненных детекторов на основе газового электронного умножителя (GEM).

Во второй главе представлены результаты исследования характеристик тонкостенных дрейфовых трубок [2]. Струу изготавливались из каптоновой пленки, на одну из сторон которой был нанесен проводящий слой алюминия толщиной $1000 \div 3000$ Å, покрытый 4 мкм слоем углерода, а на другую термосклеивающий слой из термопластического полиуретана толщиной $6 \div 8$ мкм. Принцип изготовления трубок заключался в следующем (рис. 4).

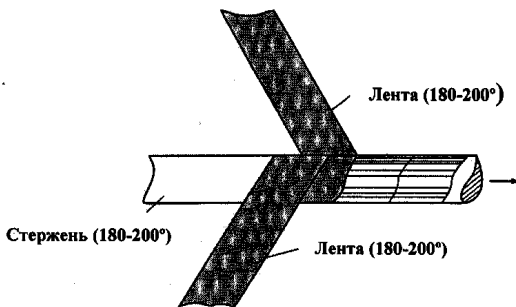


Рис. 4. Процедура изготовления струу

² F. Sauli, ..., V.N. Bychkov, ..., et al., [RD-28 Collaboration], RD-28 development of microstrip gas chambers for radiation detection and tracking at high rates, CERN-DRDC-93-34 Status report to the DRDC open meeting, Sep 2, 1993

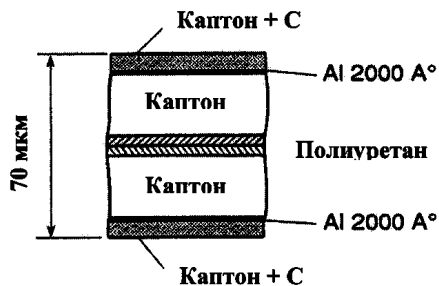


Рис.5. Стенка строу в разрезе

Пленка нарезалась на ленты шириной 8 мм. Затем, две таких ленты при температуре около 200 °С спирально навиваются термосклеивающим слоем друг к другу и со смещением примерно в ½ ширины на специально изготовленный прецизионный стержень. На рис. 5 показана стенка такой трубки в разрезе. Результирующая толщина стенки составляла порядка 70 мкм. В таблице 1 приведены некоторые основные механические характеристики сделанных таким образом трубок.

Таблица 1: Механические характеристики каптоновых строу

Диаметр	4 мм
Толщина стенки	70 мкм
Модуль Юнга материала строу	300 кг/мм ²
Относительное удлинение при нагрузке 200 г	10 ⁻³
Коэффициент температурного расширения	3·10 ⁻⁴ °К ⁻¹

Исследования показали, что при изготовлении детекторов, в общем случае невозможно использовать такие строу без предварительного натяжения. Для того чтобы трубка длиной 50 см была прямой, ее необходимо натягивать с усилием не менее 200 г. При большом количестве трубок это накладывает определенные требования к жесткости несущей рамы детектора.

Измерения показали, что механические характеристики тонкостенных дрейфовых трубок, изготовленных из полимерных пленок, обладают высокой чувствительностью к изменению влажности. На рис. 6 показана зависимость однородности коэффициента газового усиления вдоль строу, фактически содержащая информацию о прямолинейности

трубки при изменении относительной влажности. В эксперименте использовались две каптоновых строу, фиксированные с обоих концов и с предварительным натяжением 200 г. Из графиков (кривые 1 и 2) следует, что при влажности выше 70 % механическая стабильность (прямолинейность) строу резко ухудшилась. При постоянной влажности изменений длины аналогичных трубок с таким же предварительным натяжением в течение 3-х месяцев замечено не было³.

Для улучшения характеристик ТДТ была разработана технология армирования трубок, представляющая собой приклеивание вдоль строу (на наружную поверхность) нитей из углеволокна. Нити на поверхности располагаются равномерно по окружности. Каждая нить содержит от 500 до 1000 филаментов (волокон) диаметром 7 мкм. Поэтому масса строу при этом увеличивается незначительно, от 20 % до 40 % в зависимости от количества приклеиваемых нитей (3 или 4) и филаментов в каждой из них.

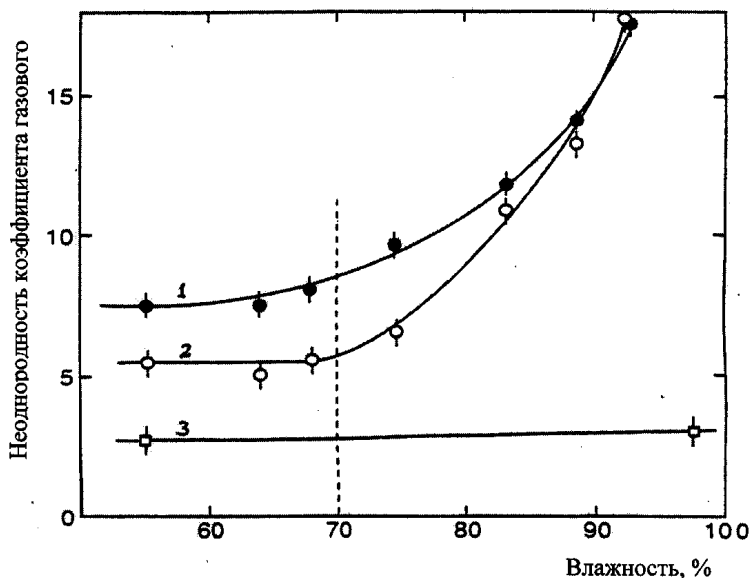


Рис. 6. Зависимость неоднородности коэффициента газового усиления вдоль строу от влажности. Строу 1 и 2 без армирования, строу 3 с армированием.

³ V. Bondarenko, B. Dolgoshein, V. Grigoriev et al., Nuclear Instruments and Methods, A327 (1993) 386.

Тестирование армированных ТДГ на чувствительность к влажности показало, что существенных изменений свойств таких трубок при относительной влажности 100% замечено не было в течение 24 часов (кривая 3 на рис. 6).

Некоторые механические характеристики армированных строу показаны в таблице 2.

Таблица 2. Механические характеристики армированных строу-трубок

Кол-во нитей из углеволокна	3
Относительное удлинение при нагрузке 200 г.	$6 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент температурного расширения	$6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$

Для быстрого сигнала тонкостенная дрейфовая трубка представляет собой структуру аналогичную коаксиальной линии. Из этого следует, что в случае, когда возможно появление отраженного сигнала, необходимо использовать согласовку дальнего конца трубки. Для коаксиальных структур характеристическое сопротивление линии без потерь (резистивность катода и анода пренебрежимо малы) может быть посчитано по формуле:

$$Z_0 = 60 \ln(R/r), \quad (1)$$

где R – радиус строу, r – радиус проволочки.

В том случае, когда катод и анод обладают значимой собственной резистивностью, характеристическое сопротивление дрейфовой трубки является частотно зависимым и определяется по формуле:

$$Z_0 = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}, \quad (2)$$

где R – резистивность, L – индуктивность, G – проводимость и C – емкость единицы длины. Проводимость G обычно пренебрежимо мала. Таким образом:

$$Z_0 = \sqrt{(R + j\omega L)/(j\omega C)}, \quad (3)$$

Резистивность проволоки по постоянному току обычно составляет 60+130 Ом/м. Для реального сигнала со скоростью нарастания фронта около 10 нс (25+30 нс по основанию для центральной частоты порядка 20 МГц), электрическое сопротивление анода практически не меняется благодаря довольно большой глубине проводящего слоя скин-эффекта (порядка 25 мкм на частоте 20 МГц). Вычисления показывают, что величины характеристического сопротивления для строу диаметром от 4 до 10 мм с анодными

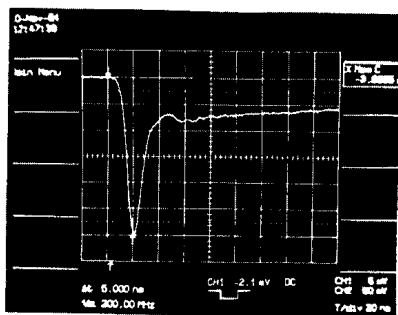
проволоками диаметром $20 \div 50$ мкм должны находиться в пределах $260 \div 380$ Ом. Экспериментальные результаты, полученные для различных видов строу [2, 3] хорошо согласуются с расчетными.

Форма выходного импульса с ТДТ зависит от конструктивных особенностей трубки, свойств заполняющего ее рабочего газа и выбранного режима работы. В общем случае для цилиндрических пропорциональных камер выходной сигнал с анодной проволоочки можно описать с помощью следующих выражений ^{4,5}:

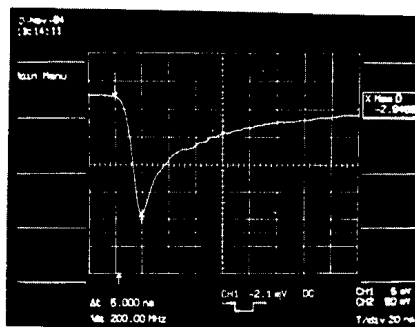
$$I(t) = I_0 / (1 + t/t_0), \quad (4)$$

$$t_0 = a^2 \cdot \ln(b/a) / (2V\mu^+), \quad (5)$$

где a и b – диаметры анода и катода, V – напряжение между анодом и катодом, μ^+ – подвижность положительных ионов. На рис. 7 даны примеры осциллограмм токовых сигналов с анодной проволоочки для разных газовых смесей. Видно, что сигналы содержат быструю и медленную составляющие.



a



b

Рис. 7. Осциллограммы токовых сигналов для разных газовых смесей:

(a) – 70% Xe + 20% CF₄ + 10% CO₂; (b) – 80% Ar + 20% CF₄

Быстрая компонента может иметь фронты в пределах от единиц до десятков наносекунд и содержит примерно 3÷15% от полного собираемого заряда. Медленная компонента определяется скоростью рассасывания (подвижностью) образовавшихся ионов и может достигать сотен микросекунд. Наличие такого длинного ионного «хвоста»

⁴ R.A. Boie, A.T. Hrisoho and P. Rehak, Nuclear Instruments and Methods, 192 (1982) 365.

⁵ V. Radeka. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 38 (1988), p. 217

создает проблемы для организации считывания информации с необходимой точностью, особенно в случае работы трубки в режиме больших счетных нагрузок.

При регистрации трубкой потока частиц большой интенсивности возможно наложение ионных «хвостов» от следующих друг за другом импульсов. Это может привести к смещению нуля в цепях электроники, изменению эффективного порога срабатывания дискриминаторов и повлечь за собой ухудшение пространственного разрешения, появление ложных хитов и потерю эффективности. Для решения этих проблем требуется специальная электроника с возможностью обрезания ионного хвоста.

Характеристики длинных ТДТ и параметры распространения сигналов в них изучались с помощью радиоактивных источников ^{55}Fe и ^{106}Ru . Особый интерес заключался в исследовании областей установки спейсеров (специальных поддержек из изолирующего материала, центрирующих проволочку в трубке и одновременно поддерживающие цилиндричность трубки изнутри). Спейсеры были вставлены внутрь трубки с шагом 70 см, имели центральное отверстие диаметром 80 мкм и толщину стенок 0,3 мм.

На рис. 8 показаны счетная и амплитудная характеристики в области спейсера в зависимости от позиции источника ^{55}Fe [3].

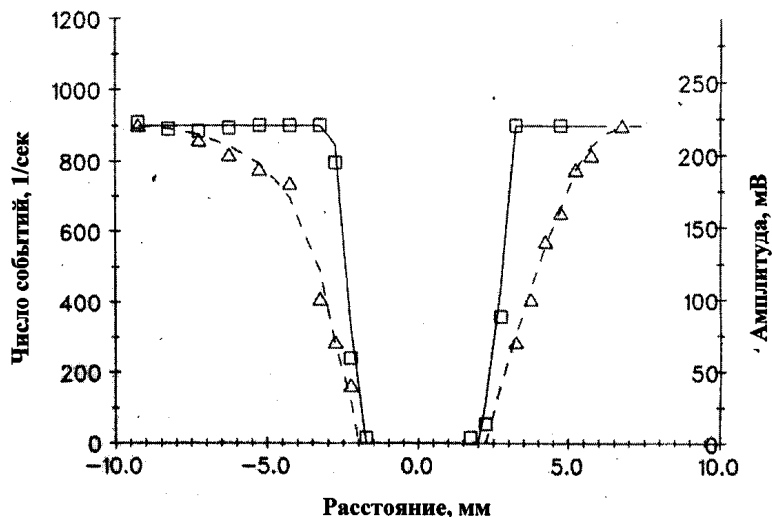


Рис. 8. Счетная (сплошная кривая) и амплитудная (пунктирная линия) зависимости от положения коллимированного (3 мм) пучка γ -квантов от ^{55}Fe относительно центра спейсера, установленного в строу $\varnothing 10$ мм.

Видно, что нечувствительная область составляет не более 7 мм. Измерения показали принципиальную возможность изготовления детекторов большой площади на основе длинных тонкостенных пленочных трубок.

В третьей главе представлены детекторы 2-х типов на основе ТДТ с катодным считыванием [4,5].

Конструкция камеры на основе ТДТ с продольным окном [4] схематически показана на рис. 9. Камера состоит из стеклотекстолитовой подложки толщиной 2,5 мм на поверхности которой были изготовлены массивы из медных проводников-стрипов длиной 1 м и толщиной 50 мкм. Шаг ($a+b$) в массивах составлял 3, 4 и 5 мм с зазорами (b) между стрипами 0,5 мм, 0,5 мм и 1 мм соответственно. Трубки устанавливались на подложку перпендикулярно стрипам и располагались продольным прозрачным (без алюминиевого покрытия) окном в сторону подложки. Предварительное натяжение трубок составляло 100 г. Для сборки камеры использовались ТДТ диаметром 10 мм с продольным швом. Трубки изготавливались посредством ультразвуковой сварки из алюминизированного майлара толщиной 25 мкм. В качестве анодов использовалась расположенная по центру трубки позолоченная вольфрамовая проволока диаметром 50 мкм. Используемая газовая смесь была Ag/CO_2 (50/50).

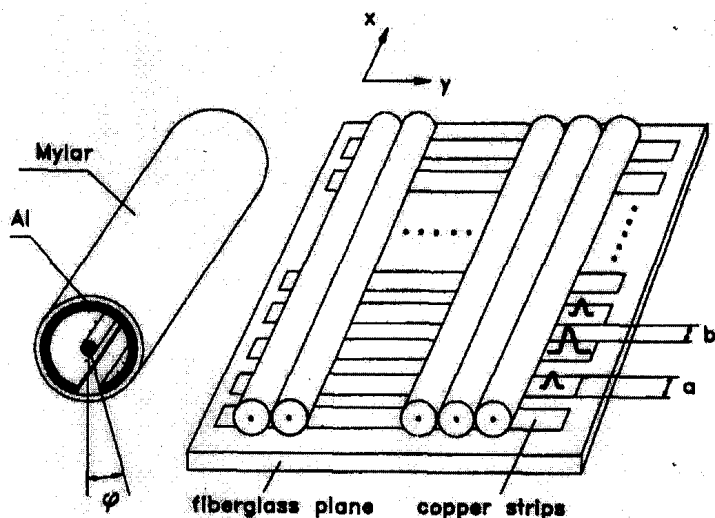


Рис. 9. Схема камеры (справа) и строу (слева)

Определение координаты осуществлялось по трем соседним стрипам методом центра тяжести, используя алгоритмы, описанные в работах ^{6,7}. Координата события вычислялась по формуле

$$x = \frac{(a+b)(\ln Q_{i-1} - \ln Q_{i+1})}{2(\ln Q_{i-1} - 2 \ln Q_i + \ln Q_{i+1})} \quad (6)$$

где Q_i – заряд, наведенный на i -тый стрип.

На рис. 10 представлены результаты измерения пространственного разрешения детектора от величины отношения сигнал/шум. Пучок γ -квантов находился вблизи середины стрипа. Наилучшее пространственное разрешение (103 ± 4) мкм было достигнуто при отношении сигнал/шум ~ 70 . Результаты получены с использованием 8 кэВ рентгеновского пучка диаметром 1 мм и интенсивностью $2 \cdot 10^4$ см⁻² сек⁻². Газовое усиление в трубке составляло $2 \cdot 10^5$.

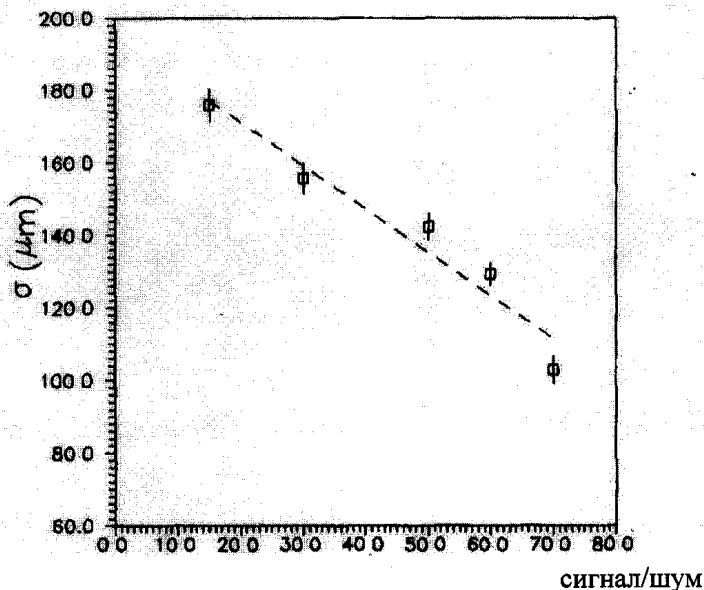


Рис. 10. Пространственное разрешение детектора от величины отношения сигнал/шум.

⁶ A. Golutvin, S. A. Movchan, V. D. Peshekhonov and T. Preda, Nuclear Instruments and Methods, 333 (1993) 536

⁷ I. Endo et al., Nuclear Instruments and Methods, 188 (1981) 51.

Для изучения характеристик стрипового считывания координаты в ТДТ с высокорезистивным катодом были собраны несколько прототипов с различными типами строу [5,6]. Исследовались амплитудные характеристики для трубок диаметром 4 и 10 мм, изготовленных из пленок с углеродным покрытием резистивностью от 0,5 до 70 кОм/□. Схематическое изображение конструкции прототипов показано на рис. 11 [5]. Трубки длиной 16 см устанавливались на подложку из листового материала *G10* толщиной 2 мм на расстоянии S , друг от друга. На наружной поверхности трубок имелись кольцевые стрипы шириной A_c , расположенные с шагом S_c . Стрипы гальванически соединялись соответствующим образом со считывающими шинами, находящимися на нижней стороне подложки. Шины представляли собой медные стриповые проводники длиной 72 см и шириной 3 мм, расположенные с шагом 7 мм. В качестве анодов использовалась позолоченная вольфрамовая проволока диаметром 50 мкм. Продув строу осуществлялся рабочей смесью Ar/CH_4 (50/50). Облучение проводилось пучком γ -квантов диаметром 1,5 мм и энергией 8 кэВ от рентгеновской трубки. Специальные приспособления позволяли перемещать рентгеновскую трубку в пределах выбранного участка с высокой точностью.

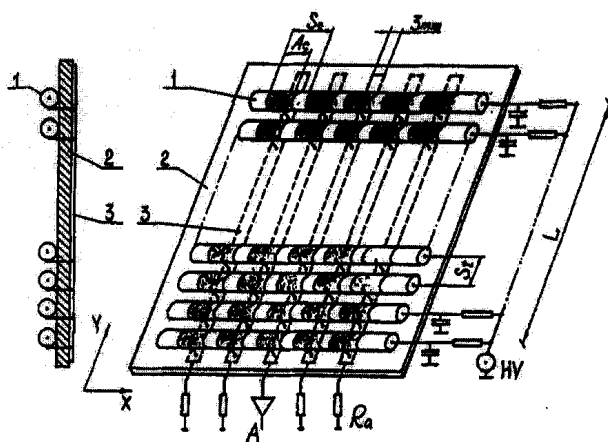


Рис. 11. Схематическое изображение прототипов: (1) – строу с кольцевыми стрипами; (2) – подложка; (3) – считывающие шины.

Определение координаты осуществлялось по трем соседним стрипам методом центра тяжести аналогично (6). Максимально достигнутое разрешение составило 74 мкм (рис. 12) [6] при этом отношение сигнал/шум равнялось 120.

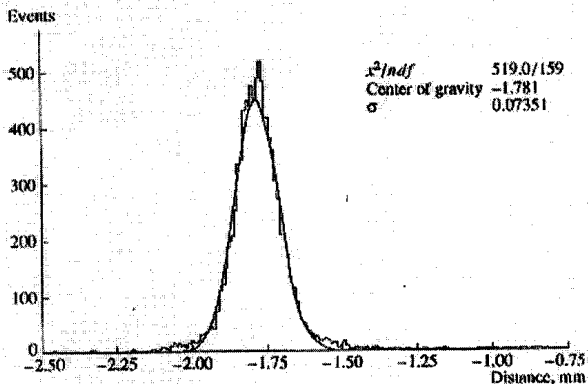


Рис. 12 Распределение событий от положения 50 мкм шириной коллимированного пучка γ -квантов энергией 8 кэВ, соответствующее максимальному пространственному разрешению.

В четвертой главе описана установка для проверки предлагаемой схемы газового охлаждения TRT модулей установки ATLAS LHC, представлены результаты исследований и даны рекомендации для разработки системы охлаждения детектора [7].

Регистрация частиц строу-камерами сопровождается тепловыделением внутри трубок. Оценка показала, что в кольцевых модулях прямого направления TRT ATLAS тепловыделение будет составлять 5 мВт/трубка для модулей типов А и В, и 12 мВт/трубка для модулей типа С⁸. Таким образом, в модулях типа С, имеющих 9216 строу, суммарное тепловыделение составит около 110 Вт/модуль.

Требования постоянства величины скорости дрейфа и коэффициента газового усиления (как по длине каждой строу, так и по всему объему TRT) накладывают ограничения на максимальный температурный разброс по единичному модулю детектора в пределах 10 °С^{9,10}.

Для проведения термометрических измерений и проверки схемы газового охлаждения детектора был создан полномасштабный прототип модуля типа С в виде сектора размером 42° [7]. Сектор содержал 1100 строу длиной 575 мм и состоял из 17 плоскостей радиаторов переходного излучения между которыми располагались 16 плоскостей трубок. Сектор помещался в стеклотекстолитовую раму и с обеих сторон

⁸ ATLAS Inner Detector Technical Design Report, vol. 2, CERN/LHC/97-17 (1997), 722.

⁹ Semenov S., Sosnovtsev V. "Temperature Dependence of the Straw Operating Properties", CERN RD-6 Note 63, 1995.

¹⁰ M. Deptuch, K. Jelen, D. Kiselewska et al., The temperature coefficient of gas gain in TRT detector. ATL-INDET-2002-011 (2002).

герметично закрывался крышками из пенополиуретана (рис. 13), «имитирующими» наличие соседних модулей.

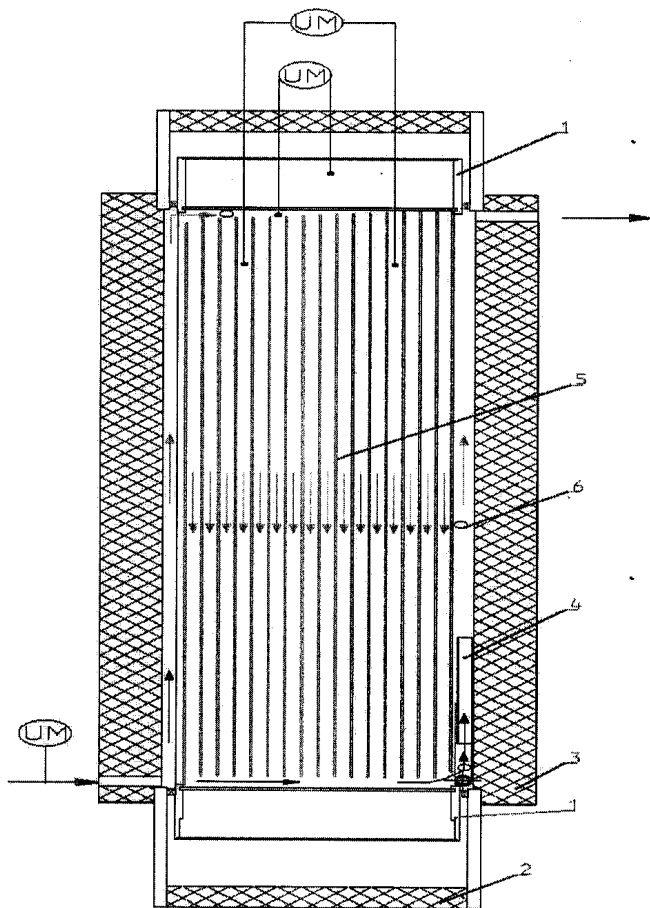


Рис. 13. Схема газовой системы охлаждения.

1 – кольцевой сегмент, 2 – стеклотекстолитовая рама, 3 – пенополиуретановая крышка, 4 – теплообменник, 5 – радиаторы переходного излучения, 6 – места установки термодатчиков, УМ – U-образные масляные манометры. Стрелками показано направление потока охлаждающего газа.

Газовое охлаждение детекторов трека прямого направления TRT ATLAS предполагается осуществлять по последовательно-параллельной схеме. Модули между собой соединены по последовательной схеме. В первый модуль охлаждающий газ

поступает через систему отверстий, расположенных по внешнему радиусу, и через передний зазор проходит по направлению к внутреннему радиусу (рис. 13). Далее, газ равномерно распределяется между радиаторами переходного излучения, проходит вдоль трубок и выводится через задний зазор в котором установлен теплообменник. Равномерное распределение охлаждающего газа обеспечивается специальным порядком установки радиаторов (с изменением площади сечения для прохождения газа). Охлаждение трубок начинается с внутреннего радиуса, где тепловыделение будет максимальным. На выходе нагретый газ попадает в область теплообменника, расположенного по наружному периметру, где восстанавливает начальную температуру перед входом в следующий модуль. Тепловыделение внутри трубки при прохождении частиц можно оценить следующим выражением ¹¹:

$$W = N \cdot I \cdot G \cdot q \cdot U, \quad (7)$$

где N – среднее количество образующихся при прохождении частицы пар, I – интенсивность счета, G – коэффициент газового усиления, q – заряд электрона, U – напряжение между анодом и катодом.

Для имитации нагрева были разработаны и изготовлены 1100 нагревательных элемента. Так как нагревательные элементы устанавливались в каждую трубку взамен анодной проволоки, величина теплопередачи вдоль нагревательного элемента должна была иметь значение близкое к величине теплопередачи вдоль анодной проволоки.

Нагревательные элементы изготавливались из нихромовой проволоки диаметром 14 мкм, которая зигзагообразно клеивалась между двумя тонкими бумажными лентами шириной 3,9 мм и длиной 560 мм (рис. 14).

Принимая во внимание, что интенсивность от радиуса меняется как ¹¹

$$I \propto \frac{1}{r^a}, \quad (8)$$

где r – расстояние от точки столкновения пучков и $a \approx 2.51$, плотность зигзагов вдоль нагревателя делалась переменной, чтобы обеспечить тепловыделение вдоль трубки по требуемому закону.

Датчики температуры представляли собой медь-константановые термодатчики с двумя термопереводами, измерительным и опорным. Для уменьшения искажений реального распределения температуры в секторе за счет вещества термодатчиков, при

¹¹ Akesson, T; Danielsson, H; Hauviller, C; Ögren, H O; Price, M; Stavrianakou, M, Cooling of the straws in the ATLAS TRT ATL-INDET-95-082; ATL-I-PN-82.- Geneva : CERN, 23 Jan 1995

изготовлении термопар были применены термопарный константан диаметром 60 мкм и электротехническая медная проволока диаметром 100 мкм.

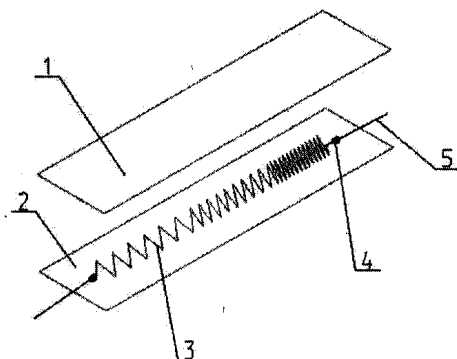


Рис.14. Конструкция нагревательного элемента:

1 – бумажная скотч-лента, 2 – бумажная лента, 3 – нихромовая проволока $\varnothing 14$ мкм, 4 – токопроводящий клей, 5 – медные выводы $\varnothing 100$ мкм.

Это позволило обеспечить достаточно малую теплопроводность вдоль датчиков температуры, сравнимую с теплопроводностями вдоль элементов прототипа и реального детектора (см. таблицу 3).

Таблица 3. Величины теплопередач по отдельным элементам сектора для $\Delta t=10^{\circ}\text{C}$ на длине 50 см.

Элемент	Материал	Q,Вт
Анодная проволока	медь $\varnothing 50$ мкм бронза $\varnothing 50$ мкм вольфрам $\varnothing 50$ мкм	$1,6 \cdot 10^{-5}$ $(0,8+5,1) \cdot 10^{-6}$ $6,9 \cdot 10^{-6}$
Газ в трубке	ксенон азот	$1,3 \cdot 10^{-6}$ $6,0 \cdot 10^{-6}$
Нагреватель		$2,8 \cdot 10^{-6}$
Термодатчик		$(5,5+10,8) \cdot 10^{-5}$

Установка была изготовлена таким образом, чтобы положение сектора по углу φ можно было устанавливать в любом положении в пределах от 0 до 180° . Для стабилизации показаний термопар опорные термопереходы содержались в термостате с температурой

0 °С. Схема расположения термодатчиков позволяла определять распределение температур внутри прототипа по φ , R , Z , координатам.

Результаты исследований влияния скорости продува охлаждающего газа на температурное распределение внутри сектора показаны на рис. 15. Кривые 1 и 2 показывают зависимости средней и максимальной температуры в прототипе. Теоретическая кривая 3 получена на основе экспериментальных оценок суммарных потерь по Z -, R -, и φ – направлениям и показывает зависимость средней температуры прототипа в случае «идеальной» теплоизоляции сектора.

Из графиков видно, что при продувах выше 80 л/мин кривые температур выходят на плато. С учетом гарантированного снятия избыточного тепловыделения было принято считать минимальной скоростью продува охлаждающего газа 90 л/мин. При замене азота углекислым газом эффект охлаждения при той же скорости продува увеличивается на 19 % (точки Δ и $*$).

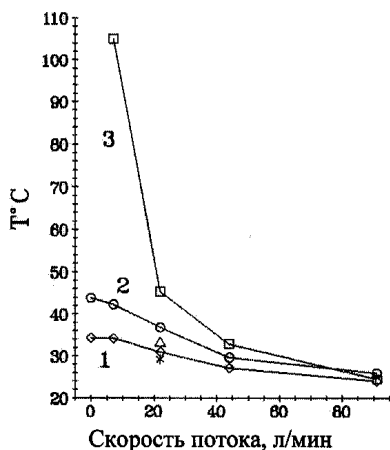


Рис. 15. Влияние скорости продува охлаждающего газа на температурное распределение внутри прототипа при охлаждении азотом. 1 - зависимость средней температуры прототипа, 2 – зависимость максимальной температуры в прототипе, 3 – зависимость средней температуры прототипа в случае «идеальной» теплоизоляции сектора. Точки (*) и (Δ) получены при охлаждении углекислым газом для случаев 1 и 2, соответственно.

Влияние конвекции газа внутри трубок на термораспределение в модулях TRT изучалось при установке прототипа в положения $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=180^\circ$. На рис. 16 показано влияние конвекции на распределение температур внутри трубок в отсутствие охлаждения. Наибольший разброс температур вдоль трубок наблюдается в случае $\varphi=180^\circ$ (область

максимального тепловыделения находится сверху). На рис. 17 представлены зависимости среднеквадратичного отклонения температур в прототипе от скорости продува охлаждающим газом для $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=180^\circ$. Видно, что даже при высоких скоростях продува полной компенсации эффекта не происходит.

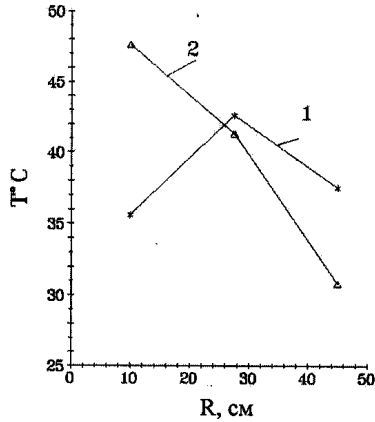


Рис. 16. Влияние конвекции на распределение температур внутри трубок. 1- прототип в положении $\varphi=0^\circ$, 2 – прототип в положении $\varphi=180^\circ$. Графики получены для центральной трубки в отсутствии охлаждения.

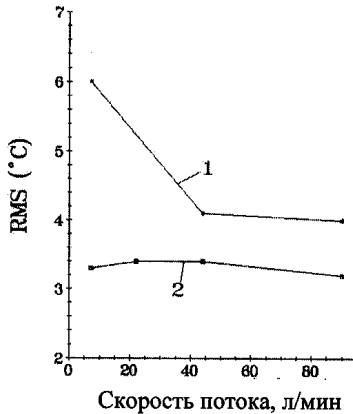


Рис. 17. Зависимость среднеквадратичного отклонения температур в прототипе от скорости продува азотом.

1 – прототип в положении $\varphi=180^\circ$, 2 – прототип в положении $\varphi=0^\circ$

Эффективность теплообменника оценивалась по формуле:

$$Q=V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta t, \quad (9)$$

где V – скорость протока воды, ρ и C_p – плотность и удельная теплоемкость воды при данной температуре, Δt – разность температур воды на входе и выходе теплообменника. Оптимизация теплообменника заключалась в увеличении площади поверхности радиатора при минимизации его габаритных размеров.

Термометрия полномасштабного прототипа TRT модуля прямого направления установки ATLAS LHC в виде сектора размером 42° [7] подтвердила необходимость принудительного охлаждения модулей детектора. Было показано, что при вынужденном охлаждении азотом модулей типа С (модулей с максимальным тепловыделением) максимальный разброс температур в модуле при скорости продува охлаждающего азота 90 л/мин не превышает 14°C . Применение углекислого газа позволяет уменьшить величину продува на 19 %. Исследования охлаждения позволили рекомендовать удовлетворяющую поставленной задаче конструкцию теплообменника и определить его оптимальные размеры.

В заключении сформулированы основные результаты работы и выводы диссертации:

1. Одной из первых в России была изготовлена и исследована микростриповая газовая камера.
2. Произведены исследования механических и электрофизических характеристик тонкостенных дрейфовых трубок. Результаты исследований легли в основу разработок и создания строу-трекеров для экспериментов COMPASS, ATLAS и «Термализация» СВД.
3. Разработаны и исследованы прототипы 2-х типов камер на основе ТДГ с катодным считыванием. Показана перспективность развития данного направления детекторов. Максимально достигнутое пространственное разрешение составило 74 мкм.
4. Впервые разработана, изготовлена в натуральную величину и исследована тепловая модель модулей TRT (Transition Radiation Tracker) прямого направления установки ATLAS LHC. Отработана система газового охлаждения детектора. Результаты исследований легли в основу разработки и создания системы газового охлаждения TRT детекторов установки ATLAS.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Бычков В.Н., Голутвин И.А., Игнатова Л.Г., и др, Приборы и Техника Эксперимента, №5 (1992) 83.
2. T. Akesson, V. Bondarenko, V. Bytchkov, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A 361 (1995) 440-456
3. V.N. Bytchkov, G.D. Kekelidze, A.B. Ivanov et al., Some Characteristics of the Long Straw Drift Tubes. JINR, E13-98-209, 1998, 12 с.
4. V. N. Bychkov, I. A. Golutvin, Yu. V. Ershov, et al. Nuclear Instruments and Methods, A 325 (1992) 158.
5. V. N. Bychkov, G. D. Kekelidze, E. A. Novikov, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A 367 (1995) 276.
6. V. N. Bychkov, G. D. Kekelidze, S. P. Lobastov, et al. Instruments and Experimental Techniques Vol. 41, No. 3, 1998 p. 315.
7. Р.А. Астабатьян, В.Н. Бычков, Р. Гебарт и др., Разработка и исследование охлаждения детектора переходного излучения – трекера прямого направления установки ATLAS, ОИЯИ, P13-96-472, Дубна, 1996, 30 с.

Получено 20 апреля 2006 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 21.04.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,31. Уч.-изд. л. 1,57. Тираж 100 экз. Заказ № 55314.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.
E-mail: publish@pds.jinr.ru
www.jinr.ru/publish/