

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

-2009-

На правах рукописи

УДК 539.1.074

МЯЛКОВСКИЙ

Владимир Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ДРЕЙФОВЫХ
ТРУБОК ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТЬЮ**

Специальность: 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 2009

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Пешехонов Владимир Дмитриевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Залиханов Борис Жанакитович

кандидат физико-математических наук

Лапшин Владимир Григорьевич

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики
Московского государственного университета.

Защита диссертации состоится “___” _____ 2009 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛФВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан “___” _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Арефьев В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Экспериментальные установки, используемые в физике высоких энергий для регистрации частиц на ускорителях встречных пучков, состоят, как правило, из внутреннего трекового детектора, окружающего область соударения пучков, электромагнитного и адронного калориметров, мюонного детектора. В состав внутреннего детектора помимо микростриповых полупроводниковых детекторов часто входят и газонаполненные детекторы, обладающие хорошей эффективностью регистрации заряженного излучения, относительной простотой и невысокой стоимостью. При этом они обладают минимальным количеством собственного вещества в сравнении с любым другим типом детекторов, хорошим пространственным разрешением и загрузочной способностью. Использование газонаполненных детекторов, в том числе и тонкостенных дрейфовых трубок, позволяет при регистрации заряженных частиц идентифицировать их по переходному излучению, испускаемому частицами при пересечении границ раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью. Основным недостатком детекторов на основе тонкостенных дрейфовых трубок является их низкая гранулированность, определяемая как произведение эффективной длины детектирующего элемента на его диаметр.

Созданная установка ATLAS на Большом Адронном Коллайдере (LHC) в ЦЕРН 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 (ТДТ или “строу”) с общим числом $\sim 300\,000$ строу. Разработанные модули TRT бокового окружения (barrel), прямого и обратного направлений (end-cap) были изготовлены в США, ОИЯИ и ПИЯФ. В ЛФЧ ОИЯИ были созданы кольцевые модули типа “В”, предназначенные для работы в условиях светимости до $10^{34}\text{ см}^2\text{с}^{-1}$.

Цель диссертационной работы

Исследование характеристик ТДТ и влияния на их работу внешних факторов (изменения температуры, давления, параметров систем газообеспечения и высоковольтного питания); разработка и создание автоматизированного стенда тестирования модулей TRT внутреннего детектора установки ATLAS; проведение тестирования 17 восьмислойных end-cap модулей TRT типа В, содержащих $\sim 105\,000$ ТДТ; а также разработка метода повышения гранулированности ТДТ.

Научная новизна работы

- Исследованы время-амплитудные параметры тонкостенных дрейфовых трубок, а также влияние на их работу различных факторов.
- Разработана методика тестирования модулей детектора в режиме их

массового производства и методы оперативного обеспечения требуемых значений параметров отдельных ТДТ в случаях их отклонений от специфицированных величин.

- Обеспечено оперативное и после сборочное тестирование модулей детектора типа В с общим числом ~ 105 000 ТДТ.
- Предложен не имеющий аналога метод создания строу с сегментированными анодами, позволяющий обеспечивать высокую трековую эффективность детекторов на основе ТДТ для экспериментов в условиях экстремально высокой светимости.

Практическая ценность работы

- Создан стенд автоматизированного тестирования end-cap модулей TRT для внутреннего детектора установки ATLAS.
- Собраны, проверены и установлены в состав супер-многоканального детектора переходного излучения - трекера кольцевые модули типа "В" с полным числом детектирующих каналов ~ 105 000, параметры 99,8% которых соответствуют требованиям спецификации. Проведена паспортизация всех детектирующих каналов кольцевых модулей типа "В".
- Предложен способ многократного повышения гранулированности ТДТ путем использования в них сегментных анодов.

Апробация работы

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

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, а также основных результатов и выводов. Диссертация содержит 94 страницы, включая 56 рисунков, 6 таблиц, одно приложение и список цитируемой литературы из 53 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 конструкции и механических свойств тонкостенных дрейфовых трубок, рассматривает влияющие на характеристики ТДТ внешние факторы.

Координатные газонаполненные детекторы на основе ТДТ являются модификацией планарных дрейфовых камер. Координаты частиц, прошедших через детектор, определяются в обоих случаях измерением времени дрейфа ближайших к анодной проволоке электронов ионизации газа. В отличие от

дрейфовых камер, строу-камеры обладают рядом преимуществ. Цилиндричность ТДТ обеспечивает высокую угловую однородность электрического поля и высокую эксплуатационную надежность многоканального детектора, так как неисправность одного детектирующего канала не влияет на функционирование остальных. Кроме того, детекторы этого типа содержат минимальное количество вещества в сравнении со всеми известными типа координатных детекторов.

Планарные строу-камеры состоят из набора трубок, расположенных в одной плоскости. Для устранения лево-правой неопределенности камера должна быть двухслойной со сдвигом одного слоя относительно второго на величину радиуса трубки. ТДТ, обычно диаметром от 4 до 10 мм, изготавливаются из тонких пленок (майлар, полиимид). Анодами в них являются проволоки диаметром 20-30 мкм с натяжением в диапазоне 40-90г, а катодом служит проводящее покрытие внутренней поверхности стенки трубок.

С увеличением диаметра строу, для обеспечения одинакового значения величины газового усиления, необходимо некоторое увеличение напряженности электрического поля. Кроме того, с возрастанием диаметра строу увеличивается прилегающая к катоду область низкой напряженности. Так для строу диаметром 4 мм напряженность поля менее 100 В/см имеет место вблизи поверхности катода на расстоянии менее 3% радиуса строу. Тогда как для строу диаметром 15 мм область с напряженностью поля менее 100 В/см увеличивается до 15% радиуса ТДТ.

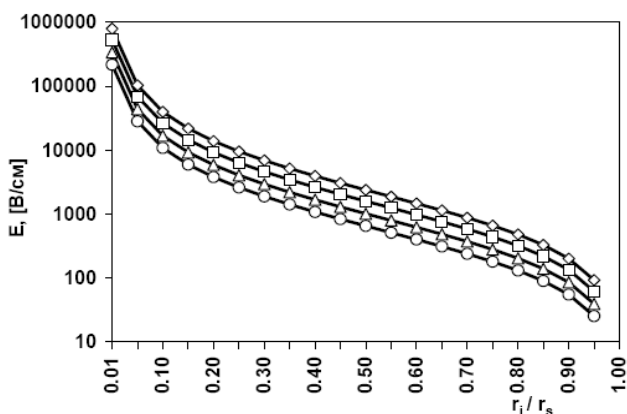


Рис. 1. Величина электрического поля вдоль радиуса ТДТ диаметром 4мм - \diamond , 6мм - \square , 9,56 - Δ и 15 мм - \circ , для газовой смеси ArCO₂ (70/30). Значения анодного напряжения соответствуют $G = 1,4 \times 10^4$ в каждом случае.

На рис. 1 показаны расчетные значения величин напряженности электрического поля E в точках r_i вдоль радиуса строу r_s в зависимости от отношения r_i/r_s :

$$E = \frac{U}{r_i} \left(1 - \frac{\ln(r_i/r_a)}{\ln(r_s/r_a)} \right),$$

где U – анодное напряжение, r_a – радиус анодной проволоки.

В зависимости от целей и задач конкретного эксперимента необходима оптимизация время-амплитудных параметров детекторов, определяемых в значительной мере их газовым наполнением. Изучалось влияние добавок CF₄ и

O_2 в газовую смесь $ArCO_2$ на время-амплитудные характеристики строу различного диаметра [1]. Добавки CF_4 и O_2 , обладающие так называемыми чистящими свойствами, представляют интерес для оптимизации параметров детекторов с малым временем чувствительности в условиях высоких загрузок. Исследования временных параметров ТДТ проводились с использованием источника β -электронов ^{106}Ru , амплитудных – с помощью источника γ -квантов ^{55}Fe .

В таблице 1 представлены величины энергетического разрешения строу различного диаметра при регистрации γ -квантов с энергией 5,9 кэВ. Типичные амплитудные спектры со строу диаметром 4 и 6 мм для газовой смеси $ArCO_2$ с добавками CF_4 и O_2 приведены на рис. 2 и 3, соответственно.

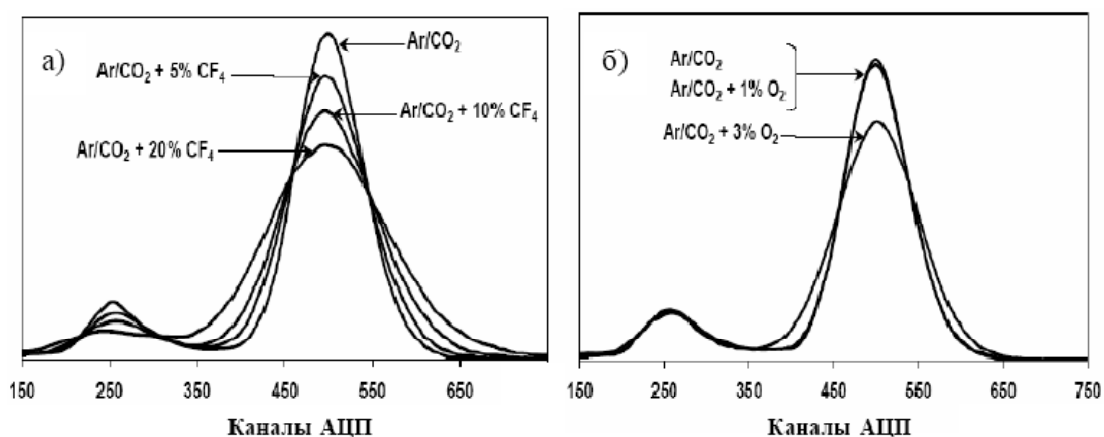


Рис.2. Амплитудный спектр строу диаметром 4 мм при регистрации γ -квантов с энергией 5,9 кэВ. Газовая смесь $ArCO_2$ с добавками CF_4 (а) и O_2 (б), $G = 1,4 \times 10^4$.

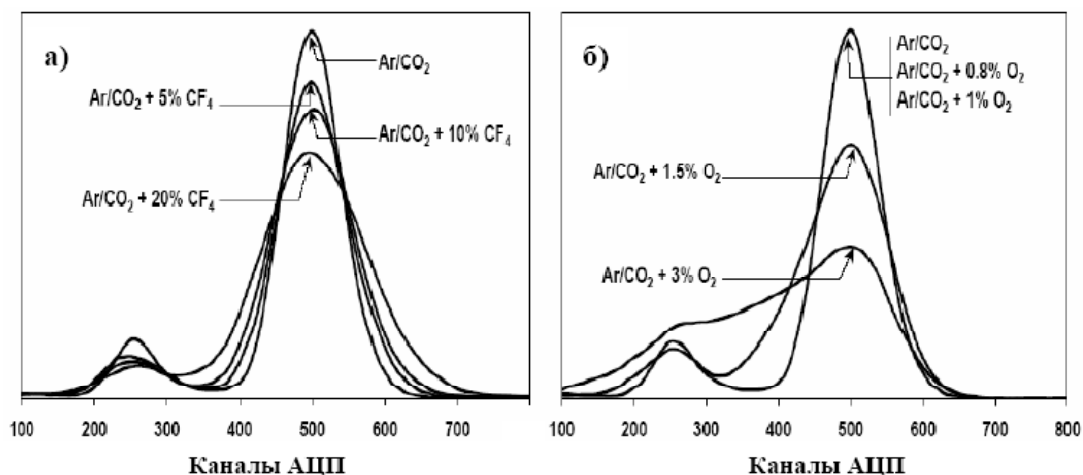


Рис.3. Амплитудный спектр строу диаметром 6 мм при регистрации γ -квантов с энергией 5,9 кэВ. Газовая смесь $ArCO_2$ с добавками CF_4 (а) и O_2 (б), $G = 1,4 \times 10^4$.

Добавка CF_4 слабо влияет на энергетическое разрешение строу диаметром от 4 мм до 15 мм и не влияет на эффективность регистрации как γ -квантов, так

и β -электронов. Добавка O_2 до 1,5% практически не влияет на энергетическое разрешение строу диаметром 4 мм. С увеличением парциального давления O_2 и/или диаметра строу энергетическое разрешение резко ухудшается и появляется неэффективность регистрации событий.

Таблица 1. Энергетическое разрешение строу диаметром d при регистрации γ -квантов с энергией 5,9 кэВ. Газовое усиление - $1,4 \times 10^4$.

Газовая смесь	%	dE/E (%)			
		d=4мм	d=6мм	d=9,56мм	d=15мм
Ar/CO ₂	70/30	18,6	18,8	19,2	26
Ar/CO ₂ /CF ₄	63/32/5	22,5	22,5	22	25
Ar/CO ₂ /CF ₄	63/27/10	26	26,4	26	27
Ar/CO ₂ /CF ₄	63/17/20	33	33,5	33,6	34,5
Ar/CO ₂ /O ₂	(70/30)/0,8	18	18,8	21	35,5
Ar/CO ₂ /O ₂	(70/30)/1	18	19	21,3	41,3
Ar/CO ₂ /O ₂	(70/30)/1,5	19,4	28	--	--

Временные параметры ТДТ измерялись при равномерном облучении источником β -электронов вдоль диаметра строу, продуваемых газовой смесью Ar/CO₂ с различным парциальным давлением CF₄ и O₂.

Значения максимального времени дрейфа T_{max} в строу разного диаметра приведены в таблице 2. Добавка CF₄ ускоряет процесс сбора зарядов, тогда как добавка O₂ незначительно ускоряет время сбора зарядов на малых дрейфовых расстояниях, на которых еще не проявляется процесс захвата электронов, приводящий к неэффективности регистрации.

Таблица 2. Время дрейфа электронов T_{max} для различного содержания добавок CF₄ и O₂ в газовой смеси ArCO₂, а также эффективность регистрации γ -квантов (ϵ_γ , %) строу в случаях не полной их эффективности.

Состав газовой смеси	T_{max} , нс и (ϵ_γ , %) для строу диаметром d			
	d =4 мм	d =6 мм	d =9,56 мм	d =15 мм
ArCO ₂ (70/30)	38	68,4	129	309
ArCO ₂ CF ₄ (63/32/5)	36,5	66,7	144	320
ArCO ₂ CF ₄ (63/27/10)	36	60	119	262
ArCO ₂ CF ₄ (63/17/20)	34	45	99	178
ArCO ₂ O ₂ (70/30)/0,8	38,7	64,1	135 (99,7)	278,7 (78,3)
ArCO ₂ O ₂ (70/30)/1	37	63,2 (99,6)	129 (89,9)	275,3 (72,6)
ArCO ₂ O ₂ (70/30)/1,5	36,5	59,5 (99,4)	119,7 (70,1)	149,6 (62,6)

Добавка O₂ до 3% в рабочую газovou смесь приводит к уменьшению времени нарастания переднего фронта временных распределений в среднем до 3,5 нс по сравнению со смесью ArCO₂. С увеличением добавки CF₄ до 20% в

ArCO₂ нарастание переднего фронта распределений уменьшается на 7-8 нс (рис.4).

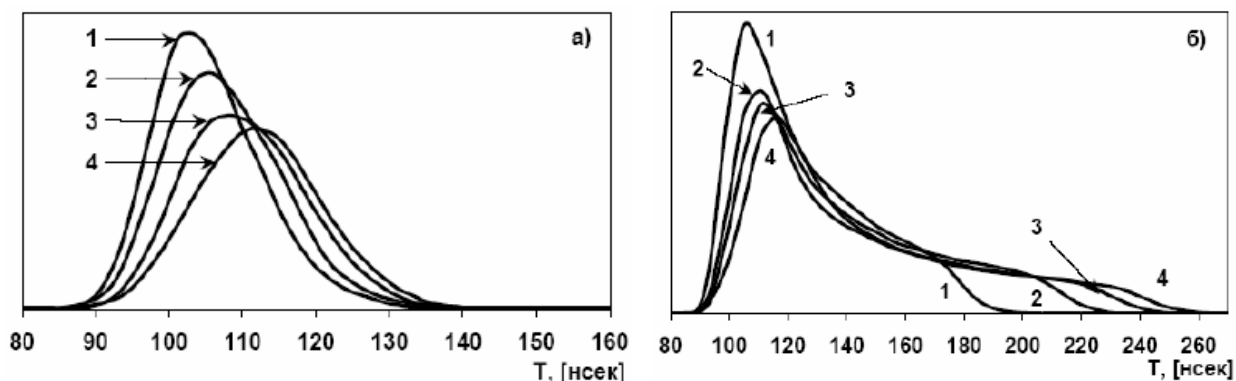


Рис.4. Влияние парциального давления CF₄ на время дрейфа электронов для строу диаметром 4 мм (а) и диаметром 9,56 мм (б). Кривая 1 – газовая смесь ArCO₂CF₄ (63/17/20); 2 – ArCO₂CF₄ (63/27/10); 3 - ArCO₂CF₄ (63/32/5); 4 - ArCO₂ (70/30).

Существенное влияние на стабильность работы ТДТ оказывают такие внешние факторы, как температура и атмосферное давление. Изменение температуры газовой смеси приводит к изменению его плотности и, следовательно, газового усиления G. Влияние температуры на газовое усиление в строу изучалось в диапазоне температур от 18°C до 35°C.

Температурный эффект измерялся на строу, размещенных в термостате, с внешним обдувом рабочей газовой смесью, при постоянном атмосферном давлении. Точность стабилизации температуры в термостате составляла 0,1°C. Изменение газового усиления определялось измерением положения амплитудного пика от источника γ -квантов ⁵⁵Fe. Было определено, что для предполагаемой к использованию в TRT ATLAS газовой смеси Xe/CO₂/CF₄ (70/10/20) изменение газового усиления составляет 2,68% на 1°C.

Изменение плотности рабочего газа вызывается и изменением давления. Из уравнения идеального газа следует, что изменение температуры ΔT на 1°C дает то же самое изменение плотности газа, что и изменение давления ΔP на 3,4 мБар.

Измерения положения амплитудного пика от источника γ -квантов ⁵⁵Fe были проведены для различных давлений (при неизменном рабочем анодном напряжении) в строу. Положение пика линейно уменьшается с увеличением давления. Результаты выполненных измерений показали, что коэффициент зависимости G от давления имеет величину 0,68% на 1 мБар.

С увеличением загрузки детектора ухудшается его энергетическое разрешение (рис. 5) и уменьшаются величины регистрируемых сигналов (рис. 6). Результаты приведенные на рис. 6 указывают, что величина загрузочной способности ТДТ определяемая на уровне 10% уменьшения величины сигналов составляет $9,2 \times 10^4 \text{ с}^{-1} \text{ мм}^{-1}$ и $1,3 \times 10^5 \text{ с}^{-1} \text{ мм}^{-1}$ для смесей на основе ксенона и аргона, соответственно [2].

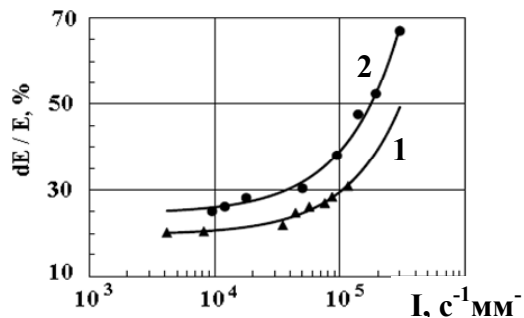


Рис.5. Зависимость энергетического разрешения от интенсивности потока γ -квантов для газовой смеси на основе Ar (кривая 1) и Xe (кривая 2). Газовое усиление $G = 10^4$.

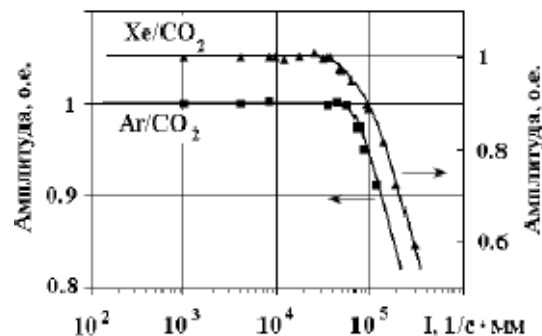


Рис.6. Уменьшение амплитуды сигналов от величины поглощенного потока γ -квантов на 1 мм длины анодной проволоки в строу диаметром 6 мм. \blacktriangle – XeCO₂, \blacksquare – ArCO₂. Газовое усиление 10^4 для обоих измерений зависимости.

Отсюда следует, что для Xe смеси при регистрации однозарядных релятивистских частиц 10% уменьшение величин сигналов будет наблюдаться при интенсивностях $\sim 3,3 \times 10^5 \text{ c}^{-1}$ на 1 мм длины анодной проволоки.

Вторая глава описывает Детектор переходного излучения – трекер эксперимента ATLAS LHC, его конструктивные особенности, процедуры сопровождающего процессы сборки оперативного контроля.

Внутренний Детектор находится в наиболее сложных радиационных условиях и является наиболее компактной системой. ВД содержит твердотельные трековые детекторы первого яруса (пиксельные и полупроводниковые). Состоящие из ТДТ детекторы второго яруса (TRT) расположены на большем удалении от точек столкновения и, предназначены для реконструкции треков заряженных частиц, развитию триггера второго уровня и идентификации электронов. Габариты TRT достигают 6,8 м в длину и 2,2 м в диаметре, общий вес – около 1,5 тонны.

Боковая часть TRT охватывает по направлению оси пучка ± 75 см (от точки взаимодействия) и содержит 52 000 строу длиной 1,5 метра, расположенные в осевом направлении. Две части прямого направления (end-cap) содержат ~ 250000 ТДТ длиной 40 см, расположенных в кольцевых модулях в радиальном направлении.

Создание 34 четырехслойных кольцевых модулей типа В и объединение их в 17 восьмислойных модулей было осуществлено в ЛФЧ ОИЯИ [3]. Требования на конструкцию, используемые материалы и сборочную технологию были достаточно жесткими для обеспечения стабильной работы детектора в условиях экстремально высокой светимости в течение длительного времени (не менее 10 лет). Накопленная за это время радиационная нагрузка составит около 10 мРад, а интегральная плотность нейтронного потока - около 2×10^{14} нейтронов/см². С учетом высокой многоканальности детектора было повышено требование к однородности каналов регистрации, что требовало строгого соблюдения технологии при выполнении всех сборочных процедур. Для осуществления этого требования были введены операции тестирования

практически на всех стадиях сборки. Результаты вносились в базу данных и были доступны участникам коллаборации.

В третьей главе рассматривается стенд автоматизированного тестирования (САТ) end-cap модулей детектора TRT ATLAS, система газового обеспечения и климатического контроля, а так же метод и процедура тестирования.

Для обеспечения автоматизированных тестов по исследованию параметров модулей прямого направления в целом и параметров каждой строу в отдельности были разработаны и созданы 3 идентичные тест-станции для использования в ОИЯИ, ПИЯФ (Гатчина) и ЦЕРН [4]. В состав оборудования входили механические элементы, источники гамма-излучения ^{55}Fe требуемой активности, регистрирующая электроника и программное обеспечение, мониторный счетчик (МС), системы газового обеспечения и высокостабильные источники низко- и высоковольтного напряжения.

Тестируемый модуль кольцевого детектора, состоящий из двух 4-слойных субмодулей, содержит 8 слоев по 768 радиально расположенных каптоновых ТДТ с толщиной стенки около 70 мкм. Между слоями трубок располагаются радиаторы переходного излучения, содержащие по 34 слоя полипропилена толщиной 15 мкм. При тестировании детекторов использовалась газовая смесь – ArCO_2 (70%30%).

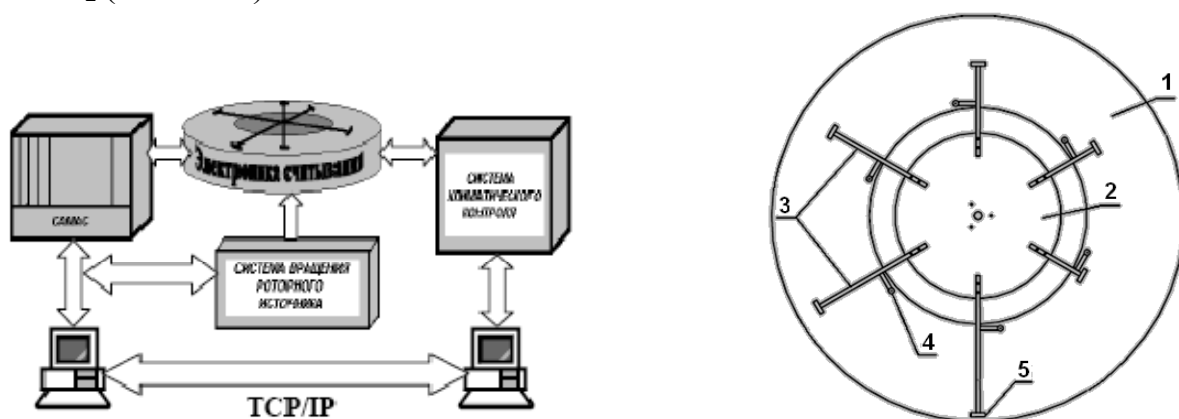


Рис. 7. Слева - блок-схема стенда тестирования кольцевых модулей TRT. Справа – роторный держатель источников γ -квантов, расположенный на тестируемом модуле. **1** – тестируемый модуль; **2** – ротор; **3** – держатель источников; **4** – референсные источники ^{55}Fe ; **5** – основные источники ^{55}Fe .

Коллимированные источники располагались на радиальных держателях в различной позиции по радиусу модуля на так называемом «роторе» и облучали по 8 ТДТ каждого из 4-х ближайших слоев. Сигналы со считывающей тестовой электроники модуля передаются на интерфейсные модули и АЦП (рис.7). Управление обеспечивается персональным компьютером через Microcomputer Crate Controller, программное обеспечение написано на языке программирования – LabView. Перед началом тестирования каждого модуля проводится калибровка всех каналов считывающей электроники. Эти данные

используются при наборе спектров во время тестирования и при последующей обработке.

Из-за большой толщины модуля отношение интенсивностей облучения трубок первого слоя к трубкам четвертого слоя составляло величину ~ 35 , что ограничивало количество одновременно тестируемых слоев. Поэтому тестирование восьмислойных модулей проводилось в два этапа. Каждый держатель ротора на одинаковом расстоянии по радиусу содержит референсный источник Fe^{55} , служащий для контроля за возможными систематическими изменениями амплитуд сигналов и их коррекции. Проводились измерения каждой ТДТ и результаты поступали в базу данных для последующего анализа. Общее измерительное время каждого этапа тестирования составляло около 40 часов.

Газовая система собрана из материалов и компонентов высокой чистоты (не содержащих масел и Si), обеспечивает подачу газовой смеси потоком, соответствующим одной смене объема газа в восьмислойном модуле в час ($\sim 30-40$ л/час). Предусмотрена также низкоскоростная ($\sim 0,1$ л/час) линия подачи газовой смеси для продува мониторинговых счетчиков.

При тестировании измерялось отклонение величины газового усиления ТДТ вызываемое ее искривлением или провисанием анодной проволоки. При локальном изменении газового усиления на величину 9% и более - ТДТ отключалась по высокому напряжению. Заметим, что величина в 8,2% соответствует отклонению анодной проволоки от центра на 0,4 мм.

Процедура измерений состояла в получении спектров сигналов от ^{55}Fe в 6 позициях по длине анода каждой ТДТ и сравнения амплитуд и ширин распределений с эталонными значениями. Прямолинейность ТДТ характеризует величина D , определяемая как:

$$D = \frac{\Delta A}{A} = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{cp}}, \text{ где } A_{cp} = \frac{A_{\text{вх}} + A_{\text{вых}}}{2},$$

а A_{\max} , A_{\min} - максимальное и минимальное значение амплитуд сигнала, измеренного в нескольких точках по длине строу, $A_{\text{вх}}$ и $A_{\text{вых}}$ - амплитуды сигнала, измеренные в начале и в конце строу по направлению газового потока.

Для исключения влияния климатических условий использовалось нормирование к контрольным строу. Изменение амплитуды из-за атмосферного давления и температуры определяется формулой:

$$\Delta A/A = k(\Delta T/T - \Delta P/P) = k\Delta\rho/\rho,$$

где ρ - плотность газа. Следовательно, изменение амплитуды из-за температурных флуктуаций может быть написано как

$$A = A_0(1 + \xi\Delta T).$$

Эти изменения одинаковы для измеряемой и контрольной трубок. Поэтому после нормировки к контрольной ТДТ, влияние температуры и давления на изменение амплитуды исключается, измерительная точность при этом лучше 1%. Интервалы между измерением одной и той же ТДТ в разных точках по ее длине составляет $\sim 7-8$ часов, что делает вероятным изменения в помещении температуры и атмосферного давления. Соответственно, необходимо

обеспечить САТ системой климатического контроля с записью данных на РС для последующей обработки и внесения коррекции.

Для климатического контроля (Slow-Control) используются 8 температурных датчиков, расположенных по наружному и внутреннему диаметру кольцевого модуля TRT end-cap в непосредственной близости от него, датчик атмосферного давления и датчик влажности. Система управляется отдельным компьютером, который по TCP/IP постоянно передает данные с датчиков на компьютер сбора данных. В дальнейшем, в систему Slow-Control была добавлена функция управления электронными ротаметрами для поддержания постоянных значений парциальных давлений составляющих газовой смеси.

В четвертой главе приведены результаты проверки газовой системы САТ на ее чистоту и возможность использования для финального тестирования модулей TRT ATLAS, а также приведены итоговые результаты тестирования модулей.

До начала проведения автоматизированного тестирования собранных модулей были изучены параметры отдельных подсистем. Необходимость обеспечения измерительной точности величины газового усиления ТДТ не хуже 1% требовало высокую стабильность состава рабочего газа и коррекцию отдельных элементов газовой системы на возможные вариации параметров окружающей среды. Проверка проводилась с помощью мониторингового детектора. Изменения температуры и давления приводят к различному изменению потоков составляющих газовой смеси, что изменяет их парциальное давление. Результаты тестирования указали на необходимость замены стандартных ротаметров на электронные, автоматически корректирующие величины протока с изменением температуры и давления. Использование электронных ротаметров BRONKHORST, управляемых системой климат-контроля через РС показало высокую стабильность газовой смеси.

Для внесения дополнительных поправок в результаты тестирования модулей TRT учитывалось время отклика величины газового усиления строу на изменение температуры и/или давления. С этой целью были проведены измерения временной задержки изменения газового усиления на резкое изменение температуры в помещении.

Суммарный объем газовой магистрали и монитора составляет 199,6 см³. При продуве газовой смесью 500 см³/час (8,33 см³/мин), смена одного объема в системе происходит за ~ 23 мин. При постоянном атмосферном давлении была резко изменена температура в газовой системе. Приведенные на рис. 8 зависимости изменения амплитуды сигналов монитора (кривая 1) и температурная зависимость (кривая 2) показали, что эффект резкого изменения температуры проявляется после смены одного суммарного объема газовой системы и детектора, в данном случае через 23,5 минуты.

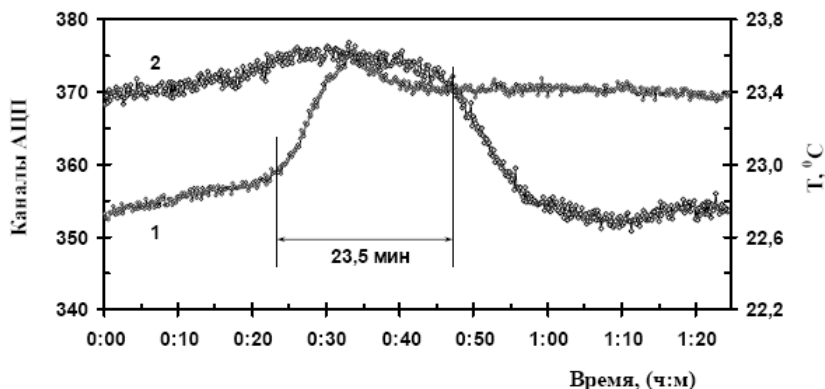


Рис. 8. Отклик амплитуды сигнала (кривая 2) на изменение температуры (кривая 1).

Были измерены коэффициенты отклика амплитуды сигналов на изменения давления окружающей среды и температуры САТ. На рис. 9 представлены зависимости изменения давления во времени (кривая Р) и амплитуды (кривая А), сдвинутой по временной оси на среднюю величину временной задержки, измеренную ранее. Как видно, с понижением давления, амплитуда сигналов возрастает и величина коэффициента k_p равна 0,66%/1 мБар. С понижением температуры амплитуда сигналов уменьшается, величина коэффициента k_T , равная изменению величины сигналов на 1°C составляла величину 6,24% при использовании стандартных ротаметров, не отслеживающих своевременно температурные изменения. После замены обычных ротаметров на электронные, значение коэффициента k_T составило величину 2,8% на 1°C.

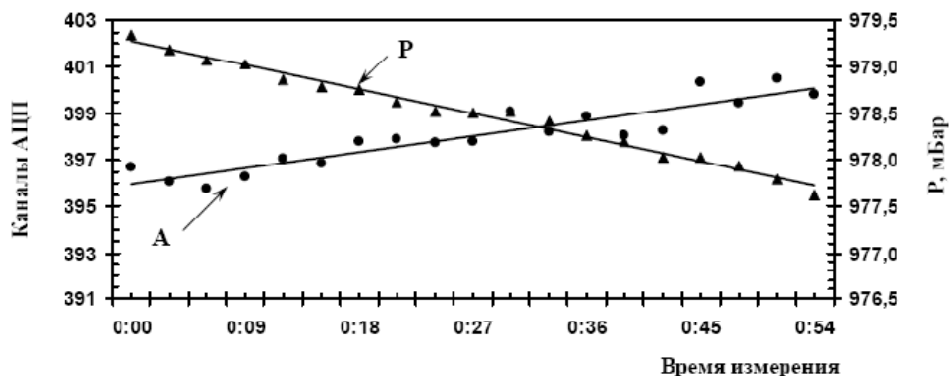


Рис.9. Распределение амплитуды сигнала и давления, амплитуда сдвинута по оси времени на 23,5 минуты.

Эффекты радиационного старения детекторов существенно зависят как от их внутренней чистоты, обеспечиваемой в процессе сборки, так и чистотой используемых газовых смесей, а следовательно используемой газовой системы. Для проверки чистоты газовой системы использовался мониторный детектор, в котором две идентичные ТДТ облучались источником γ -квантов ^{55}Fe в течение 580 часов. Использовалась газовая смесь $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ (63/27/10) при скорости продува – 0,1 л/час. Одна строу облучалась γ -квантами при интенсивности облучения 5,5 кГц/мм (область засветки составляла ~ 3 мм по длине строу), вторая – референсная трубка облучалась другим источником с частотой 100 Гц/мм (область засветки ~ 8 мм). По относительному изменению амплитуды сигналов с этих строу во времени (A/A_R , где А – амплитуда строу “горячего”

облучения, A_R – амплитуда референсного строу) определялось отсутствие или степень наличия эффекта старения строу. При тестировании контролировались и записывались все параметры окружающей среды.

На рис. 10 приведены результаты сканирования “горячей” строу до облучения (1) и после ее облучения (2). В результате тестирования строу видно изменение амплитуды сигнала на 2,2% в облучаемой области, выделенной на рисунке пунктиром, что свидетельствует о наличии небольшого эффекта старения, находящегося в пределах допустимого. Доза облучения при этом составляла ~ 10 мРад, а суммарный накопленный заряд 8 К/см, что соответствует расчетным значениям при работе детекторов TRT ATLAS в течение 10 лет на LHC.

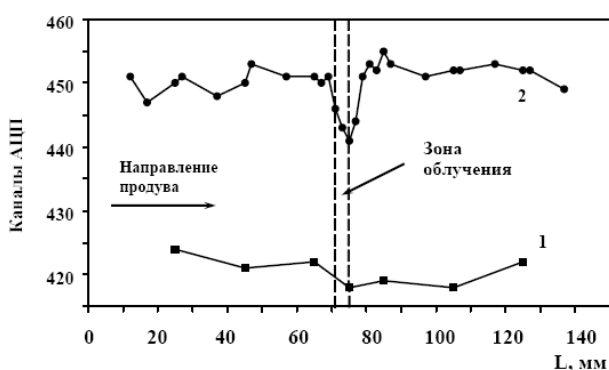


Рис.10. Изменение амплитуды сигналов с “горячей” строу до ее облучения (1) и после (2).

На рис. 11 приведены типичные спектры от источника ^{55}Fe в разных точках по длине прямой и изогнутой трубок (правые и левые распределения, соответственно), полученные при тестировании модулей TRT детекторов. Видно ухудшение энергетического разрешения в центре правой трубки. Подобные изменения энергетического разрешения, вызываемые изменением локальной величины газового усиления, наблюдаются при большом смещении анодной проволоки от центра строу, а так же при искривлении или деформации стенок строу, т.е. катода.

На рис. 12 представлены послойные распределения величин D по результатам тестирования 17 модулей TRT. Итоговые результаты приведены в таблице 3. Эти распределения всех измеренных строу по слоям, показывают некоторое уменьшение ширины распределений от первого слоя к четвертому, что связано со схемой установки анодных проволок в строу. Проволоки устанавливаются по слоям, начиная с 1-го при среднем их натяжении - 68 грамм. Их установка в каждый последующий слой приводит к небольшой деформации субмодуля и, соответственно, к небольшому изменению натяжения проволок в предыдущем слое, что сказывается на послойном распределении величины D.

Таблица 3. Итоговые результаты тестирования модулей

Количество строу	Количество отключенных каналов, %	D, %			
		< 5 %	5-8 %	8-9 %	> 9 %
104448	0,15	93,8 %	5,9 %	0,12 %	0,05 %

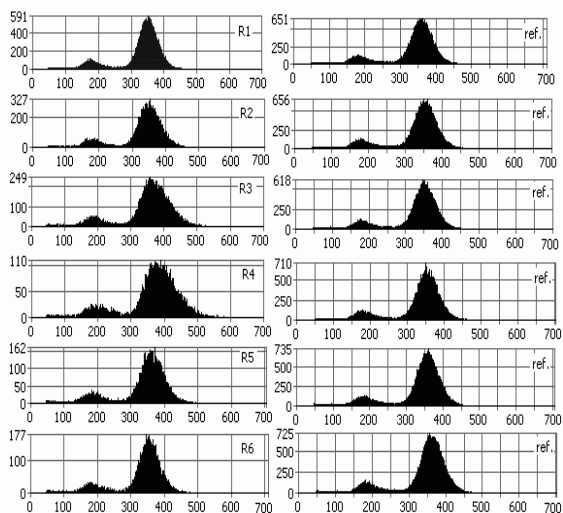


Рис.11. Спектры от ^{55}Fe в 6 точках измерения по длине (слева) искривленной строу и спектры с референсной строу (справа). Параметр эксцентриситета строу $D = 11,4\%$.

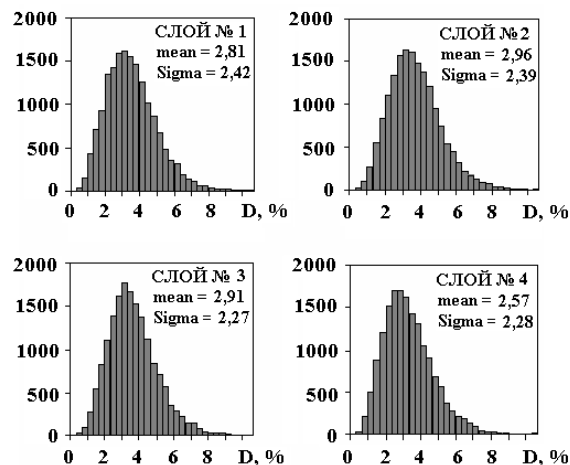


Рис.12. Распределение величин D для 104448 строу по слоям в submodule TRT.

По итогам тестирований отключаются от высоковольтного напряжения строу с неоднородностью газового усиления D более 9% (450 мкм), строу с обрывом анодных проволок и с величиной натяжения анодных проволок $50 < T < 90$ грамм, а также строу с отсутствием сигналов по другим различным причинам. Наиболее часто это определялось плохой передачей сигналов с анода строу к считывающей электронике по многослойным каптоновым платам из-за нарушения металлизации токопроводящих соединений между слоями. Реже встречались отказы размещенных на платах элементов.

В пятой главе описывается метод создания сегментных ТДТ [5], их конструкция и основные параметры.

Высоко-гранулированные координатные строу детекторы большой площади с малой радиационной толщиной и высокой радиационной стойкостью представляют интерес для создаваемых установок современных ускорителей. Разработка ТДТ больших длин с многосегментными анодами, обеспечивающими считывание информации с электрически независимых сегментов через стенку, позволяет обеспечить необходимую величину загрузки в каждом локальном детектирующем элементе по всей площади большого детектора путем оптимизации длин сегментов.

Для изготовления многосегментных анодов был создан стенд и разработана методика их изготовления. В капиллярную стеклянную трубку длиной $6-7 \text{ мм}$, с наружным диаметром $0,25 \text{ мм}$ и внутренним диаметром $0,1 \text{ мм}$ впаиваются две анодные проволоки, разделяемые одна от другой расплавленной перемычкой (рис. 13. а, б, в, г). Вес капиллярной трубки из боросиликатного стекла составляет $0,094 \text{ мг}$ на один мм ее длины, т.е. пренебрежимо мал.

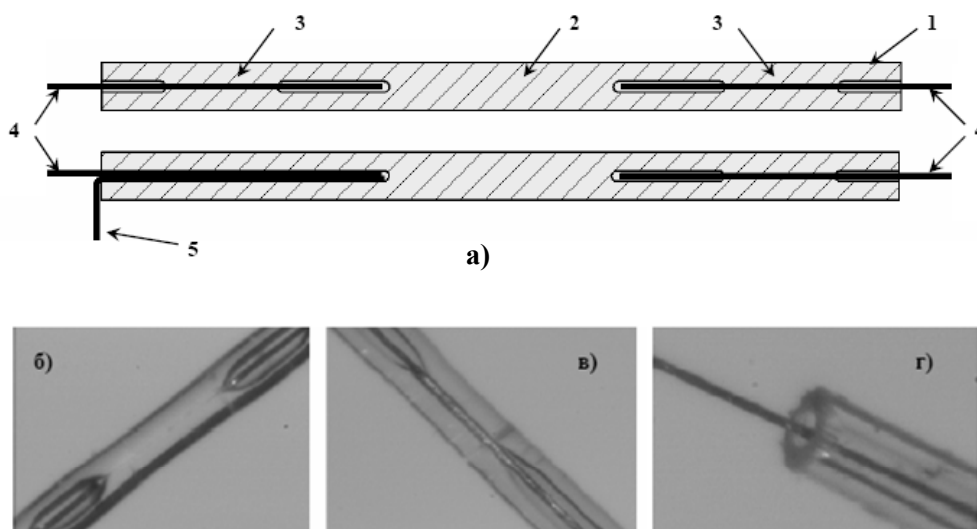


Рис.13. **а** - капиллярная трубка – (1), изоляционная перемычка – (2), место впаивания проволок – (3), анодные проволоки (4) и дополнительная контактная проволока (5) из золоченого вольфрама диаметром 30 мкм; фотографии капиллярных трубок с анодной проволокой, сделанные при помощи микроскопа: **б** – центральная перемычка; **в** – место впаивания проволоки; **г** – торец капиллярной трубки с анодной проволокой.

Концепция создания строу с многосегментным анодом представлена на примере строу с тремя анодными сегментами (рис.14). Собранный многосегментный анод вставляется в строу и фиксируется в концевых втулках. Считывание информации с крайних анодных сегментов осуществляется с концов строу. Информация с центрального сегмента считывается по контактной проволоке, проходящей через спейсер, поддерживающий капиллярную трубку, и отверстие в стенке строу.

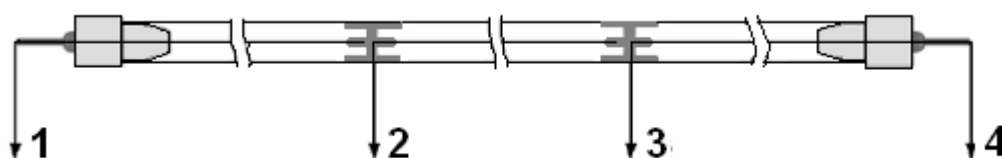


Рис.14. Строу диаметром 4 мм с тремя анодными сегментами. С левого и центрального сегмента информация считывается по выходам 1 и 2, соответственно. С правого сегмента считывание может осуществляться или с выхода 3, или с выхода 4.

При сборке сегментных анодов некоторые капиллярные трубки объединяются со спейсерами из поликарбоната, образуя "спейсерные узлы", не мешающие свободному прохождению газа вдоль строу. Аноды устанавливаются в строу при натяжении 70 грамм, контактные проволоки через спейсерные узлы выводятся наружу через окна размером $\sim 2 \times 1,5$ мм. После тестирования по всем каналам считывания, каждая строу герметизируется.

Было собрано и проверено несколько строу, аналогичных приведенной на рис.14. Три анодных сегмента этих строу имели длину ~ 185 , 100 и 180 мм. Исследуемая строу продувалась газовой смесью Ar/CO_2 (70/30) и облучалась γ -квантами от источника ^{55}Fe через щелевой коллиматор, расположенный

перпендикулярно аноду строу. Ширина пучка гамма квантов в медианной плоскости строу составляла ~ 1 мм. Значения величин амплитуд сигналов регистрируемых с соответствующих сегментов показаны на рис.15.

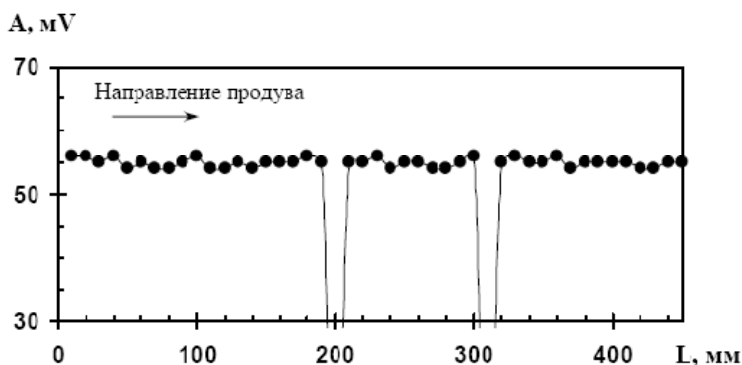


Рис.15. Однородность величин сигналов вдоль строу при фиксированном напряжении.

Среднее отклонение амплитуд сигналов D , составило не более 3%. Сканирование области спейсерных узлов щелевым коллимированным источником показало, что при использовании капиллярной трубки длиной 7 мм и спейсера диаметром 3,95 мм и длиной 4,15 мм неэффективная длина строу составляет $\sim 7,2$ мм. Радиационная толщина этой зоны не более $0,4\%X_0$.

На рис.16 показана неэффективность в области спейсерного узла. Проверка отдельных строу с тремя анодными сегментами показали нормальную их работу на газовой смеси $AgCO_2$ в диапазоне газового усиления до 10^5 , при этом не наблюдалось разрядов между какими-либо элементами, находящимися под анод-катодным потенциалами.

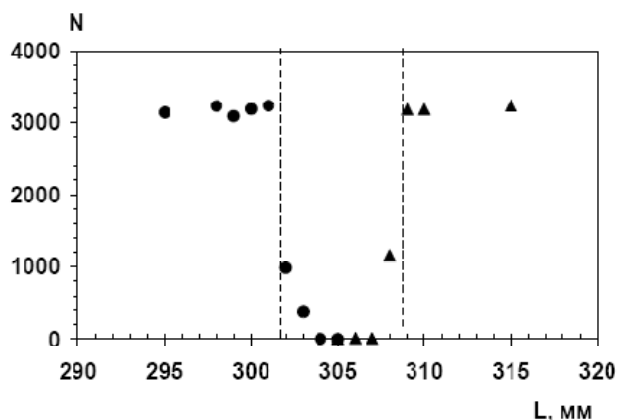


Рис.16. Область неэффективности строу по ее длине в районе спейсерного узла.

Для проверки практической возможности создания строу детекторов с большим числом анодных сегментов был создан прототип из 19 строу диаметром 4 мм и длиной 50 см. В 10 строу верхнего слоя были установлены четырехсегментные аноды, из 9 строу второго слоя - пять строу имели обычные односегментные аноды и 4 строу содержали трехсегментные аноды. Всего прототип из 19 строу имел 57 каналов считывания. Сопротивление контактов между анодной и контактной проволоками, ввиду малости их величины (менее 1 Ом), не оказывает влияния на регистрируемые сигналы.

Проверка прототипа по всем каналам регистрации показала хорошую идентичность сигналов при тождественных параметрах высоковольтного

напряжения, температуры окружающей среды и парциального давления газовой смеси.

Выполненные исследования показали возможность сборки много-сегментных анодов, установку их в строу с последующим выводом контактных проволок через стенки строу, а так же предварительную проверку каналов считывания с заменой плохо работающих анодов и последующую герметизацию строу. На принцип создания трековых детекторов на основе многосегментных строу была подана заявка на изобретение и получен патент [6].

Основные результаты и выводы

1. Изучены конструктивные и механические свойства тонкостенных дрейфовых трубок с использованием пленок различных типов.

2. Проведены исследования амплитудных и временных характеристик ТДТ при использовании различных добавок в рабочую газовую смесь. Измерены загрузочные способности ТДТ. Результаты исследований легли в основу разработки и создания строу-трекера для экспериментов ATLAS.

3. Измерены коэффициенты влияния температуры и давления на газовое усиление в ТДТ, используемые в дальнейшем в системе стабилизации газового усиления TRT ATLAS.

4. Разработана и создана станция автоматического тестирования модулей TRT-детекторов установки ATLAS LHC. Протестированы все модули, результаты тестов показали работоспособность 99,84% каналов считывания.

5. С целью повышения гранулированности строу был предложен и опробован метод создания ТДТ с многосегментным анодом. На принцип создания трековых детекторов на основе многосегментных строу был получен патент на изобретение.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- 1 V.M.Lutsenko, V.V.Myalkovsky, V.D.Peshekhonov, "Time-amplitude characteristics of thin-walled drift tubes (straw) for gas mixtures ArCO₂ with additives CF₄ and O₂", Phys.Part.Nucl.Lett.3:273-279, 2006.
- 2 I.A.Zhukov, ..., V.Mialkovski, et al., "Study of rate capability of the thin-film drift tubes (straws)", JINR-P13-2005-126, 2005.
- 3 Ю.В.Гусаков, ..., В.В.Мялковский и др., "Детектор переходного излучения – трекер установки АТЛАС: исследования и разработки, массовое производство модулей типа «В»", JINR-P13-2008-85.
- 4 Yu.V. Gusakov, ..., V.V. Myalkovsky et al., "Automated stand check of 'B' type TRT ATLAS wheel straw detectors", Phys.Part.Nucl.Lett. 3: 206-210, 2006.
- 5 V. I. Davkov, ..., V.V. Myalkovsky et al., "Development of High Granulated Straw Chambers of Large Sizes", Phys.Part.Nucl.Lett.4:323-326, 2007.
- 6 Мялковский В.В., Пешехонов В.Д., Савенков А.А., "Координатный газонаполненный детектор излучения", патент на изобретение РФ № 2339053, (2008).