



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2012–13

На правах рукописи

Кожин Анатолий Сергеевич

**Разработка трековых систем большой площади
на основе дрейфовых камер для экспериментов
в физике высоких энергий**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Протвино 2012

УДК 539.1.074

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.М. Гришин (ФИАН), доктор физико-математических наук В.Н. Беляев (МИФИ), доктор физико-математических наук В.И. Крышкин (ОЭФ, ИФВЭ).

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2012 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2012

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В физике высоких энергий есть два класса крупномасштабных экспериментальных установок, где необходимо обеспечить измерение координат треков ионизирующих частиц на большой площади: коллайдерные и нейтринные детекторы.

Из-за малости сечения взаимодействия нейтрино с веществом ($\frac{\sigma_\nu}{E_\nu} \sim 0.7 \cdot 10^{-38} \text{ см}^2/\text{ГэВ}$) и больших поперечных размеров нейтринных пучков, создаваемых на ускорителях, универсальные нейтринные детекторы, ориентированные на широкий круг задач, должны быть массивными, с большими размерами, соответственно, с большой площадью трековых систем.

Измерение импульса мюона в коллайдерных детекторах может быть осуществлено центральной трековой системой, но в ТэВ-ной области энергий, особенно для адронных коллайдеров, возможности центральной трековой системы для определения импульса мюона заметно снижаются, в этом случае задача возлагается на внешние, периферийные части установок, что, естественно, требует большой рабочей поверхности трековой системы.

Как в случае нейтринных детекторов, так и коллайдерных вопрос идет о создании систем, обеспечивающих измерение координат

треков заряженных частиц с точностью не хуже 1 мм на площади порядка 10^3 м². При современном состоянии экспериментальной техники эту задачу можно решить только с применением дрейфовых камер.

Дрейфовые камеры пришли в практику экспериментов на ускорителях заряженных частиц и в исследования космических лучей в конце 70-х годах прошлого века вслед за многопроволочными пропорциональными камерами. Основное достоинство их – возможность измерения координат треков заряженных частиц с точностью существенно лучшей, чем расстояние между детектирующими элементами (сигнальными проволоками). Это свойство и облегчает возможность создания крупномасштабных установок.

Экспериментальные установки такого класса, как нейтринные и коллайдерные детекторы, проектируются и создаются довольно долго, сроки разработки и реализации проектов доходят до 10 лет, такого же порядка и период их эксплуатации. Дрейфовые камеры, используемые в таких установках, должны быть долговечными, со временем жизни никак не менее 15-20 лет.

Предлагаемая к защите диссертация посвящена разработке и созданию дрейфовых камер для трековых систем большой площади ($\sim 10^3$ м²), рассчитанных на длительный (не менее 15 лет) период эксплуатации. Автору данной работы посчастливилось участвовать в реализации двух крупных проектов: Нейтринный Детектор¹ ИФВЭ-ОИЯИ на 70-ГэВном ускорителе в ИФВЭ и установки АТЛАС² (Большой Адронный Коллайдер в ЦЕРНе). Выполненные в процессе этих работ исследования захватывают довольно большой хронологический период: с конца 70-х годов прошлого века до начала 2-го десятилетия 21-века. Эти исследования были направлены на оптимизацию конструкции и параметров дрейфовых камер, разработку методики их тестирования. Некоторые результаты не потеряли своего значения до сих пор, разработанные методики проверки могут быть использованы для любых проволочных детекторов.

¹Приборы и Техника Эксперимента, No.3, (2003), с. 5-20.

²**A Toroidal LHC Apparatus**, ATLAS Collaboration; **ATLAS Letter of Intent**, D.Gingrich et al, CERN/LHCC/92-4, CERN, 1992.

Целью диссертационной работы является обобщение опыта разработки, изготовления и тестирования дрейфовых камер для трековых систем большой площади в крупномасштабных установках: Нейтринном Детекторе на ускорителе У-70 в Протвино и детекторе АТЛАС (БАК в ЦЕРНе).

Научная новизна

- Впервые в практике нейтринных экспериментов на ускорителях для измерения координат треков заряженных частиц применены дрейфовые камеры векторного типа с большим (250 мм) дрейфовым промежутком и длинными (4 м) сигнальными проволоками, позволяющие в пределах одной плоскости однозначно измерять координату и угол проекции трека.
- При разработке камер для НД выполнено измерение скорости дрейфа электронов в смеси Ar-CO₂ при напряженности электрического поля до 4 кВ/см и концентрации углекислого газа до 20%; до сегодняшнего дня это наиболее полные экспериментальные данные по скорости дрейфа в указанной газовой смеси.
- Доказана возможность создания векторных дрейфовых камер на основе сигнальных проволок с попеременным смещением, определены геометрические параметры, при которых эта проволочная структура наиболее электростатически устойчива и не требует поддержек до длин порядка 6 м.
- Впервые реализована дрейфовая трубка с 4-мя дополнительными, полеформирующими проволоками, позволяющими получать квазиоднородное электрическое поле в трубе круглого сечения.
- Впервые в коллайдерном эксперименте для мюонного спектрометра создана система камер на основе прецизионных дрейфовых трубок с точностью позиционирования проволок 20 мкм, позволяющая измерять импульс мюона с разрешением $\simeq 10\%$ при энергии 1 ТэВ.

Практическая ценность

- Для координатных измерений в НД создана система дрейфовых камер с большим дрейфовым промежутком, обеспечивающая измерение координат и углов проекции треков с точностью 1 мм и 30 мрад, соответственно. При полной площади 720 м² требуется всего 1600 электронных каналов регистрации и 2 пары высоковольтных источников.
- Дрейфовая камера НД оптимизирована для работы на безопасной и дешевой смеси Ar-CO₂=94-6 при нормальном давлении с расходом 2 объема/месяц.
- В полном объеме система дрейфовых камер функционировала в НД в течение 20 лет, способствуя выполнению программы нейтринных исследований на ускорителе У-70 ИФВЭ.
- В процессе разработки и реализации камер НД были развиты методики оптимизации параметров камеры (геометрия и состав газа), измерения скорости дрейфа и диффузии электронов в газовых смесях, коэффициентов прилипания электронов к электроотрицательным примесям; все эти методы носят довольно универсальный характер и могут быть использованы при разработке любых дрейфовых камер.
- Для крепления сигнальных проволок дрейфовых камер НД был использован метод кримпирования (обжатие в медной капиллярной трубке); этот опыт был успешно применен для дрейфовых трубок АТЛАСа; на данный момент это наиболее надежный метод фиксации проволок в проволочных детекторах.
- Для калибровки соотношения время-координата в камерах НД был применен коллимированный пучок импульсного рентгеновского излучения.
- Использование коллимированного пучка импульсного рентгеновского излучения открывает много других возможностей для тестирования детекторов, в частности, контроль положения проволок в проволочных детекторах, можно также выполнять проверку зон собирания электронов на сигнальную проволоку, исследовать влияние механических деформаций на точность камер, измерять загрузочную способность камер.

- Для камер векторного типа с переменным смещением сигнальных проволок определена оптимальная, с точки зрения электростатических смещений и устойчивости, геометрия; показано, что можно реализовать камеры без поддержки сигнальных проволок при длине порядка 6 метров.
- Показано, что в круглой трубе, при помощи 4-х дополнительных проволок может быть создана область с практически однородным электрическим полем; такая дрейфовая трубка имеет линейное соотношение время-координата, обладает возможностью измерять одновременно несколько треков и имеет большую загрузочную способность по сравнению с обычной трубкой.
- Обоснован выбор материала и процедура натяжения сигнальной проволоки дрейфовой трубки, обеспечивающая долговременную стабильность натяжения.
- Разработаны методы контроля массового производства прецизионных дрейфовых трубок.
- Проведена комплексная проверка 254 (22% от полного числа) дрейфовых камер для установки АТЛАС.

Автор защищает:

- Для Нейтринного Детектора разработана, изготовлена и успешно работала система дрейфовых камер векторного типа с большим дрейфовым промежутком:
 1. выполнено исследование макетов для оптимизации рабочих параметров камеры, выработки критериев для конструкции камер и требований к электронной аппаратуре;
 2. разработана методика испытаний и проведены детальные исследования характеристик серийных камер, проверки их соответствия требованиям нейтринного эксперимента;
 3. проведена отладка, испытание и разработаны способы контроля и проверки качества информации с дрейфовых камер в нейтринном детекторе;
 4. измерены характеристики дрейфовых камер в составе нейтринного детектора.

- разработаны, изготовлены и испытаны прототипы камер для мюонных трековых систем в коллайдерных детекторах:
 1. векторных камер для АТЛАСа;
 2. дрейфовых трубок с полеформирующими проволоками для детектора SDC (SSC);
 3. баррельной мюонной камеры (ВІL) камеры для АТЛАСа;
- разработаны, изготовлены и испытаны 22% дрейфовых камер для мюонного спектрометра АТЛАС:
 1. разработана конструкция дрейфовой трубки, в частности конструкция торцевого элемента, обоснован выбор материала анодной проволоки, ее натяжения, фиксации и локализации;
 2. разработаны методы контроля для массового производства дрейфовых трубок;
 3. разработаны методы контроля сборки камер;
 4. проведен контроль параметров и сертификация собранных камер.

Основные публикации и апробация работы

Апробация диссертации прошла в ГНЦ ИФВЭ 26 марта 2012 г.

Результаты, приведенные в диссертации, докладывались на Международных конференциях [1,5,15,17], на семинарах ИФВЭ, совещаниях сотрудничества НД и АТЛАСа, опубликованы в виде статей в отечественных [11] и иностранных журналах [4,8,9,11-14,16,18-20,22]³; в виде препринтов ИФВЭ [2,3,6] и в сообщениях коллаборации АТЛАС [20]

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и приложения. Объем составляет 210 страниц, включая 161 рисунок, 26 таблиц и библиографический список из 174 названий.

³в иностранных публикациях фамилия автора встречается в двух версиях **Kozhin** и **Kojine**

Содержание работы

Во **Введении** раскрывается актуальность проблемы диссертации, сформулирована цель работы, показана научная новизна и практическая ценность результатов, представлены положения, выносимые на защиту, структура и апробация диссертации.

В **Главе 1** изложены основные принципы работы дрейфовой камеры. Глава не основана на оригинальных материалах, ее цель сделать введение в терминологию и математический аппарат, используемые впоследствии.

Глава 2 посвящена дрейфовым камерам Нейтринного Детектора (НД), в частности методическим исследованиям при их разработке [1-3], испытаниям серийных камер и использованию камер в детекторе [4,5].

Нейтринный детектор был создан для исследования широкого спектра задач на пучках нейтрино ($E_\nu = 1 \div 30$ ГэВ) на ускорителе У-70 ИФВЭ. Задача трековых приборов в этом детекторе: совместно с магнитной системой определение знака и импульса мюонов, определение координат вершины нейтринного взаимодействия, угла адронной струи и детальный анализ нейтринных взаимодействий с малой множественностью. В силу массивности детектора и малых энергий регистрируемых продуктов нейтринных взаимодействий требования на координатное разрешение весьма умеренные – ~ 1 мм. Но для исследования таких процессов, как, например, квазиупругое рассеяние нейтрино ($\nu_\mu n \rightarrow \mu p$), необходимо хорошее двухтрековое разрешение и возможность регистрации короткопробежных частиц под большими углами. Компоновка модуля мишенной части детектора показана на рис.1, где 1(3) – взаимно ортогональные плоскости дрейфовых камер, 2 – рама электромагнита, 4 – жидкостные (уайт-спирит, C_2H_{2n+2} , $\langle n \rangle = 10$) сцинтилляционные счетчики.

В качестве базового элемента для трековой системы НД была выбрана дрейфовая камера с большим дрейфовым промежутком и многопроводочным сигнальным элементом⁴ (рис.1). Проведен комплекс методических исследований, на основании которых были определе-

⁴Иногда именуется как jet-cell, векторная камера

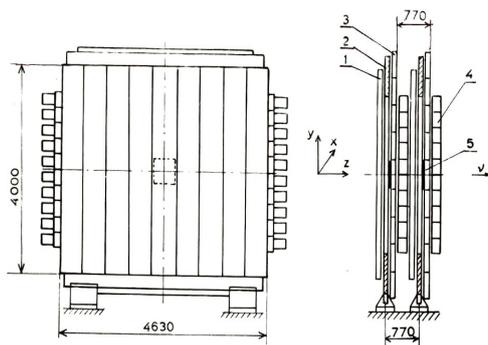


Рис. 1. Компонка модуля мишени нейтринной части нейтринного детектора

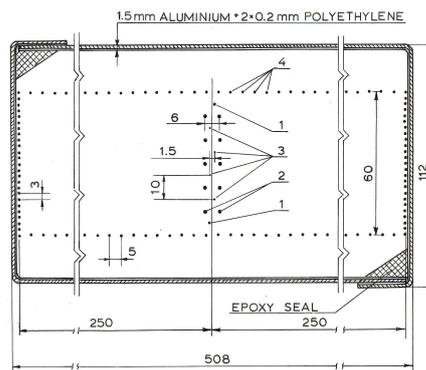
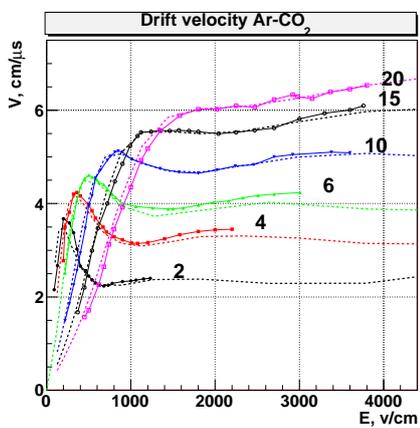
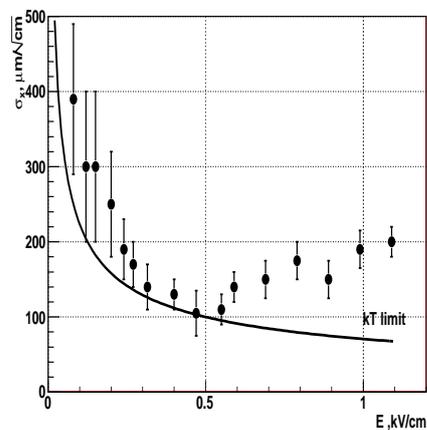


Рис. 2. Схема поперечного сечения дрейфовой камеры НД



а)



б)

Рис. 3. Скорость дрейфа электронов в смеси $Ar-CO_2$ (а) и коэффициент диффузии электронов в смеси $Ar-CO_2=94-6$ (б) при нормальных условиях

ны основные параметры камеры, газовая смесь и оптимизирована рабочая точка. В результате выкристаллизовалась конструкция камеры, поперечный разрез которой показан на рис.2 (1 – охранные, 2 – катодные, 3 – сигнальные, 4 – полеформирующие проволоки). Камера имеет 4 сигнальных проволоки, попеременно смещенные на ± 0.75 мм относительно центра в направлении дрейфа. Справа и слева располагаются дрейфовые промежутки шириной 250 мм. Полная длина камеры 4 м, нет поддерживающих элементов проволок. Камера оптимизирована для работы с газовой смесью $Ag-CO_2=94-6$ при небольшом избыточном давлении (≤ 30 мм рт.ст.) и напряженности электрического поля в дрейфовом промежутке около 500 В/см. Оптимизация проведена на основании измерения скорости дрейфа электронов в $Ag-CO_2$ (рис.3(а), цифры у кривых – концентрация CO_2 в %, пунктирные кривые – расчет.). При выборе напряженности электрического поля и концентрации углекислого газа мы действовали вопреки установившемуся правилу обеспечения ”насыщения” скорости дрейфа, существенно выиграв в рабочем напряжении камеры. Вклад диффузии в разрешение при этом составляет около $100 \text{ мкм/см}^{1/2}$ (рис.3,б).

Детальное исследование, выполненное на специальном стенде, показало, что параметры первых, серийно изготовленных камер адекватны требованиям НД. Координатное разрешение отдельной сигнальной проволоки показано на рис.4. Камера способна регистрировать треки с углом до 70° относительно нормали к плоскости камеры, систематические поправки учитываются по показаниям самой камеры. Координатное разрешение камеры в целом не хуже 1 мм для перпендикулярных треков, и около 3 мм для треков с углом в 70° . Угловое разрешение составляет около 30 мрад и практически не зависит от углов наклона треков, эффективность разрешения левоправой неоднозначности 98.5% ($|\theta| \leq 40^\circ$) и 80% ($|\theta| = 70^\circ$). Разрешение 2-х соседних треков составляет 3.5 мм. Плато по эффективности для потенциала катодных проволок – 130-230 В. Отклонение от линейности соотношения время-координата, измеренное при помощи импульсного пучка рентгеновского излучения, не превосходит 1 мм, и затрагивает область 10-15 мм вблизи сигнальных проволок.

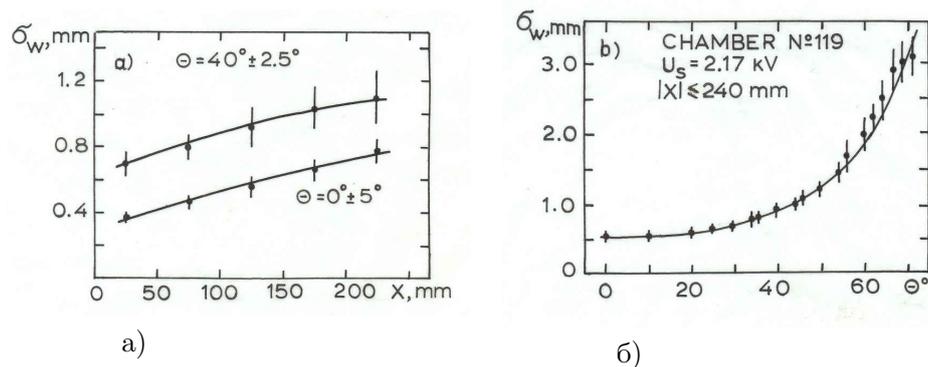


Рис. 4. Разрешение проволоки в зависимости: а) от координаты и б) от угла наклона трека относительно нормали к камере

В опытно-экспериментальном производстве ИФВЭ было освоено изготовление этих камер и около 500 камер произведено в 1981-1984 г. В НД камеры были сгруппированы в 40 плоскостей, по 9 камер в каждой плоскости (рис.1), с суммарной площадью около 720 кв. метров. При этом использовалось 1432 канала электроники, обеспечивающей усиление сигналов с камер и измерение временных интервалов в диапазоне до 82 мксек с точностью 10 нсек. Вся система камер обслуживалась всего двумя парами высоковольтных источников питания. Расход газовой смеси – 1 объем (75 м^3) за 15 суток.

Таким образом, для крупнейшей экспериментальной установки на ускорителе У-70 в Протвино – Нейтринного Детектора ИФВЭ-ОИЯИ – была разработана, изготовлена и успешно эксплуатировалась система дрейфовых камер векторного типа с 4-мя сигнальными проволоками в одном большом (± 250 мм) дрейфовом промежутке. В отдельной камере однозначно, без привлечения информации из других координатных плоскостей, измеряется координата и угол проекции трека. В качестве иллюстрации на рис.5 приведены примеры on-line реконструкции мюона и нейтринного взаимодействия.

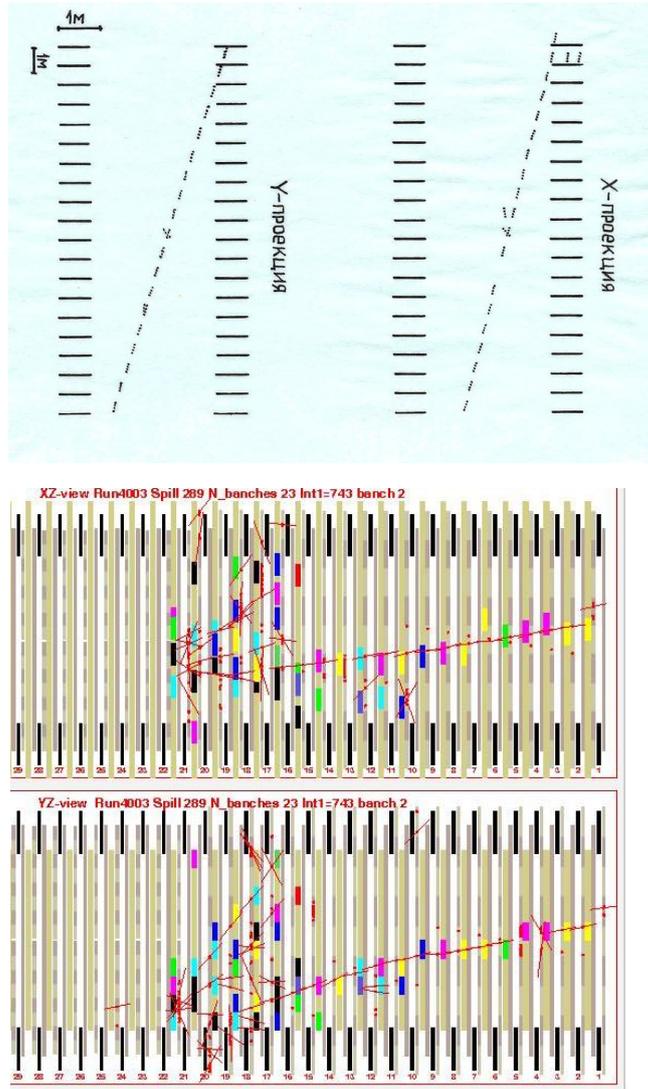


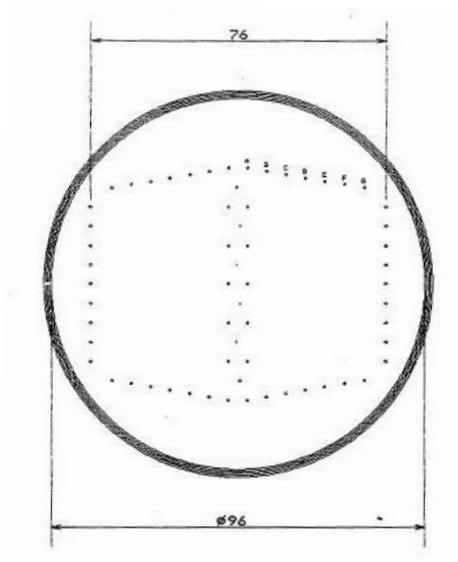
Рис. 5. Пример on-line реконструкции трека мюона и нейтринного взаимодействия в Нейтринном Детекторе

Большой объем исследований, выполненный на ранних стадиях изготовления системы камер, послужил основанием для разработки камер и отдельных элементов системы. Тщательно измеренные характеристики серийных камер создали базу для написания программ моделирования и обработки данных с детектора. На основании проведенных исследований были выработаны методики проверки изготовленных камер и их сертификации. В результате была получена экономичная, долговечная система камер, ставшая первым функциональным работающим элементом нейтринного детектора, позволившим выполнить важные работы по исследованию фоновых условий в зоне детектора уже в момент его создания, что в немалой степени способствовало дальнейшей успешной работе установки. В полном объеме система проработала около 20 лет, сохраняя все свои параметры.

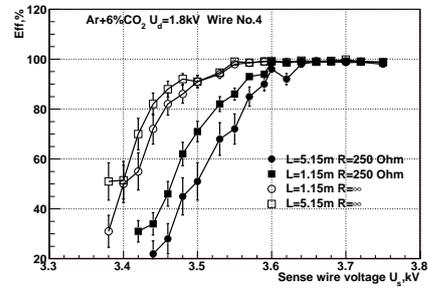
В **Главе 3** представлены варианты прототипных камер [6-12], которые разрабатывались для координатных систем мюонных спектрометров в установках SDC(SSC)⁵ и ATLAS(LHC). Для ATLASа разработано, изготовлено и испытано два варианта векторных камер. Первый вариант был развитием идеологии дрейфовых камер НД: длинные проволоки и отсутствие поддержек. Были выполнены специальные исследования по оптимизации структуры сигнального элемента, что позволило создать устойчивую проволочную конфигурацию с минимальными электростатическими смещениями длиной 6 м. По техническим причинам камера была реализована в круглой трубе (рис.6). Камера имела 4 сигнальных проволоки с попеременным смещением ± 0.3 мм, получено разрешение около 200 мкм, плато эффективности $\simeq 150$ В. Исследована возможность измерения координаты вдоль проволоки по времени распространения сигнала, измерены смещения проволок при деформации трубы. Достигнуты вполне приличные характеристики, имелись резервы для улучшения разрешения за счет более совершенного усилителя.

Второй вариант векторной камеры для ATLASа имел другую проволочную структуру (рис.7), с чередующимися потенциальными

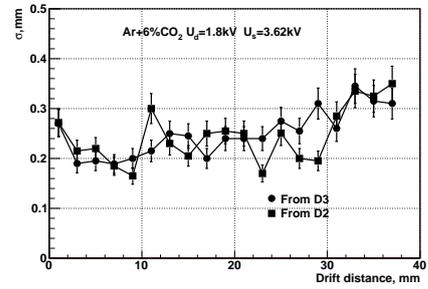
⁵Solenoidal Detector Collaboration, SDC Technical Design Report. – SDC Note 92-2001, SSCL-SR-1215 (April 1992).



а)



б)



в)

Рис. 6. Дрейфовая камера в трубе: схема поперечного сечения (а), эффективность (б) и координатное разрешение отдельной сигнальной проволоки (в)

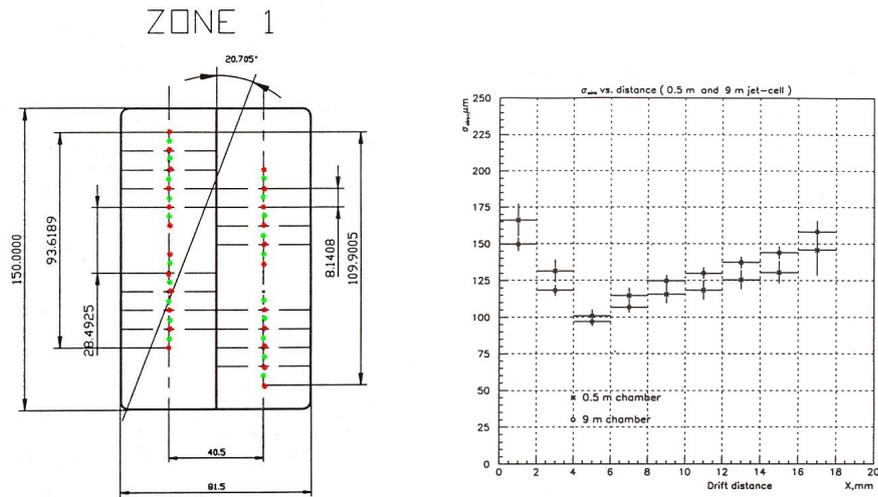


Рис. 7. Схема векторной камера с двойной ячейкой (слева) и координатное разрешение отдельной проволоки (справа)

и сигнальными проволоками, в одном объеме объединялись две ячейки камеры. Структура неравновесная, проволоки поддерживаются через 1 м. Испытаны камеры длиной 0.9, 4.6(9 камер) и 9 метров. Получено разрешение около 120 мкм. Камера входила в число трех основных опций трекового детектора для мюонного спектрометра АТЛАСа, но была отвергнута, один из аргументов против – дороговизна поддерживающей платформы (сотовый материал на основе ориентированного угле-пластика (с углеродными волокнами)).

Для мюонного спектрометра SDC была предложена трубка с 4-мя полеформирующими проволоками (рис.8), которые позволяют в трубе круглого сечения получить однородное поле, похожее на поле в обычных планарных дрейфовых камерах с распределенным потенциалом. Благодаря этому, удастся обойти серьезные недостатки обычных дрейфовых трубок, которые имеют низкую напряженность электрического поля вдали от анодной проволоки. В дрейфовой трубке с полеформирующими проволоками улучшается линейность соотношения время-координата, получают короткие сигналы, повышается

быстродействие и появляется возможность регистрировать несколько одновременно проходящих треков. При испытаниях на пучке получено разрешение ≈ 150 мкм, сравнимое с разрешением оригинальных детекторов SDC, изготовленных из труб специального профиля. Исследовано влияние деформаций длиной (7.4 м) дрейфовой трубки с 4-мя полеформирующими проволоками на смещение проволок.

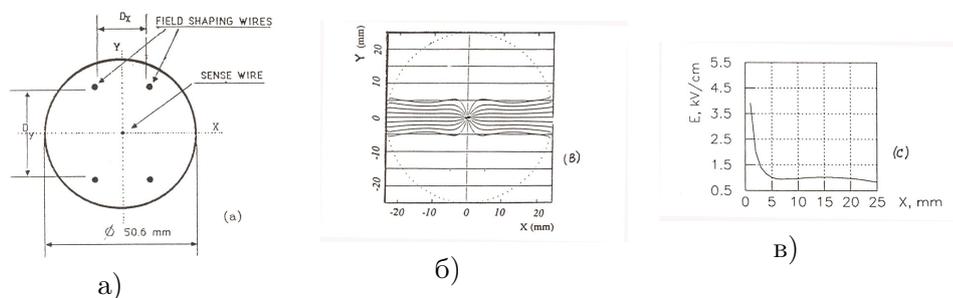


Рис. 8. Дрейфовая трубка с 4-мя полеформирующими проволоками: схема поперечного сечения (а), линии дрейф электронов (б), напряженность электрического поля при $Y=0$ (в)

В этой же главе описан прототип камеры (BIL, Barrel Inner Large), созданный уже после выбора базового трекового детектора для мюонного спектрометра АТЛАСа - МДТ (Monitored Drift Tube). Этот прототип фактически был полномасштабной камерой. Состоял из 2-х суперслоев (по 3 слоя в каждом, 32 трубки/слой) 30-мм дрейфовых трубок длиной 2544 мм. В камере были опробованы многие идеи и технические решения, которые впоследствии легли в основу серийных камер для АТЛАСа:

1. позиционирование сигнальной проволоки при помощи точного отверстия, пробитого лазерным лучом в тонкой пластинке;
2. фиксация сигнальной проволоки при помощи кримпирования (обжимания) в медной капиллярной трубке;

3. фиксация торцевого элемента при помощи кримпирования (обжимания) газом высокого давления алюминиевой трубы и уплотнение с помощью резиновой прокладки;
4. измерение положения проволоки в трубке при помощи импульсного рентгеновского излучения (короткий импульс, высокая скважность и малые энергии – все это существенно ослабляет мероприятия по радиационной безопасности);
5. высоковольтная проверка посредством измерения тока в трубке, заполненной воздухом при атмосферном давлении;
6. контроль натяжения проволоки по резонансной частоте ее колебаний в магнитном поле, колебания возбуждаются импульсом тока;
7. послойная склейка камеры;
8. шаг трубок в слое при склейке задается "гребенкой" из вклеенных шариков, тиражирование таких "гребенок" при помощи одного кондуктора (template).

Точность позиционирования сигнальной проволоки в отдельной трубке соответствовала спецификации (среднеквадратичное отклонение относительно базовой поверхности не более 10 мкм в любых 2-х взаимно ортогональных направлениях), но в камере в целом точность была выдержана хуже (RMS, 27-47 мкм). Камера в течение двух лет эксплуатировалась в проекте АТЛАСа по проверке оптико-электронной системы мониторинга положения камер в мюонном спектрометре.

В заключении к этой главе, отмечено, что реализованы два варианта векторных камер, пригодных для измерения треков заряженных частиц в мюонных спектрометрах коллайдерных детекторов. На наш взгляд более перспективной все же была камера, где не было поддержек проволоки. Вполне удачен прототип камеры в круглой трубе с полеформирующими проволоками, который сочетает удобство применения стандартной круглой трубы, с возможностью получения квазиоднородного электрического поля с высокой напряженностью, линейного соотношения время-координата и короткого сигнала, последнее очень важно для обеспечения быстродействия в случае больших загрузок.

Прототипы камер с 30-мм трубками были ступенькой к созданию серийной камеры для АТЛАСа. В них были заложены многие идеи (позиционирование и крепление проволоки, соединение трубы и торцевого элемента, методы контроля трубок после сборки, сборки самой камеры), которые впоследствии были применены в МДТ камерах.

Несмотря на то, что эти прототипы, в большинстве своем, не переросли в крупномасштабные системы, они сослужили для нас большую службу. На них мы заработали авторитет в коллаборации АТЛАСа, который позволил нам проводить самостоятельную политику при разработке МДТ камер.

В **Главе 4** представлено краткое описание установки АТЛАС, перечислены подсистемы: внутренний детектор, калориметры, мюонный спектрометр и их основные характеристики. Некоторый акцент сделан на описании мюонного спектрометра (рис.9) и его системы опτικο-электронного мониторингирования положения камер. Выбор

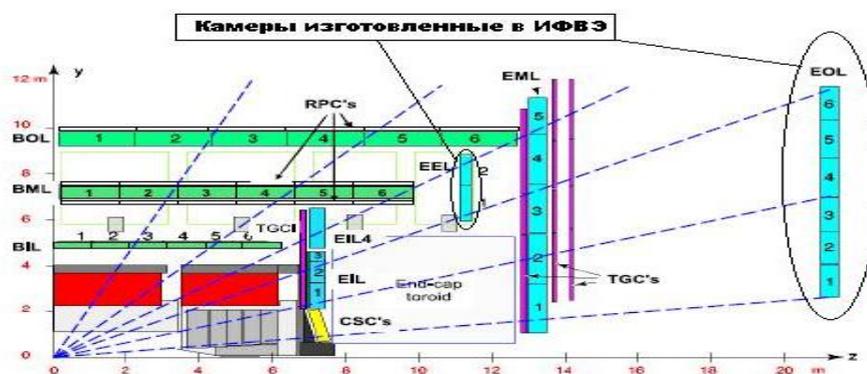


Рис. 9. Схема большого сектора мюонного спектрометра: BIL, BML, BOL, EIL, EML, EOL – МДТ-камеры; мнемоника названий камер – BIL ≡ Barrel Inner Large и т.п.

”безжелезного” магнита – сверхпроводящего тороида для мюонного спектрометра логически потребовал очень точных трековых ка-

мер и точного их позиционирования в установке. При гигантских размерах установки практически невозможно сохранить неизменным положение камер в течение длительного периода. Применена оптико-электронная система непрерывного слежения за положением и деформацией камер (optical alignment system, основана на системе RASNIK⁶). В главе приведены рисунки и схемы, иллюстрирующие базовые принципы этой системы.

Глава 5 содержит описание МДТ камер АТЛАСа, изготовленных в ИФВЭ, особенностей их конструкции, производства и методов тестирования [13-17].

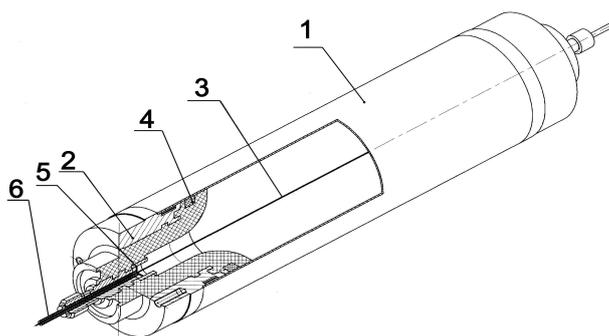


Рис. 10. Дрейфовая трубка (схема с вырезом): 1 – алюминиевая труба, 2 – корпус торцевого элемента (алюминий), 3 – сигнальная (анодная) проволока, 4 – уплотняющая прокладка, 5 – пластина с отверстием, позиционирующим проволоку, 6 – медная капиллярная трубка, при кримпировании которой фиксируется проволока

В качестве трековых детекторов в мюонном спектрометре АТЛАСа были приняты МДТ-камеры (МДТ, Monitored Drift Tube chambers), название подчеркивает, что базовым элементом камеры является дрейфовая трубка, параметры которой непрерывно мони-

⁶H.Dekker et al., The RASNIK/CCD 3-dimensional Alignment System, Proceedings of the 3d International Workshop on Accelerator Alignment, CERN, Geneva (1993).

торируются. Корпус трубки изготовлен из алюминиевого сплава, внешний диаметр 29.97 ± 0.015 мм, толщина стенки 0.400 ± 0.030 мм. Трубки заполняются газовой смесью $Ar-CO_2 = 93-7$ при давлении 3 бар(абс), рабочее напряжение (3080 В) выбрано так, чтобы газовое усиление $G = 2 \cdot 10^4$. Точность установки сигнальной проволоки ($W/Re=97/3$, диаметр 50 мкм, натяжение 350 ± 17 г) относительно базовой поверхности торцевого элемент (End Plug) составляет 10 мкм. Нужно отметить, что торцевой элемент был полностью разработан в ИФВЭ и изготовлен отечественными производителями. Точное позиционирование проволоки обеспечивается за счет отверстия,⁷ пробитого лазерным лучом в латунной пластинке. Диаметр отверстия 55 ± 5 мкм, эксцентриситет не более 7 мкм. Для положения проволоки в трубке развита специальная методика, основанная на использовании узкого пучка импульсного рентгеновского излучения (рис.11). Для иллюстрации на рис.12 приведен результат измерения положения проволоки в EOL6 трубках ($RMS_y, RMS_z \simeq 8$ мкм).

Долговременная стабильность натяжения проволоки обеспечивается как выбором материала проволоки, так и специальной процедурой "преднатяжения": на 1 минуту устанавливается повышенное натяжение 450 г, только затем – номинальное. Такая процедура уменьшает нестабильность натяжения, связанную с предысторией обработки проволоки, а также уменьшает ползучесть (смер, ослабление натяжения по экстраполяции к 15 годам не более 3.5%). Крепление проволоки осуществлялось методом кримпирования, обжатия медной капиллярной трубки. Натяжение контролировалось при помощи измерения основной гармоники резонансных колебаний проволоки, возбуждаемых импульсом тока. Трубка при этом помещалась в магнитное поле. По результатам измерений натяжение равно $350 \pm 4(RMS)$ г. при 20° .

Для трубок требуется высокая герметичность, утечка аргона не более $2 \cdot 10^{-8}$ бар-литр/сек при давлении 3 бар. При изготовлении герметичность трубок контролировалась в специальном боксе при помощи гелиевого течеискателя.

⁷только EO камеры, в остальных используется твистер

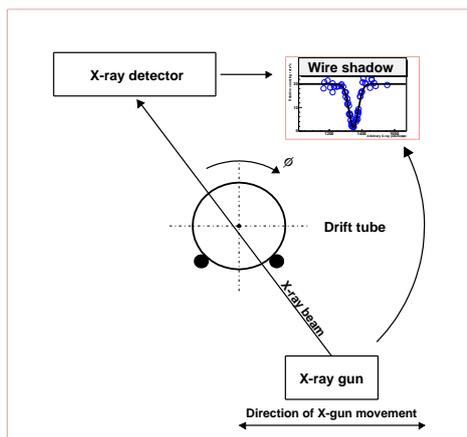


Рис. 11. Схема измерения положения проволоки в дрейфовой трубке

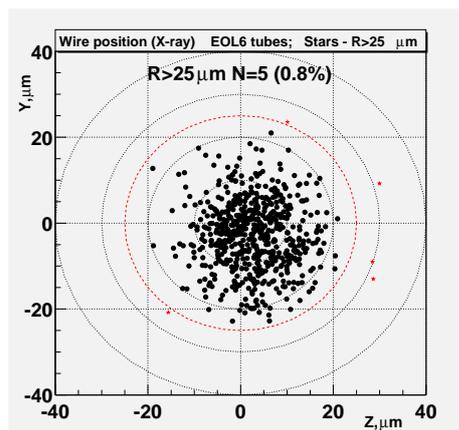


Рис. 12. Координата центра проволоки в трубках EOL6-камер

Мы использовали нестандартный подход к высоковольтным испытаниям трубок – трубки заполнялись не рабочей газовой смесью, а воздухом при нормальных условиях. Адекватность такой проверки была обоснована и, в конечном счете, подтверждена состоянием изготовленных трубок в детекторе.

Время сборки одной трубки – 6 минут. В день собиралось до 80 трубок, производительность лимитировалась скоростью прохождения различных проверок. Контроль качества трубок и логистика поддерживались при помощи специальной базы данных. Всего было изготовлено около 77000 трубок, 59192 смонтирована в ЕО-камерах, 15744 – в ЕЕ, доля забракованных трубок составляет около 2%.

В ИФВЭ были изготовлены ЕЕ и ЕО камеры (рис.9) для торцевых частей мюонного спектрометра АТЛАС, всего 254 камеры, 16 типо-размеров, площадь отдельной камеры от 2.8 до 8.8 квадратных метра. Камеры имеют ступенчатую трапецевидную форму (рис.13), угол трапеции 8.5 или 14.6°. Трубки объединены в 2 суперслоя, из

трех слоев каждый. Число трубок в слое в зависимости от типа камеры варьируется от 40 до 56, длина трубок от 1249.5 до 6241.5 мм. Расстояние между любой парой соседних сигнальных проволок в камере 30.035 мм. В раме и на поверхности камеры установлены элементы системы оптико-электронного контроля за искривлением камеры и ее положением в детекторе. Для учета тепловых деформаций камера оснащена 8-ю термо-датчиками (точность 0.2°C).

Сборка камер (склейка трубок в слои и приклеивание суперслоев к раме) осуществлялась на гранитном столе в помещении со стабилизированной температурой и влажностью. Применялась послойная склейка с использованием специальных устройств, обеспечивающих позиционирование проволок в отдельной камере с точностью 20 мкм (среднеквадратичное отклонение). Контроль за положением устройств во время сборки велся с помощью оптико-электронных систем того же принципа, что и установленные на камерах. Часть камер (16 шт.) была проверена на рентгеновском томографе. Камеры при томографировании располагались горизонтально, что не соответствует их штатному размещению, из-за этого камеры прогибались, что ведет к систематическим смещениям измеренных в томографе координат проволок. Но, даже без учета этой систематики, для всех камер, изготовленных в ИВФЭ, среднеквадратичное отклонение измеренных координат проволок находится в пределах 12-27 мкм.

Газовая система, смонтированная на ЕО(ЕЕ) камерах, обеспечивает подключение 3-х последовательно соединенных трубок к газовому коллектору. Требование на герметичность камеры получалось из допустимой утечки газа для отдельной трубки, умноженной на число трубок ($2N \cdot 10^{-8}$ бар·литр/сек). Осуществлялся многоступенчатый контроль герметичности: неоднократная проверка гелиевым течеискателем с увеличивающимся содержанием гелия в камере, измерение падения давления в термо-стабилизированном помещении, контроль за давлением в камере в период хранения. Среднее падение давления в камере составляет $\simeq 0.3 \pm 0.1$ мбар/сутки (Ar, 3 бар).

Подключение высокого напряжения и считывание сигналов происходит с разных сторон трубки. Пассивные элементы (резисторы и

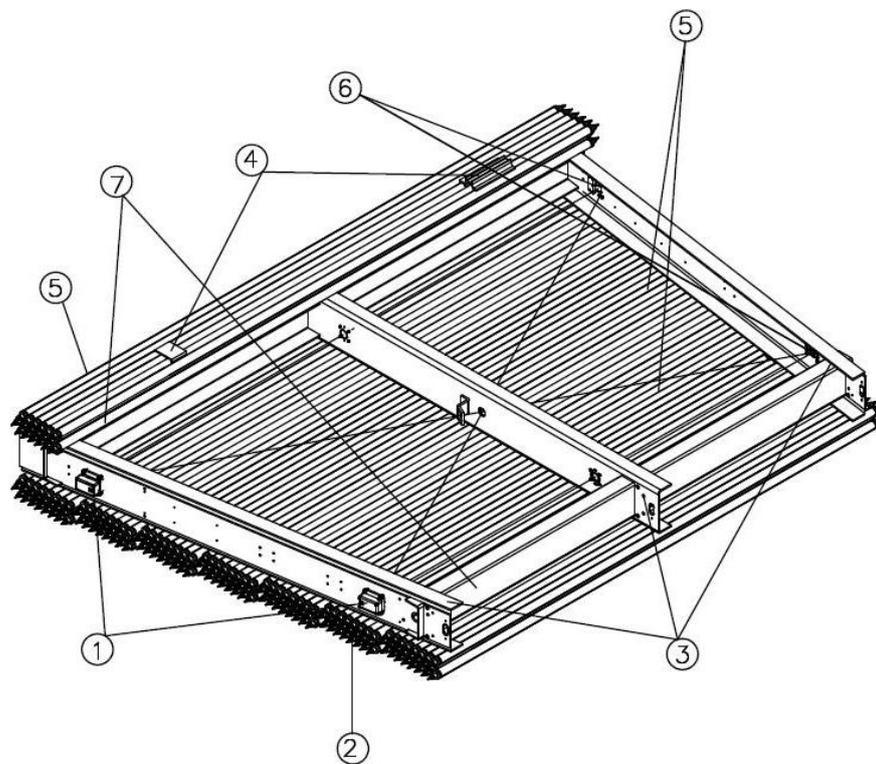


Рис. 13. Схематический вид ЕО(ЕЕ) камеры: 1,6 – элементы оптико-электронной системы мониторинга кривизны камеры (фотоприемники (ССD) и маски с диодными матрицами), 2,5 – слои трубок, 3 – поперечные балки, 4 – платформы для оптико-электронных приборов, 7 - продольные балки

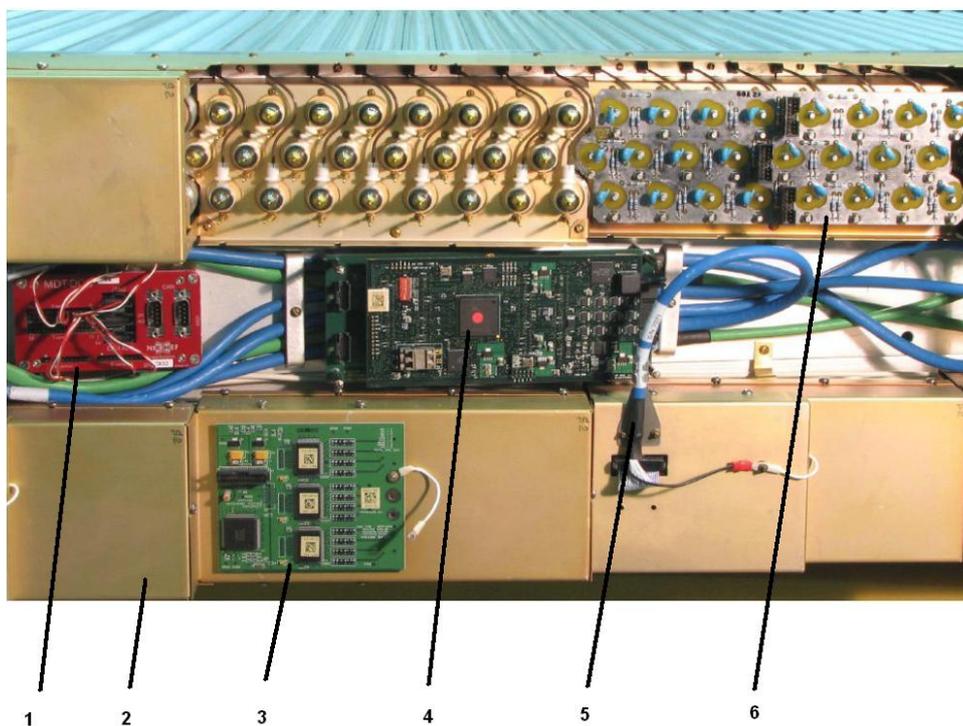


Рис. 14. Фотография ЕЕ камеры, со стороны сигнальной части (часть плат и экранов умышленно удалена): 1 – ELMB(DCS)-модуль, 2 – электромагнитный экран (Faraday-cage) усилителей, 3 – плата с ВЦП(TDC) и 3-мя чипами 8-канальных усилителей формирователей, 4 – (Chamber Service Module) CSM модуль, накамерный процессор, под ним ”материнская плата” с разъемами, 5 – сигнальный кабель, 6 – переходная плата (HedgeHog Board) с пассивными электронными компонентами (резисторами и конденсаторами)

конденсаторы) для 24 трубок объединены на общей плате, один ВЦП также обслуживает 24 трубки и находится на общей плате с микросхемами усилителей (3x8 каналов). Основные параметры усилителя: входное сопротивление – 120 Ом, шум (ENC) – $6000e^-$, чувствительность $3мВ/(\text{первичный электрон}\cdot G)=12мВ/фК$. ВЦП с точностью 0.78 нс. Наряду с временной информацией регистрируется амплитуда сигнала. Вся информация с отдельных ВЦП собирается на камерном процессоре и по опτικο-волоконному кабелю передается в удаленную электронику. Дополнительно на камере установлен блок системы контроля (DCS), обеспечивающий измерение температуры, магнитного поля, напряжения и токов электроники, через этот же модуль осуществляется загрузка (инициализация) камерного процессора и ВЦП. Внешний вид сигнальной части камеры представлен на рис.14. Процессор размещен на одной из поперечных балок рамы камеры, в очень ограниченных габаритах.

Окончательные проверки камер до установки в АТЛАСе и их результаты описаны в **Главе 6** [18-22].

Две камеры после проверки на рентгеновском томографе были установлены на канале (H8) протонного суперсинхротрона в ЦЕРНе, где с 2001 по 2004 г. осуществлялся проект по комплексной проверке всех детекторов мюонного спектрометра АТЛАСа. На камерах было проверено несколько версий электроники, достигнуто проектное разрешение, высокая эффективность (95.9%) при отсутствии шумящих и мертвых каналов.

Электроника, кабельные коммуникации и опτικο-электронные приборы на камеры монтировалась в ЦЕРНе. При этом осуществлялась сложная, детально прописанная и обязательная процедура проверок (предустановочная сертификация, commissioning). Заключительный этап проверки для каждой камеры состоял в проведении микро-эксперимента с набором около $\sim 10^6$ космических мюонов, пересекающих все трубки камеры. Анализ этих данных проводился по ускоренной и упрощенной методике, в основном на уровне АЦП-и ВЦП-спектров. По форме распределения срабатываний трубок в каждом слое грубо оценивалась эффективность, определялось максимальное время дрейфа для каждой трубки, анализировалась фор-

ма и среднее значение амплитудного спектра. Аномалии фиксировались и, в случае выхода за пределы допусков, устранялись. На рис.15 показано распределение собственных шумов усилителей, допустимый предел – 40 кГц. В завершении измерялся ток каждого суперслоя камеры при повышенном напряжении (рис.16). Полная проверка одной камеры без форс-мажорных ситуаций занимала 1-2 дня.

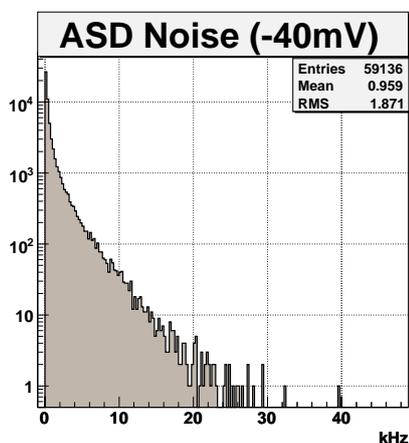


Рис. 15. Собственный шум усилителей

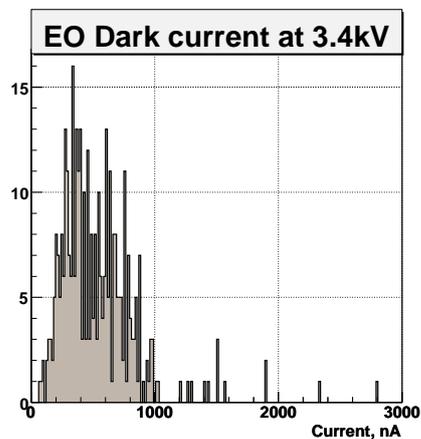


Рис. 16. Ток суперслоя при повышенном напряжении

Приведена краткая хронология изготовления камер. Массовая сборка трубок для ЕО камер началась в январе 2000 г., сборка этих камер окончена в апреле 2005 г. В августе все ЕО камеры были смонтированы в два 24-метровых диска в АТЛАСе и с тех пор успешно работают. Позднее были изготовлены 62 ЕЕ камеры для перекрытия области вблизи $|\eta| \simeq 1.15$. Двенадцать этих камер работают с 2009 г, остальные планируется установить позже.⁸

ИФВЭ изготовил для АТЛАСа 254 камеры, содержащие 74880 трубок (22% камер и 21% трубок от полного числа в АТЛАСе).

⁸38 ЕЕ-камер установлено в 2012 г., завершение – в 2013 г.

Используя наработанный ранее опыт, мы смогли получить "кредит доверия" в коллаборации и разработали собственную конструкцию торцевого элемента дрейфовых трубок, благодаря чему отечественные производители получили возможность изготовить около 130000 этих элементов. Была разработана собственная методика контроля качества собранных трубок, своя технология сборки камер. Все это находилось под пристальным вниманием со стороны коллаборации. Многочисленные проверки трубок и камер подтвердили, что они соответствуют предъявленному требованию по точности позиционирования проволоки: 10 мкм в отдельной трубке и 20 мкм в камере.

Все камеры были доставлены в ЦЕРН и, после установки электроники, прошли окончательную проверку и были сертифицированы для установки в АТЛАСе. Все установленные камеры были включены и успешно работают.

По количеству мертвых и шумящих каналов изготовленные в ИФВЭ ЕО и ЕЕ камеры выглядят не хуже,⁹ чем камеры, изготовленные в других центрах. Это является лучшим подтверждением качества наших разработок и правильности методов контроля, примененных при создании камер.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

- Для крупнейшей экспериментальной установки на ускорителе У-70 в Протвино – Нейтринного Детектора - была разработана, изготовлена и успешно эксплуатировалась система больших (0.5x4 м²) дрейфовых камер векторного типа с 4-мя сигнальными проволоками в одном большом (± 250 мм) дрейфовом промежутке. В отдельной камере однозначно, без привлечения информации из других координатных плоскостей, измеряется координата и угол проекции трека. Такое решение проблемы трековых измерений в нейтринном детекторе осуществлено впервые. Большой объем исследований, выполненный на ранних стадиях, послужил основанием для разработки камер и отдельных элементов системы. Тщательно измеренные характеристики серийных камер дали информацию для написания

⁹на конец 2011 г в ЕО-камерах было 12 мертвых каналов, 0.02% (0.28% во всех камерах спектрометра); число шумящих ($F > 100$ кГц) – 20(0.034%)

- программ моделирования и обработки данных с детектора. На основании проведенных исследований были выработаны методики проверки изготовленных камер и внесены коррекции в производство камер. В результате была получена экономичная, долговечная система камер, адекватная требованиям нейтринного эксперимента. Координатное разрешение камеры в детекторе камер не хуже 1 мм, угловое – не хуже 40 мрад, эффективность не ниже 85%, двухтрековое разрешение 7 мм, возможность регистрации наклонных треков до 70° на общей площади около 720 м^2 . Экономичность выражается в том что:
- 1) необходимо небольшое число электронных каналов ($\approx 2/\text{м}^2$) и источников питания, используемых для больших групп камер;
 - 2) применяется дешевая, безопасная газовая смесь с малым расходом. Первые камеры были изготовлены в 1981 г, полностью все камеры были смонтированы в НД в 1986 г, в полном объеме вся система камер функционировала до января 2007 г.
- Работы с прототипами векторных (jet-cell) камер показали, что могут быть созданы устойчивые проволочные структуры с длиной проволочек до 6 м без поддерживающих элементов. Камеры такого типа вполне пригодны для создания крупномасштабных систем. Выбор длины дрейфового промежутка определяется требуемым разрешением. Один из таких вариантов рассматривался в качестве базового элемента в мюонном спектрометре АТЛАСа, но эта версия не была принята коллаборацией.
 - Предложенный вариант круглых труб с дополнительными полеформирующими проволоками позволяет получать короткий сигнал, что обеспечивает 2-трековое разрешение порядка нескольких миллиметров, по своим свойствам такая трубка приближается к обычной планарной дрейфовой камере с равномерно распределенным потенциалом. Напряженность поля в большей части зоны собирания электронов на анодную проволоку становится близкой к однородной. Этот вариант дрейфовой трубки развивался для мюонной системы установки SDC на суперколлайдере (США) и не был воплощен, как и сам коллайдер. Обсуждалась возможность реализации этих трубок

для некоторых частей мюонного спектрометра АТЛАСа при обновлении установки для повышенной светимости БАК.

- Для мюонного спектрометра АТЛАСа было изготовлено 254 камеры (22% от полного числа) на основе МДТ трубок. Отличительной особенностью дрейфовых камер АТЛАСа является беспрецедентное сочетание масштабов системы (5600 м^2) с точностью позиционирования сигнальных проволок: 10 мкм в отдельной трубке и 20 мкм в камере. Это потребовало тщательной проработки конструкции трубки, разработки методов контроля и тестирования, как отдельных трубок, так и камер в целом. Находясь в жестких рамках общих критериев, в ИФВЭ был разработан собственный вариант конструкции дрейфовой трубки, технологии сборки трубок и камер. Созданы и внедрены оригинальные методы тестирования трубок и камер. Благодаря тщательной технологической проработке конструкции, применению многоступенчатых методов контроля и сертификации на разных этапах производства, вплоть до непосредственной установки в детектор, камеры, изготовленные в ИФВЭ, после 3-х лет эксплуатации в АТЛАСе имеют минимальное, по сравнению с другими производителями, число "мертвых" каналов – 0.02%, не уступая им по разрешению, эффективности и числу "шумящих" трубок.

Список литературы

- [1] Божко Н.И., Борисов А.А., Вовенко А.С., **Кожин А.С.**, Коноплянников А.К., Мухин А.И., Полетаев В.И., Рыбаков В.Г., Саломатин Ю.И., Фахрутдинов Р.М. **Дрейфовая камера ($3 \times 0.5 \text{ м}^2$) с многопроволочным сигнальным элементом и с дрейфовыми промежутками 250 мм.** Материалы III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам, Дубна, 1978.
- [2] Bozhko N.I., Borisov A.A., Vovenko A.S., **Kozhin A.S.**, Fachrutdinov R.M. **On Investigation the Factors, Limiting**

the Counting Rate Characteristic of the Drift Chambers.
Препринт ИФВЭ 79-19, Серпухов, 1979.

- [3] Божко Н.И., Борисов А.А., Вовенко А.С., **Кожин А.С.**, Фахрутдинов Р.М., Филиппов Г.Н. **Оптимизация параметров дрейфовой камеры с большими дрейфовыми промежутками при работе на смеси Ar+CO₂.** Препринт ИФВЭ 81-24, Серпухов, 1981.
- [4] Bozhko N.I., Borisov A.A., Bulgakov N.K., Vovenko A.S., Goraytchev V.N., **Kozhin A.S.**, Tumakov V.L., Fakhrutdinov R.M. and Filippov G.N. **Drift Chamber for the Serpukhov Neutrino Detector.** Nucl. Instr. and Meth., **A234** (1986) p.388-396.
- [5] Божко Н.И., Борисов А.А., Вовенко А.С., Горячев В.Н., **Кожин А.С.**, и др. (11 авторов). **Система дрейфовых камер нейтринного детектора ИФВЭ-ОИЯИ.** Материалы международного Симпозиума по координатным детекторам в физике высоких энергий, ОИЯИ, Д13-88-172, Дубна, 1988.
- [6] Борисов А.А. и **Кожин А.С.** **Как делать очень большие и точные дрейфовые камеры.** Препринт ИФВЭ 91-188, Серпухов, 1991.
- [7] Bozhko N.I., Borisov A.A., Goryatchev V.N., Fakhrutdinov R.M., Konoplyannikov A.K., **Kozhin A.S.**, Lipaev V.V., Vovenko A.S. **Test of jet-cell drift chamber inside the round tube with 6 meters long wires without intermediate supports.** ATLAS Note, MUON-No-026, 26 Aug. 1993, CERN, Geneva.
- [8] Bagnaia P., Barberio E., Beker H.,...,**Kojine A.**,..., et al. (36 авторов). **Multiwire drift tubes with jet-cell geometry for muon detection at LHC.** Nucl. Instr. and Meth. **A360** (1995), p.75-79.
- [9] Bagnaia P., Barberio E., Beker H.,...,**Kozhin A.**,..., et al. (44 автора). **Prototype test of a "jet-cell" drift chamber for large-area muon detection.** Nucl. Instr. and Meth. **A369** (1996), p.29-36.

- [10] Борисов А.А., **Кожин А.С.**, Фахрутдинов Р.М. **Исследование длинной (7.4м) дрейфовой трубки с четырьмя полеформирующими проволоками.** Приборы и Техника Эксперимента, 5, (1995), с.39-48.
- [11] Antipov Y., Batarin V., Bezzubov V., Borisov A., Bushnin Y., Eroshin O., Fakhrutdinov R., Gorin Y., Konoplyannikov A., **Kozhin A.**, Mandrichenko I., Medovikov V., Petrukhin A., Vaniev V., Zimin S. **Studies of drift tubes with field shaping electrodes.** Nuclear Physics **B44**, (1995) p.206-212.
- [12] Antipov Yu., Borisov A., Goryatchev V., Fakhrutdinov R., **Kozhin A.**, Salomatin Yu., Tumakov V., Vovenko A., Zimin S. **IHEP drift tube prototype for ATLAS.** Nucl. Instr. and Meth. **A379** (1996) p.427-428.
- [13] A. Borisov, R.Fakhrutdinov, **A.Kojine**, V.Rybatchenko, V.Startsev and A.Toukhtarov. **Development of Drift Tubes for ATLAS Muon Spectrometer.** Nuclear Physics **B78**, (1999) p.426-430.
- [14] A.Borisov, R.Fakhrutdinov, **A.Kojine**, A. Larionov, A.Pilaev, V.Rybatchenko, Yu.Salomatin. **ATLAS monitored drift tube assembly and test at IHEP (Protvino).** Nucl. Instr. and Meth. **A 494**, (2002) p.214-217.
- [15] Borisov A., Fakhrutdinov R., Goryatchev V., **Kozhin A.** **Measurement of proportional counter gas gain.** 2000 IEEE NSS and MIC Conference, Lion, France. Материалы конференции, 2000 IEEE Volume 1, Issue, 2000 Page(s):5/108 - 5/110.
- [16] Bensingher J., Bojko N., Borisov A., Fakhrutdinov R., Goryatchev S., Goryatchev V., Gushchin V., Hashemi K., **Kojine A.**, Kononov A., Larionov A., Paramoshkina E., Pilaev A., Skvorodnev N., Tchougouev A., Wellenstein H. **Construction of monitored drift tube chambers for ATLAS end-cap muon spectrometer at IHEP (Protvino).** Nucl. Instr. and Meth. **A494**, (2002) p.480-486.

- [17] Bojko N., Borisov A., Fakhroutdinov R., Goryatchev S., Goryatchev V., Gushchin V., **Kozhin A.**, Larionov A., Paramoshkina E., Pilaev A., Rybachenko V., Tchougouev A. **Performance and some characteristics of MDT chambers constructed in IHEP (Protvino) for ATLAS.** 2003 IEEE NSS and MIC Conference, Portland, USA. Материалы конференции, 2003 IEEE Volume 1, Issue, 19-25 Oct. 2003 Page(s): 444 - 448.
- [18] C.Adorisio, G.Aielli, Th.Alexopoulos,..., **A.Kozhin...** et al. **Study of the ATLAS MDT Spectrometer using High Energy CERN combined Test beam Data.** Nucl. Instr. and Meth.**A598** (2009) p.409-415.
- [19] C. Adorisio, G. Aielli, T. Alexopoulos,..., **A.Kozhin...** et al. (149 authors). **System test of the ATLAS muon spectrometer in the H8 beam at the CERN SPS.** Nucl. Instr. and Meth. **A593**, (2008) p.232-254.
- [20] Beretta M., Bobbink G., Branchini P., Kourkoumelis C., Dubbert J., Gazis, E., Hertenberg R., Hurst P., **Kojine A.**, Lanza A., et al. (19 authors). **MDT Commissioning Procedures Guidelines for Certifying Ready For Installation (RFI) Chambers .** ATLAS Note, ATL-MUON-2004-022, CERN, 2004.
- [21] N.Bojko, A.Borisov, R.Fakhroutdinov, **A.Kozhin**, A.Larionov, A.Pilaev. **Pre-commissioning and test results of MDT chambers produced at IHEP (Protvino) for ATLAS.** Nucl. Instr. and Meth. **A598**, (2009) p.205-206.
- [22] G. Aad, B. Abbott, G. Abdallah....**A.S. Kozhin**,..., et al. (List of ATLAS collaboration authors). **Commissioning of the ATLAS Muon Spectrometer with Cosmic Rays**, Eur.Phys.J. C(2010) 70, p.875-916.

Рукопись поступила 26 июня 2012 г.

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

А.С. Кожин

Разработка трековых систем большой площади на основе дрейфовых камер для экспериментов в физике высоких энергий.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.

Подписано к печати 27.06.2012. Формат 60 × 84/16.
Офсетная печать. Печ.л. 2,25. Уч.-изд.л. 1,65. Тираж 100. Заказ 41.
Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2012–13, И Ф В Э, 2012
