

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Фахрутдинов Ринат Макаримович

Трековые детекторы из тонкостенных дрейфовых трубок для физических установок

1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт физики высоких энергий» имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Официальные оппоненты:

Гришин Владимир Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор, высококвалифицированный главный научный сотрудник Отделения ядерной физики и астрофизики ФГБУ науки Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук;

Крившич Анатолий Григорьевич

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отделения физики высоких энергий ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;

Кречетов Юрий Федорович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна);

Кузьминов Валерий Васильевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований Российской академии наук

Защита состоится 19 марта 2025 г. в 15:00 час.

на заседании диссертационного совета МИФИ.1.05 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 года

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.1.05 НИЯУ МИФИ
доктор физико-математических наук, профессор



Улин С.Е.

Общая характеристика работы

Актуальность темы обусловлена тем, что в современных больших физических установках трековые детекторы из дрейфовых трубок (ДТ) очень широко используются, для этого достаточно упомянуть детекторы АТЛАС [1] и CMS [2] на Большом Адронном Коллайдере (БАК) в ЦЕРНе. Более того, данная методика продолжает активно развиваться: в настоящее время создание новой огромной системы, состоящей из 126 мюонных камер, скомпонованных из прецизионных ДТ малого (15 мм) диаметра, осуществляется коллаборацией АТЛАС в нескольких европейских и американских институтах в рамках 1-й и 2-й фаз модернизации детектора АТЛАС [3]. Значительный вклад в эти работы внес НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.

Методика создания трековых камер из ДТ оказалась очень востребованной для усовершенствования трековых систем физических установок, используемых на ускорительном комплексе в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ: четыре установки института уже работают с такими новыми камерами. При этом важно отметить, что потребовалась разработка новой, собственной технологии производства тонкостенных ДТ из лавсана, чтобы камеры можно было эффективно использовать не только для регистрации мюонов в оконечных частях установок, но также, благодаря существенному уменьшению количества пассивного вещества из-за уменьшения толщины стенок трубок и использования материала с большей радиационной длиной, для восстановления траекторий всех заряженных частиц по всему тракту их следования в установке. Данная технология включает в себя изготовление герметичных электропроводящих корпусов ДТ правильной цилиндрической формы методом ультразвукового сваривания лавсановой пленки, имеющей двухстороннее алюминиевое напыление.

Классическая ДТ, несмотря на свои очевидные достоинства, имеет принципиальные ограничения: двухтрековое разрешение практически нельзя сделать меньше радиуса трубки и не удастся добиться линейной зависимости

«время – координата». Одной из актуальных задач, поставленных в диссертационной работе, является изучение возможности избавления от этих ограничений путем внедрения в объем трубки дополнительных, полеформирующих проволок. Важным преимуществом такой модификации ДТ является возможность работы при больших нагрузках.

В настоящее время много институтов в разных странах занимаются развитием методики мюнографии и мюонной томографии с использованием мюонов космического происхождения, при этом имеет место большое многообразие предлагаемых вариантов трековых систем для этих целей. В НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ для трековых систем опробованы плоскости из ДТ. При конструировании томографов большой площади такие трековые системы, не являясь более дорогостоящими по сравнению с другими типами, способны обеспечить необходимые высокие координатную и угловую точности.

Как правило, трековые системы на основе дрейфовых камер (дрейфовых трубок) работают при непрерывном обновлении газовой смеси в своем рабочем объеме, скорость потока газовой смеси варьируется в очень большом диапазоне от 0.01 до 10 объемов камеры в час и зависит от особенностей конструкции камеры и условий эксперимента. Естественным и актуальным является вопрос – как долго, будучи однажды заполненной, камера может работать без постоянной циркуляции газовой смеси? При каких условиях она может эффективно работать в «беспродувном» режиме в течение длительного (месяцы, годы) времени?

Целью диссертационной работы является разработка и создание новых типов трековых детекторов из дрейфовых трубок для экспериментальных исследований в физике элементарных частиц высоких энергий.

Основными задачами являются:

- 1) Разработать трековые модули из дрейфовых трубок с точностью лучше 300 мкм, обеспечивающих возможность регистрации электронов, мюонов

и заряженных адронов экспериментальными физическими установками, в том числе установками ОКА, ФОДС, ВЕС, СПАСЧАРМ (НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ).

- 2) Разработать методику создания дрейфовых трубок диаметром 15 – 30 мм в самоподдерживающемся лавсановом корпусе большой (до 2.5 м) длины.
- 3) Экспериментально исследовать физические характеристики дрейфовых трубок с дополнительными полеформирующими электродами.
- 4) Разработать методику создания новых мюонных дрейфовых камер детектора АТЛАС, обеспечивающих их повышенную загрузочную способность за счет уменьшения диаметра дрейфовых трубок с 30 мм до 15 мм.
- 5) Разработать метод и регламент контроля и корректировки параметров дрейфовых трековых детекторов, позволяющих обеспечить их длительную работу без постоянного обновления рабочей газовой смеси.

Научная новизна

- 1) Разработана новая методика изготовления многослойных трековых детекторов большой площади, отличающаяся тем, что регистрирующими ячейками являются тонкостенные дрейфовые трубки диаметром 15 - 30 мм нового типа, а именно в самоподдерживающихся (сохраняющих форму и выдерживающих натяжение сигнальных проволок без каких-либо специальных поддержек) корпусах из двухсторонне-металлизированной лавсановой пленки.
- 2) Впервые с использованием метода автокалибровки многослойного дрейфового детектора разработана и реализована методика контроля и корректировки скорости дрейфа электронов, позволяющая обеспечить длительную работу детектора без постоянного обновления рабочей газовой смеси с сохранением основных физических параметров – эффективности и пространственного разрешения. Работоспособность

метода экспериментально подтверждена 9-летней работой многослойных детекторов из дрейфовых трубок в «беспродувном» режиме.

Практическая значимость работы

- Созданные многослойные трековые детекторы с лавсановыми дрейфовыми трубками были использованы для оснащения физических установках НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ:
 - Установка СПАСЧАРМ – 5 трековых станций (17 камер)
 - Установка ФОДС – 6 станций (12 камер)
 - Установка ОКА – 5 станций (10 камер)
 - Установка ВЕС – 4 станции (8 камер).

Суммарное количество дрейфовых трубок более 7 тыс. шт. В настоящее время они составляют основу трековых систем всех четырех перечисленных установок.

- С помощью разработанной методики были созданы 12 трехслойных трековых камер, регистрирующими ячейками которых являются дрейфовые трубки в цилиндрическом алюминиевом корпусе диаметром 30 мм, для оснащения экспериментальных физических установок ОКА и ФОДС на Ускорительном комплексе У-70 НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ; чувствительная площадь камер $1.7 \times 1.7 \text{ м}^2$ (ОКА) и $0.7 \times 1.0 \text{ м}^2$ (ФОДС).
- Изготовлены трековые плоскости из дрейфовых трубок для двух мюонно-томографических установок. Высокое пространственное разрешение трубок (не хуже 0.3 мм) и высокая точность их позиционирования позволяют обеспечить угловое разрешение установок лучше 3 мрад.
- Разработанные методы и процедуры позволили обеспечить изготовление персоналом НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ более 30 тыс. прецизионных (обеспечивающих не хуже чем 10-мкм позиционирование сигнальных проволок в склеенной камере) дрейфовых трубок по программам 1-й и 2-й фаз модернизации детектора АТЛАС.

- Разработанные метод и регламент контроля и корректировки рабочих параметров дрейфовых трековых детекторов открывают возможность их длительной работы без постоянного обновления рабочей газовой смеси.
- Разработанные методики были использованы в других организациях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработка новой методики изготовления многослойных трековых детекторов большой площади, отличающейся тем, что регистрирующими ячейками являются тонкостенные дрейфовые трубки диаметром 15 - 30 мм нового типа, а именно в самоподдерживающихся (сохраняющих форму и выдерживающих натяжение сигнальных проволок без каких-либо специальных поддержек) корпусах из двухсторонне-металлизированной лавсановой пленки толщиной 125 мкм.
2. Разработка новых трековых детекторов различной конфигурации для модернизации экспериментальных физических установок НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ: ОКА, ФОДС, ВЕС, СПАСЧАРМ и изготовления мюонных томографов.
3. Экспериментальные результаты изучения характеристик дрейфовых трубок с дополнительными полеформирующими электродами различных модификаций.
4. Разработка конструктивных элементов новых мюонных камер в рамках проектов 1-й и 2-й фаз модернизации детектора АТЛАС.
5. Разработка методики контроля и корректировки скорости дрейфа электронов в дрейфовых трубках многослойных трековых детекторов, позволяющей обеспечить их длительную (месяцы, годы) работу без постоянного обновления рабочей газовой смеси с сохранением основных физических параметров – эффективности и пространственного разрешения; результаты экспериментов с дрейфовыми камерами в длительном «беспродувном» режиме.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертации подтверждается:

1. Надежной многолетней работой трековых детекторов, разработанных и изготовленных под руководством автора диссертации, в составе экспериментальных физических установок ОКА, ФОДС, ВЕС, СПАСЧАРМ на Ускорительном комплексе У-70 (гл. 1 – 3) и мюонных томографов (гл. 4) в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.
2. Сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными при изучении характеристик дрейфовых трубок на пучках Ускорительного комплекса У-70 (гл. 5).
3. Контрольными измерениями в Институте Макса Планка (г. Мюнхен, Германия) качества и точности разработанных и изготовленных в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ элементов и конструкций новых мюонных камер из 15-мм ДТ в рамках проектов модернизации детектора АТЛАС. Данные работы зачтены АТЛАС-коллаборацией на сумму 909 тыс. швейцарских франков в качестве вклада Российской Федерации в работы по 1-й и 2-й фазам модернизации детектора АТЛАС (гл. 6).
4. Успешными многолетними (до 9 лет) экспериментальными исследованиями долговременной работоспособности дрейфовых детекторов без обновления рабочей газовой смеси (гл. 7).
5. Полученными патентами РФ на полезную модель (3 шт.).
6. Публикациями основных результатов в реферируемых изданиях, представлением и широким обсуждением результатов на российских и международных научных конференциях.

Личный вклад автора

1. Автором была предложена и реализована методика создания дрейфовых трубок диаметром 15 - 30 мм в самоподдерживающихся корпусах из двухсторонне-металлизированного лавсана толщиной 125 мкм.

2. Предложена концепция построения многослойных трековых детекторов, предназначенных для экспериментальных физических установок: ОКА, ФОДС, ВЕС, СПАСЧАРМ, Мюонный томограф (НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ).
3. Автор руководил разработкой, изготовлением и тестированием в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ перечисленных в диссертации базовых конструктивных элементов новых мюонных трековых камер из дрейфовых трубок малого (15 мм) диаметра в рамках 1-й и 2-й фаз модернизации детектора АТЛАС.
4. При определяющем участии автора были выполнены экспериментальные исследования, направленные на обеспечение длительной работы многослойных дрейфовых детекторов в «беспродувном» режиме, а также изучены характеристики дрейфовых трубок с дополнительными полеформирующими электродами различных модификаций.

Апробация результатов

Результаты, приведенные в диссертации, многократно докладывались на профильных международных и российских конференциях и симпозиумах:

International conference «Instrumentation for Experiments at Colliders», г. Новосибирск - 1996, 2002, 2014, 2017,

International conference «Advanced technology and particle physics», Como, Italy – 1994, 1998,

Wire Chamber Conference (Vienna, Austria) – 1995,

Fraunhofer – ISTC workshop “Advanced Sensor technologies for life, sciences and safety”, Waldheim, Germany - 2006,

IEEE – Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference – 2003, 2008, 2011,

2-nd Symposium on enhanced detection of nuclear materials, London – 2012,

International Symposium “Thunderstorms and elementary particle acceleration”, Nor Amberd International Conf. Centre of the Yerevan Physics Institute – 2019,

Инновационные форумы ГК «Росатом» - 2006, 2007, 2018,

Международный симпозиум по астрофизике и космическим лучам “ISKRA”, г. Москва – 2021, 2023,

Конференция «Черенковские чтения. Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц», г. Москва – 2017, 2019, 2023.

Автор диссертации выступал с научными докладами на рабочих совещаниях международной мюонной коллаборации АТЛАС, сессиях секции ЯФ ОФН РАН, семинарах НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.

В 2015 г. группа из 5 сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ приняла участие в конкурсе на соискание премии имени И.В. Курчатова НИЦ "Курчатовский институт". Автор диссертации, в качестве руководителя данной группы, представил презентацию «Уникальные технологии изготовления прецизионных дрейфовых камер большой площади для экспериментов в физике высоких энергий». Работа была признана победителем в номинации «Инженерные и технологические разработки», а все члены данной группы стали лауреатами курчатовской премии.

Публикации

В конце диссертации приведен библиографический список из 184 наименований. 87 печатных работ из этого списка выполнены с участием автора диссертации.

Основными публикациями по теме диссертации являются 21 работа, включая 3 патента РФ на полезную модель. Из основных публикаций, 16 работ опубликовано в научных журналах, включенных в перечень ВАК и представленных в базах цитирования WoS и SCOPUS.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, библиографического списка из 184 наименований, списка из 16 зарегистрированных ноу-хау и списка из 5 утвержденных «Технологических регламентов производства» по

теме диссертации. Объем составляет 215 страниц, включая 212 рисунков и 3 таблицы.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, показаны научная новизна и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Сформулированы общие принципы работы дрейфовых приборов и характерные особенности различных модификаций, используемых в современных физических установках. Учитывая, что значительное место в диссертации отведено автором разработке трековых детекторов из дрейфовых трубок для экспериментальных физических установок ВЕС [4], ОКА [5], ФОДС [6], СПАСЧАРМ [7] на Ускорительном комплексе У-70 [8] НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, представлены схемы и краткое описание данных установок с фотоиллюстрациями, показывающими местоположение в них трековых детекторов, изготовлению которых посвящена диссертация. К примеру, на рис.1 - фотографии общего вида установки ОКА (а) и ее части (б) в месте расположения трековых детекторов из ДТ.



(а)



(б)

Рис. 1. Общий вид установки ОКА и фрагмент с трековыми камерами

Глава 1 начинается с краткой информации о технологических наработках, накопленных под руководством автора диссертации в НИЦ

«Курчатовский институт» - ИФВЭ при производстве больших мюонных камер для детектора АТЛАС, которые впоследствии оказались полезными для разработки и производства трековых детекторов для экспериментальных физических установок НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ. На заднем плане рис.2 - снятая с гранитного монтажного стола камера EOL-6 для АТЛАС, имеющая в своем составе ДТ длиной 6.3 м. Эта фотография была размещена [9] в апрельском (2005 г.) номере журнала CERN Courier, сопровождаемая текстом: «Институт физики высоких энергий (ИФВЭ) из Протвино (Россия) производит самые большие и выдающиеся (“most challenging”) камеры для мюонного спектрометра детектора АТЛАС. Размеры МДТ-камер различны, в настоящее время они изготавливаются во многих институтах Европы, США, России и Китая. Но изготавливаемые в ИФВЭ 192 камеры включают в себя 16 камер длиной 6.3 м. Это первый случай успешного изготовления камер такого размера! Несмотря на гигантские размеры камер, 50-мкм анодная проволока позиционируется в них с точностью лучше 20 мкм».



Рис. 2. Мюонная камера для детектора АТЛАС

Далее в этой главе представлена информация о двухкоординатной трековой станции, состоящей из двух камер, разработанной и изготовленной для установки ОКА (чувствительная площадь $1.7 \times 1.7 \text{ м}^2$) и пяти станциях,

включающих в себя 10 камер, для установки ФОДС (чувствительная площадь $0.7 \times 1.0 \text{ м}^2$). Учитывая опыт, приобретенный группой при изготовлении мюонных камер для детектора АТЛАС, а также разработанное и изготовленное для этих целей технологическое оборудование, было решено, что регистрирующими элементами данных станций будут, как и в камерах АТЛАС, 30-мм ДТ в тонкостенном алюминиевом корпусе. При этом понятно, что просто «скопировать» АТЛАС-камеру для целей установок ОКА и ФОДС было невозможно по целому ряду причин, начиная с геометрической формы, которая должна быть прямоугольной, а не трапециевидной. И не говоря уж об используемой в АТЛАС специализированной электронике, специфических переходных платах для ее подключения, системах газоподвода и газораспределения и т.п. – все это было заказано и изготовлено централизованно на европейских фирмах для всех камер АТЛАС, в том числе для производимых в России. А для камер ОКА и ФОДС все эти инфраструктурные элементы были разработаны и изготовлены непосредственно в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.

Итак, регистрирующими ячейками трековых камер установок ОКА и ФОДС являются 30-мм ДТ, конструкция которых схематично показана на рис. 3. Корпусом и катодом ДТ служит алюминиевая труба с внешним диаметром 30 мм и толщиной стенки 0.4 мм, анодом - 50 мкм золоченая проволока из W-Re сплава. На концах трубы методом обжима через резиновые прокладки, в дальнейшем обеспечивающие герметичность ДТ, зафиксированы торцевые заглушки, основные функции которых: 1) позиционирование проволоки относительно внешней поверхности с точностью не хуже 10 мкм; 2) обеспечение крепления проволоки, натянутой с усилием 350 г; 3) герметизация газового объема трубки с возможностью прокачки рабочей газовой смеси; 4) электрическая изоляция проволоки относительно корпуса трубки; 5) обеспечение, за счет точной (опорной) внешней поверхности, позиционирования трубки при сборке камеры; 6) обеспечение электрических контактов внутренней поверхности трубки («катод») и сигнальной проволоки

(«анод») с электроникой. Торцевые заглушки изготовлены методом литья под давлением из стеклонеполненного пластика “noryl GFN3” с двумя закладными деталями – центральной латунной трубкой-вставкой и наружной алюминиевой втулкой. После отливки алюминиевая поверхность (втулка) торцевой заглушки протачивается до диаметра 30.01 ± 0.01 мм и является опорной при склейке камеры. Электрический контакт между корпусом и алюминиевой втулкой торцевой заглушки обеспечивается вставленной между ними гофрированной пружинкой из нержавеющей стали. В центральную латунную вставку впрессовывается латунная пластинка толщиной 0.5 мм, в которой лазерным лучом прожигается отверстие диаметром 60 ± 10 мкм с допуском на отклонение от оси опорной поверхности ≤ 10 мкм. Это отверстие предназначено для точного позиционирования анодной проволоки, которая на выходе из торцевой заглушки фиксируется методом обжима в медной капиллярной трубке.

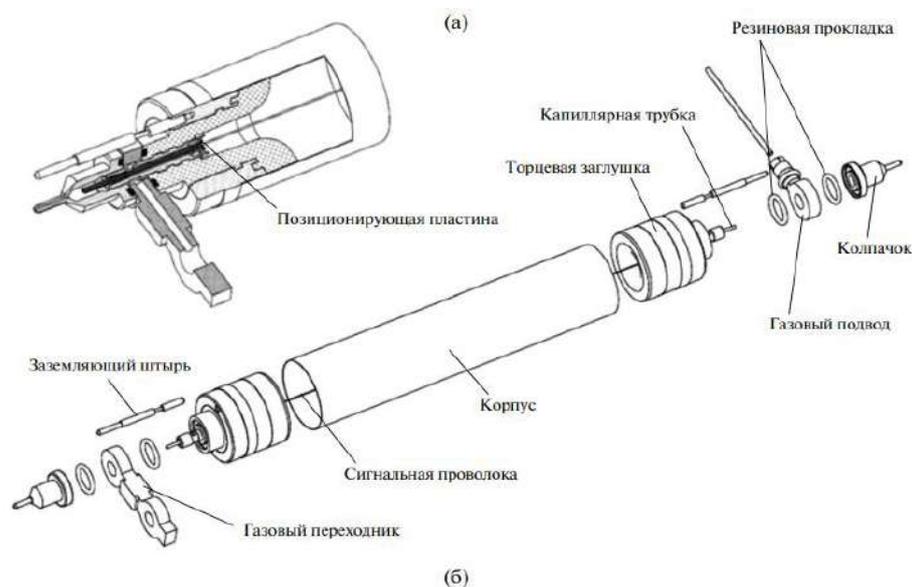


Рис. 3. Конструкция дрейфовой трубки

Для формирования камеры, ДТ склеиваются между собой по методу ”плотной упаковки”, как показано на рис. 4, образуя три слоя. Послойная склейка трубок в камеру выполняется на сборочном гранитном столе с использованием точных позиционирующих «гребенок», оборудованных вакуумными присосками для фиксации трубок во время склейки, и

автоматизированной клеераздаточной машины (рис. 5). В поперечном сечении заданное расстояние между сигнальными проволоками любой пары соседних ДТ равно 30.035 мм, При указанной выше регламентированной 10-мкм точности положения анодной проволоки относительно опорной поверхности торцевой заглушки, используемая технология позволяет обеспечить итоговую точность взаимного расположения анодных проволок в камере 20 мкм.

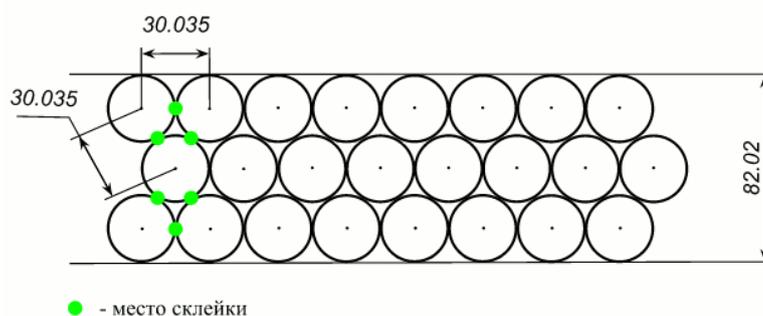


Рис. 4. Взаиморасположение дрейфовых трубок в камере



Рис. 5. Позиционирующая «гребенка» (слева) и клеераздаточная машина (справа)

Газовое соединение ДТ в камере смешанное: 3 трубки с одинаковой позицией в слоях соединены при помощи газовых перемычек последовательно, а все такие группы из 3-х ДТ соединяются параллельно с общим газовым коллектором. Рабочий газ $Ar + 7\% CO_2$.

Съем сигнала и подача высокого напряжения осуществляются с разных сторон дрейфовой трубки и, соответственно, камеры. На торцах камеры располагаются вспомогательные «переходные» платы, каждая из которых обслуживает 24 трубки. На сигнальных переходных платах установлены 3

разъема для подключения 8-канальных усилителей с порогом около 1 мкА. Торцы камер закрыты экранами, изготовленными из 1-мм алюминия, которые предохраняют от электромагнитных наводок и выполняют защитные функции от случайных механических повреждений. Внешний вид камер – на рис. 6.



Рис.6. Слева – камера установки ОКА, справа – камеры ФОДС

Камеры обладают высокой герметичностью: при начальном давлении рабочего газа ~ 3 бар падение давления составляет около -1.1 мбар/сутки (рис. 7,а). Типичная счетная характеристика – зависимость скорости счета сигналов от величины приложенного напряжения – показана на рис. 7,б. При этом трубки регистрировали только естественный радиационный фон, дополнительные источники ионизирующего излучения не применялись. Видно явно выраженное плато счетной характеристики, рабочее напряжение находится в диапазоне от 3.2 до 3.4 кВ.

Пространственное разрешение камер – лучше 0.3 мм.

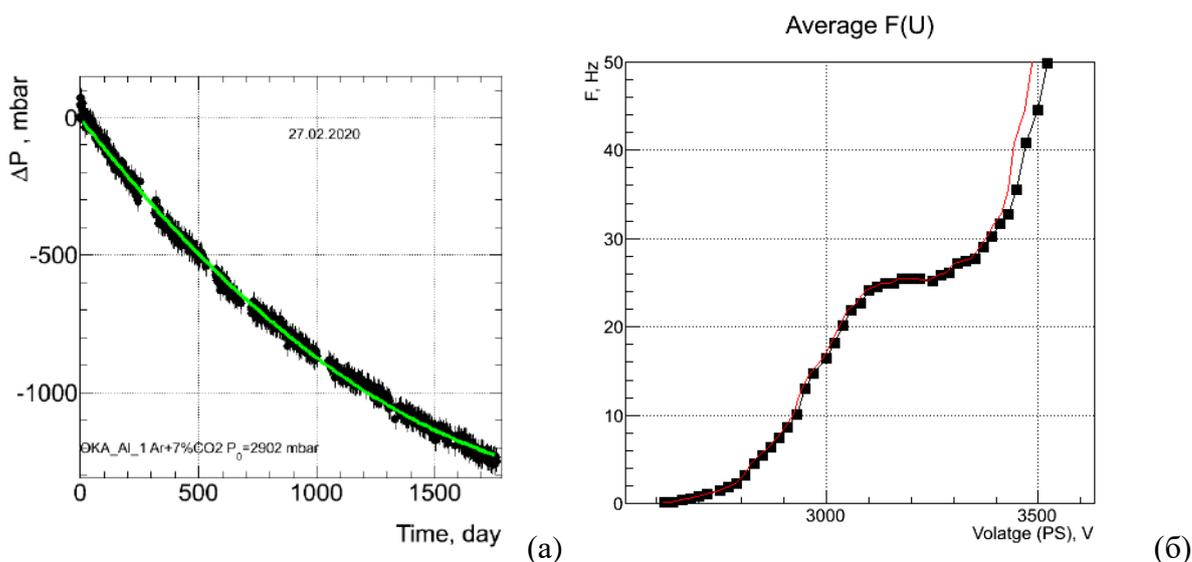


Рис.7. График падения давления газа (а) и усредненная по всем ДТ счетная характеристика камеры ОКА (б)

Глава 2 посвящена разработке конструкции и технологии изготовления прецизионных ДТ в лавсановом корпусе. Мотивацией для разработки явилось стремление минимизировать количество «пассивного» вещества, привносимого стенками трубок, чтобы детекторы на их основе можно было эффективно использовать не только для регистрации мюонов в оконечных частях установок, но и для восстановления траекторий заряженных адронов и электронов по всему тракту их следования в установке. Было решено переработать конструкцию описанной в 1-й главе дрейфовой трубки – вместо алюминиевого корпуса использовать тонкостенную трубу, изготовленную из более легкого материала - лавсана (зарубежное название - майлар), при этом сохранив важное свойство, присущее «классической» ДТ в металлическом корпусе – то, что она является самоподдерживающимся элементом, способным без каких-либо специальных внутренних либо внешних поддержек выдерживать натяжение сигнальной проволоки и сохранять свою цилиндрическую форму. Это свойство отличает разработанные под руководством автора диссертации ДТ от достаточно широко используемых трубок в TRT-детекторах [10, 11].

Поскольку корпус ДТ выполняет функцию катода, обе поверхности трубы – как внешняя, так и внутренняя – должны иметь хорошую электропроводимость. Вполне естественно, что промышленно изготавливаемой электропроводящей лавсановой трубы нужного диаметра нет, поэтому было решено изготавливать ее самостоятельно из листового лавсана методом ультразвуковой сварки (УЗС).

Первоначально были разработаны лавсановые трубки с внешним диаметром 30 мм, на их основе изготовлены трековые камеры для экспериментов ОКА, ВЕС, СПАСЧАРМ, ФОДС. Загрузочная способность камер была на пределе. В большинстве этих камер были приняты меры, чтобы в центре была омертвленная зона площадью до 105 мм² в месте прохождения высокоинтенсивных пучков заряженных частиц. Преследуя цель повышения нагрузочной способности ДК, в дополнение к 30-мм ДТ, группа под руководством автора диссертации разработала и отладила технологию производства лавсановых ДТ вдвое уменьшенного диаметра (15 мм).

Исходным материалом для изготовления корпусов ДТ является лавсановая пленка толщиной 125 мкм с двухсторонним алюминиевым покрытием (напылением), поставляемая в виде рулона шириной 600 мм. Пленка нарезается на полосы-заготовки шириной 100 ± 0.25 мм для производства 30-мм ДТ и шириной 55 ± 0.25 мм для производства 15-мм ДТ. Длина определяется длиной ДТ, в нашей практике она варьировалась от 0.8 до 2.5 м. Заготовка оборачивается вокруг шлифованного стержня – шаблона соответствующего диаметра с небольшим (~ 4 мм) нахлестом и закрепляется в ложементы сварочного стапеля (рис. 8). Ультразвуковая колебательная система движется вдоль оси стержня по направляющим и обеспечивает сварку сложенных внахлест краев лавсановой пленки продольным швом. «Сваренная» таким образом лавсановая труба (рис. 9) снимается с шаблона и после вакуумной очистки от пыли поступает на сборку ДТ.

В диссертации отмечено, что успешной разработке способа УЗС-сварки герметичных лавсановых корпусов для ДТ в значительной мере способствовал

предыдущий опыт, полученный в группе диссертанта при производстве герметичных лавсановых оболочек для больших жидкостных сцинтилляционных счетчиков Нейтринного детектора ИФВЭ-ОИЯИ.



Рис. 8. Установка ультразвуковой сварки

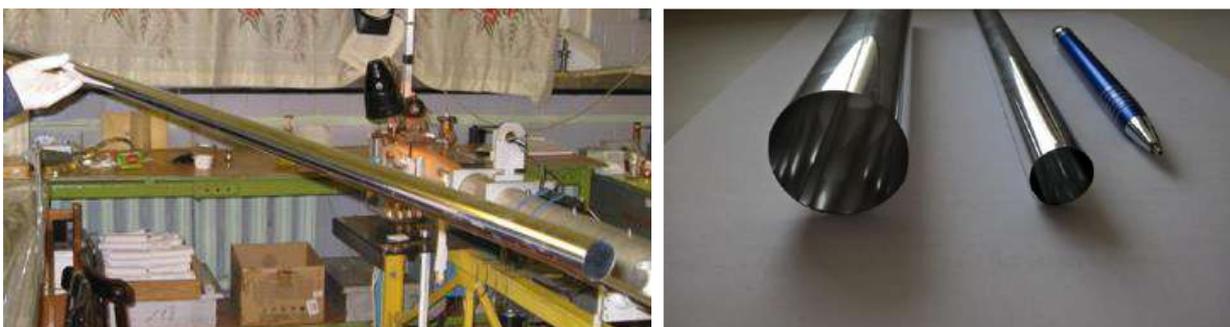


Рис. 9. Изготовленные методом УЗС 30-мм и 15-мм лавсановые трубы

Сборка лавсановых ДТ осуществлялась с использованием той же оснастки и той же технологии, что и для 30-мм ДТ в алюминиевом корпусе, за исключением метода фиксации трубы-корпуса ДТ на торцевых заглушках. Теперь это делалось не методом обжима, а приклеиванием, при этом заботясь о наличии электрического контакта между трубой и внешней алюминиевой поверхностью заглушки. Соответственно, металлическая поверхность торцевой заглушки ровная, без проточки для контактной пружинки. На рис. 10 представлены фотографии заглушек для 30-мм алюминиевой трубки (а), 30-мм лавсановой трубки (б) и 15-мм лавсановой трубки, их внутренняя структура одинакова.

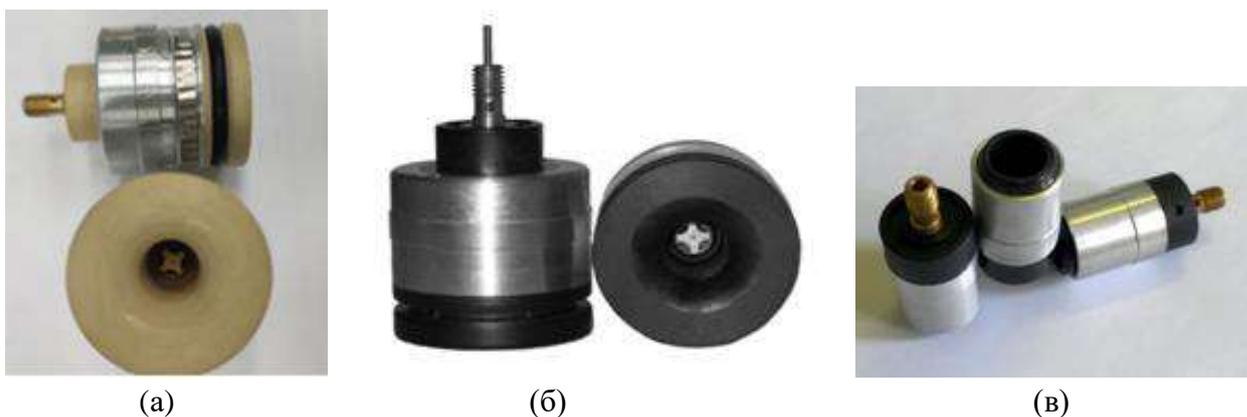


Рис. 10. Торцевые заглушки

Распределение сопротивлений, измеренных между корпусами торцевых заглушек на противоположных концах 30-мм лавсановой ДТ, приведено на рис.11. Как и для ДТ в алюминиевом корпусе, для всех ДТ проводились контрольные измерения герметичности, высоковольтной стабильности, натяжения проволоки (рис. 12).

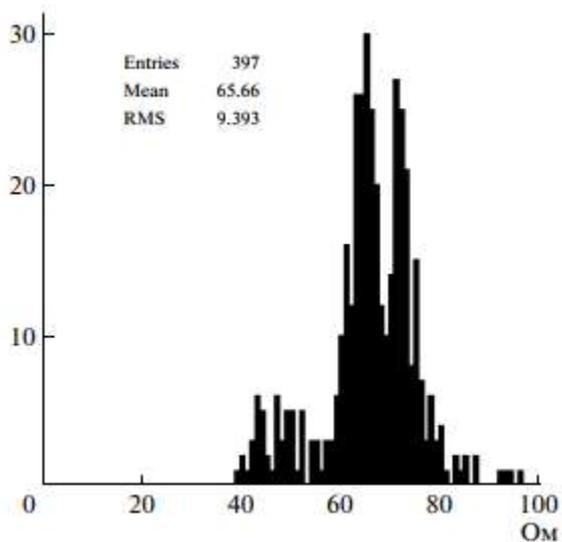


Рис. 11. Распределение сопротивлений между корпусами торцевых заглушек

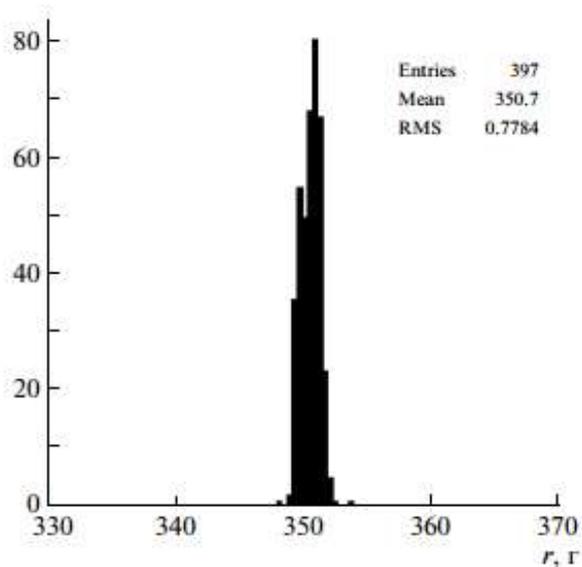


Рис. 12. Распределение натяжений проволоки

На рис. 13 – общая фотография трех вариантов ДТ.



Рис. 13. ДТ сверху вниз: 30-мм алюминиевая, 30-мм лавсановая, 15-мм лавсановая

В рассматриваемой главе приведено сравнение (рис. 14) вычисленных по методу Монте-Карло с помощью программы GEANT4 распределений углов многократного кулоновского рассеяния протонов с импульсом 5 ГэВ/с после пересечения трековой системы, состоящей из ДТ диаметром 30 мм, но в одном случае эти ДТ в алюминиевых корпусах с толщиной стенки 0.4 мм, а в другом – в лавсановых корпусах с толщиной стенки 0.125 мм. В обоих данных случаях под трековой системой понимается система из четырех камер, аналогичных описанным выше камерам установок «ОКА» и «ФОДС».

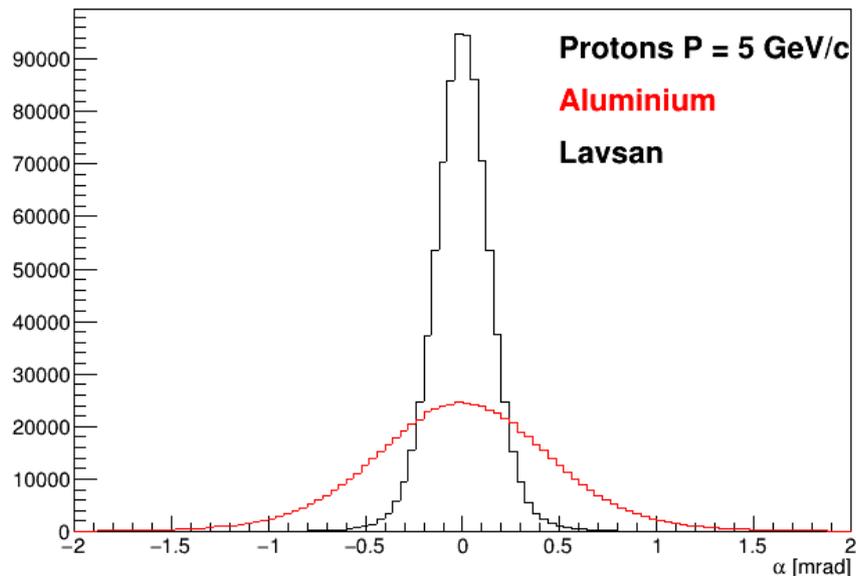


Рис. 14: Распределение углов рассеяния 5 ГэВ/с протонов при пересечении трековой системы из ДТ с алюминиевыми и лавсановыми стенками.

Аналогичные расчеты приведены в диссертации для протонов с другими импульсами в диапазоне от 1 до 50 ГэВ/с, а также для мюонов, электронов и пимезонов в этом же диапазоне. Налицо очевидное преимущество «лавсановых» ДТ по сравнению с «алюминиевыми» для всех перечисленных частиц при всех импульсах.

Глава 3 посвящена сборке и испытаниям трековых камер из ДТ в лавсановом корпусе. Для склейки камер из 30-мм ДТ используются те же оснастка и технология, как и в случае 30-мм ДТ в алюминиевом корпусе. Гранитный стол и смонтированная на нем технологическая оснастка позволяют склеивать модули камер с числом трубок в слое до 56, камеры большей ширины собираются из отдельных модулей. Длина камеры соответствует длине трубок, освоено изготовление трубок длиной до 2.55м.

Большинство изготовленных трековых станций предназначены для измерения двух (X, Y) проекций трека, они имеют прямоугольную форму, торцы всех трубок лежат в одной плоскости (рис. 15,а,б).

Одна из камер для установки СПАСЧАРМ состоит из отдельных модулей, по 8 трубок в слое, а модули сдвинуты друг относительно друга в направлении проволок (рис. 15,в). Такая компоновка позволяет измерять проекции, повернутые на заданный угол θ относительно горизонтали (на данном рисунке $\theta = 15^\circ$). Также для СПАСЧАРМ была изготовлена станция, состоящая из двух ортогонально ориентированных по отношению друг к другу камер, но повернутых на 45° относительно горизонтали (рис. 15,г).



(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 15. (а), (б) - станции из двух взаимно ортогональных плоскостей для установки ВЕС; (в) и (г) - камеры для СПАСЧАРМ, наклон ДТ относительно вертикали 15° и 45°

Герметичность камер из лавсановых ДТ вполне высокая: на рис. 16 показан график падения давления газа в 24-канальном модуле камеры ВЕС, заполненной аргоном под давлением 1540 мбар; скорость падения составляет -0.25 ± 0.10 мбар/день. Счетные характеристики всех трубок модуля, заполненного газовой смесью $\text{Ar}+7\%\text{CO}_2$, представлены на рис. 17, имеется общее плато по напряжению около 200 В.

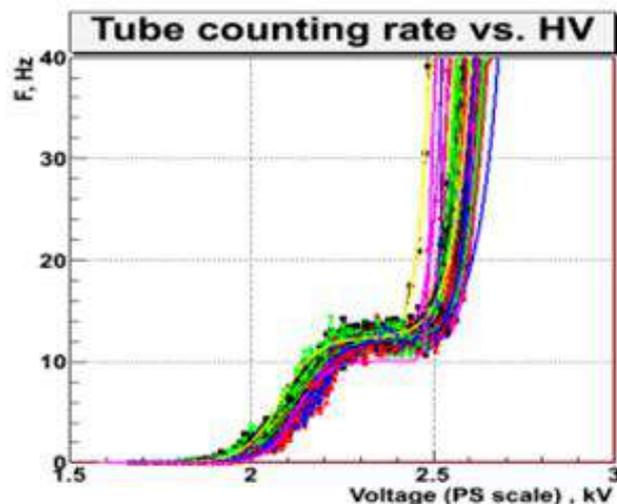
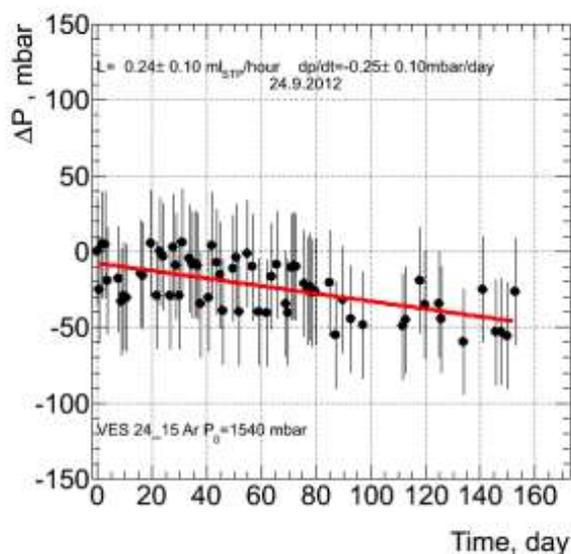


Рис. 16. График падения давления Рис. 17. Счетные характеристики ДТ модуля

Модуль лавсановой камеры из ДТ с внутренним диаметром 15-мм состоит из трех слоев трубок, образующих структуру толщиной 40.3 мм с "плотной" упаковкой, аналогичной показанной на рис. 4 для камеры из 30-мм ДТ, только в поперечном сечении проволоки любых соседних трубок располагаются на расстоянии 15.5 мм. Максимальное число трубок в слое модуля равно 16. Если нужна камера с большим числом трубок в слое, то она собирается из отдельных модулей.

Все три слоя модуля из 15-мм ДТ склеиваются одновременно. Высокая механическая точность взаимного расположения трубок в модуле при склейке достигается за счет использования специальных монтажных кассет, внутри которых с интервалом 20 – 25 см расположены позиционирующие «гребенки» из алюминиевых брусков с точными канавками, соответствующими диаметру ДТ, с шагом 15.5 мм между канавками. Во время склейки монтажная кассета располагается на гранитном столе, в нее укладываются трубки слой за слоем и в каждом слое клей (Araldite AW106) наносится с помощью дозирующего пистолета в места наибольшего сближения трубок в слое в виде прерывистой полоски шириной около 3 мм с интервалом ~ 150 мм по длине трубок. Аналогичным образом клей наносится в места примыкания соседних трубок

одного слоя к трубкам следующего слоя. На рис.18 – модуль камеры ВЕС в монтажной кассете во время склейки (а) и трековая станция ВЕС в сборе (б).

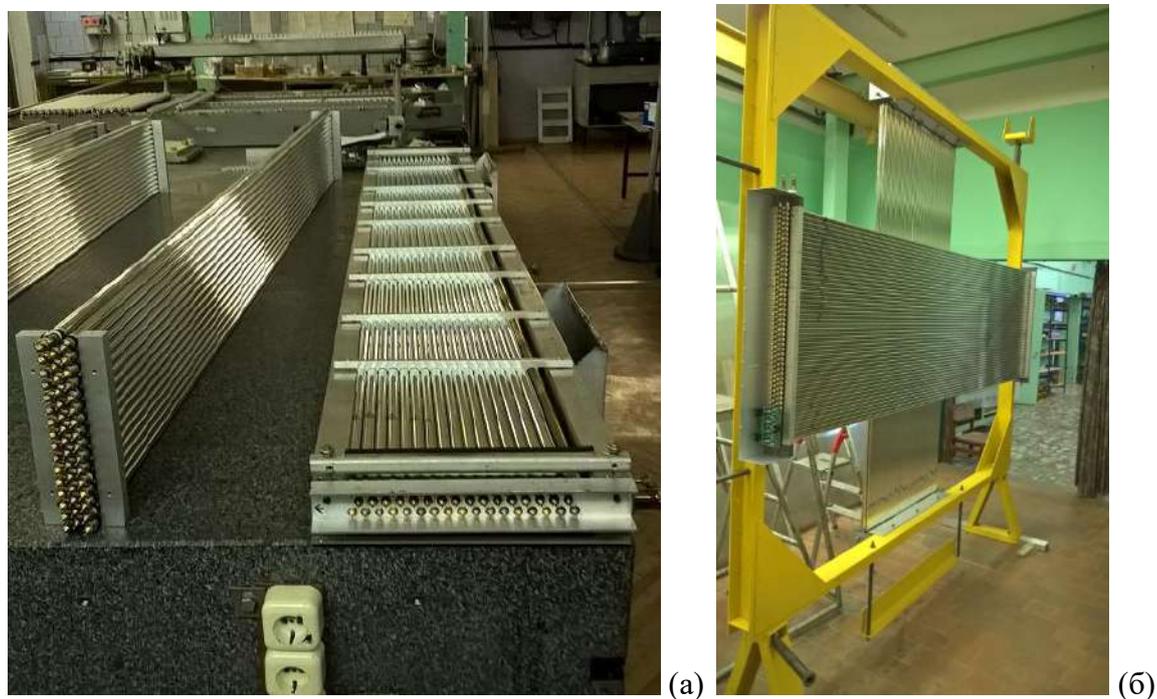


Рис.18. Модуль ВЕС в монтажной кассете; трековая станция ВЕС в сборе.

После проверки на герметичность и высоковольтных испытаний, работоспособность камеры (или модуля) проверяется с помощью потока космических частиц. Из соображений более быстрого набора статистики с длинными восстановленными треками, модуль выставляется параллельно вертикальной плоскости, а трубки при этом сориентированы горизонтально, как передний модуль на рис. 18,б. Для анализа программным образом выделяются прямые треки заряженных космических частиц (в основном это мюоны), пересекающие значительное число трубок (больше 14, рис. 19).

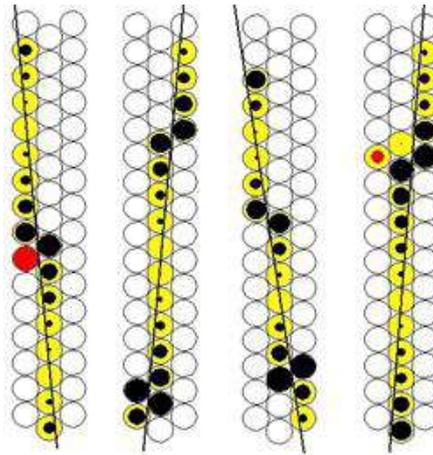
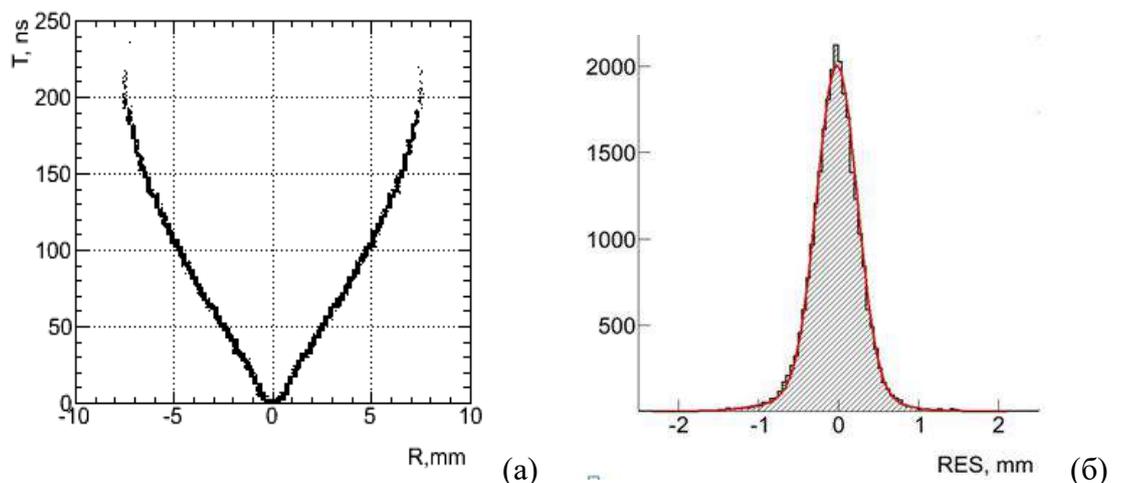


Рис. 19. Примеры реконструкции треков

Трек – общая касательная к «окружностям» сработавших ДТ (здесь под «окружностью» понимается кратчайшее расстояние от трека до сигнальной проволоки). Радиусы этих «окружностей» вычисляются по измерению времени дрейфа, нелинейное соотношение «время-расстояние» $R(t)$ (рис. 20,а) получается методом описанной в диссертации автокалибровки. О координатной точности камеры можно судить по распределению невязок — разности $R_{fit} - R_{hit,i}$, где R_{fit} — расстояние от центра трубки i до прямой, определяющей трек, $R_{hit,i} = R(t_i)$. Для «длинных» треков (пересекающих большое количество трубок), ширина этого распределения (рис. 20,б) является хорошей оценкой координатной точности трубки. Сплошная кривая распределения на данном рисунке – фит суммой двух гауссиан. Для всех шести испытанных модулей трековой станции ВЕС узкая часть фита имеет $\sigma = 250 - 270$ мкм.

Рис. 20. (а) - соотношение $R(t)$ для 15-мм лавсановых ДТ; (б) - распределение невязок

В главе 4 дано описание созданных в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ мюонно-томографических установок с акцентом на изготовленные для них регистрирующие трековые камеры из 30-мм ДТ в алюминиевом корпусе. Поскольку они аналогичны описанным в главе 1 камерам ОКА, только существенно большей площади - до $\sim 3.0 \times 1.5 \text{ м}^2$, представляется достаточным в автореферате показать только внешние виды данных установок (рис. 21).



Рис. 21. Лабораторный макет (слева) и полномасштабный прототип (справа) мюонного томографа на космическом излучении

Пространственное разрешение трековых камер лучше 300 мкм, благодаря этому данные томографические установки обеспечивают высокое угловое разрешение – не хуже 3 мрад. А высокая герметичность камер позволяет эффективно работать установкам на протяжении многих лет без обновления газового заполнения камер (подробнее – в гл. 7).

В главе 5 показаны возможные варианты исполнения дрейфовых трубок в цилиндрическом корпусе с внедренными в их объем дополнительными – полеформирующими (п.ф.) – электродами. Первоначально такой вариант трубок – с дополнительными плоскими электродами - американские участники предлагали для использования в проекте SDC [12], затем этот вариант (рис. 22) они предложили [13] для реализации в рамках проектов модернизации детектора АТЛАС. Мы (группа НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ) предложили альтернативный вариант ДТ – с дополнительными электродами в виде проволок. Фото (с вырезами для демонстрации) и схематическая

конструкция ДТ диаметром 30 мм с п.ф. проволочными электродами приведены на рис. 23.

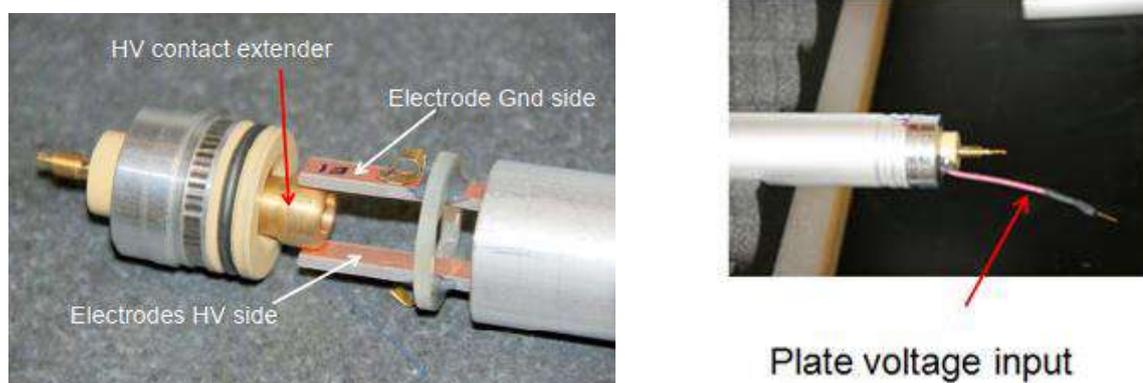


Рис. 22. Вариант ДТ с плоскими п.ф. электродами

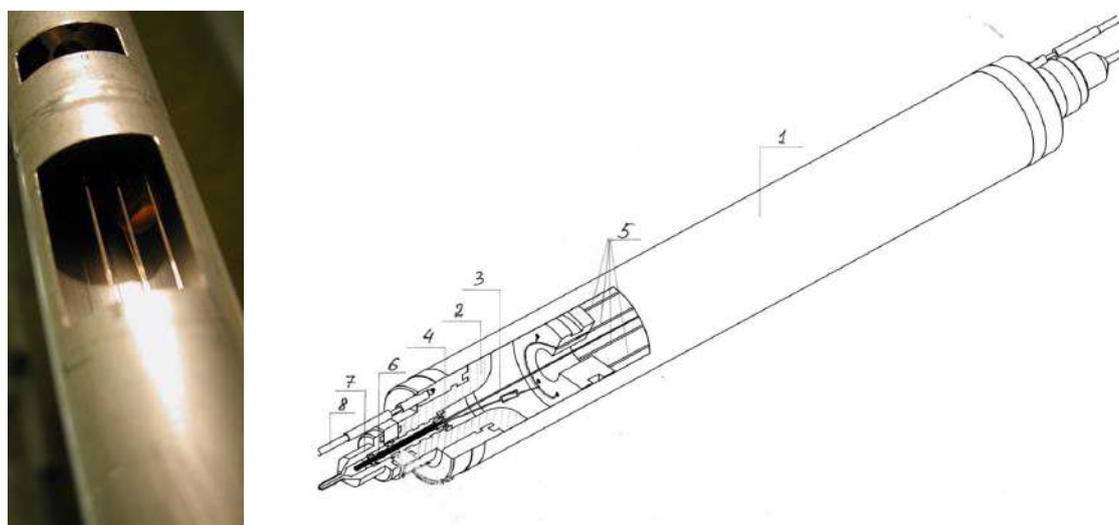


Рис. 23. ДТ с п.ф. проволоками: 1- корпус, 2 - изолятор торцевого элемента, 3 – сигнальная проволока, 4 – латунная пластинка с точным отверстием, 5 – п.ф. проволоки, 6 - медная трубка, 7 – сигнальный колпачок, 8 – заземляющий штырь

Под руководством автора диссертации изучены характеристики обоих вариантов ДТ (длиной 0.4 м) с п.ф. электродами на пучке пионов и мюонов с импульсом 40 ГэВ/с Ускорительного комплекса У-70, а для проволочного варианта – с внутренним диаметром 50 мм длиной 7.4 м - были еще выполнены оптические измерения электростатических смещений проволок, измерения с космическими частицами (определение эффективности и двухтрекового разрешения, $r(t)$ - зависимости), измерения с импульсным рентгеновским источником (измерения ширины зоны сбора электронов в зависимости от

расстояния до сигнальной проволоки, отклонения $r(t)$ -зависимости от линейной). Выводы после изучения длинной трубки таковы, что ДТ с п.ф. проволоками длиной 7.4 м с газовой смесью Ar + 10% CO₂ обеспечивает: 1) близкую к 100 % эффективность; 2) линейность $r(t)$ -зависимости в большей части дрейфового промежутка; 3) двухтрековое разрешение 2 – 7 мм; 4) реализуемость рабочего режима с одинаковым напряжением на сигнальной и п.ф. проволоках при 3.5 – 3.9 кВ. Эти результаты согласуются с результатами, полученными для коротких ДТ на 40 ГэВ/с пучках. Электростатическое смещение сигнальной проволоки составляет 50 – 150 мкм на 1 мм прогиба трубы; максимальный сдвиг времени дрейфа, вызванный электростатическим смещением п.ф. проволок, составляет 0.7 нс, что соответствует длине 35 мкм.

На рис. 24 показаны расчетные $r(t)$ -зависимости для «стандартной» 30–мм ДТ (без дополнительных электродов) и для варианта с четырьмя п.ф. проволоками.

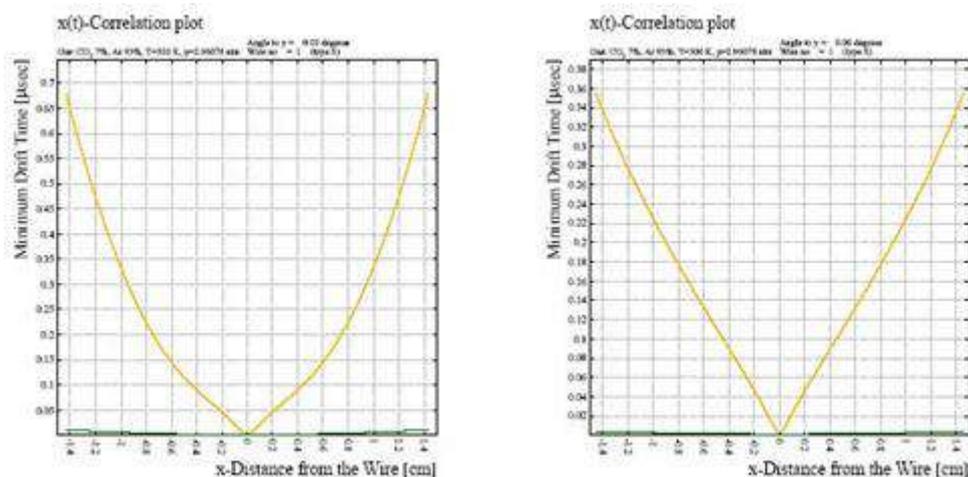


Рис. 24. $r(t)$ -зависимость для стандартной ДТ и для варианта с п.ф. проволоками

Явными преимуществами ДТ с п.ф. проволоками по сравнению со стандартной ДТ являются следующие: а) существенно укороченный сигнал (40 – 100 нс), что очень важно с точки зрения двухтрекового разрешения; б) $r(t)$ -зависимость становится практически линейной; в) существенно уменьшается область сбора электронов в ДТ, что уменьшает суммарный аккумулированный заряд на сигнальной проволоке, что в свою очередь крайне важно для

продления времени жизни ДТ; г) существенно укороченное максимальное время дрейфа.

В главе 6 обсуждается разработка и изготовление элементов и конструкций новых мюонных камер на основе 15-мм ДТ в рамках проектов модернизации детектора АТЛАС.

При светимости $\sim 10^{34} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ Большого Адронного Коллайдера (т.е. в базовом проектном варианте), фоновая загрузка МДТ-камер во внутренних слоях мюонного спектрометра доходит до 500 Гц/см^2 , что уже затрудняет реконструкцию треков. Поэтому очевидно, что при светимости на порядок большей, которая будет достигнута в результате 2-й фазы модернизации БАК (проект супер - ЛНС), МДТ-камеры из 30-мм ДТ во внутренних слоях спектрометра перестанут эффективно работать. В связи с этим мюонная коллаборация АТЛАС приняла решение о замене мюонных камер во внутренних слоях цилиндрической («Barrel») части спектрометра новыми камерами [14] на основе трубок вдвое меньшего (15 мм) диаметра, которые назвали sMDT («small MDT») [15, 16]. НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, под руководством автора диссертации, принял активное участие в sMDT-проекте.

Рис. 25,а наглядно поясняет преимущество 8-слойной sMDT-камеры по сравнению с 4-слойной МДТ-камерой в условиях одинаковой фоновой загрузки. В данном примере МДТ- камера загружена на 50%, а загрузка sMDT-камеры при этих условиях составит всего 6.5 %. На рисунке красные кружочки (в черно-белом варианте рисунка – темные) – это сработавшие трубки от фона, а желтые (более светлые) кружочки – от мюона.

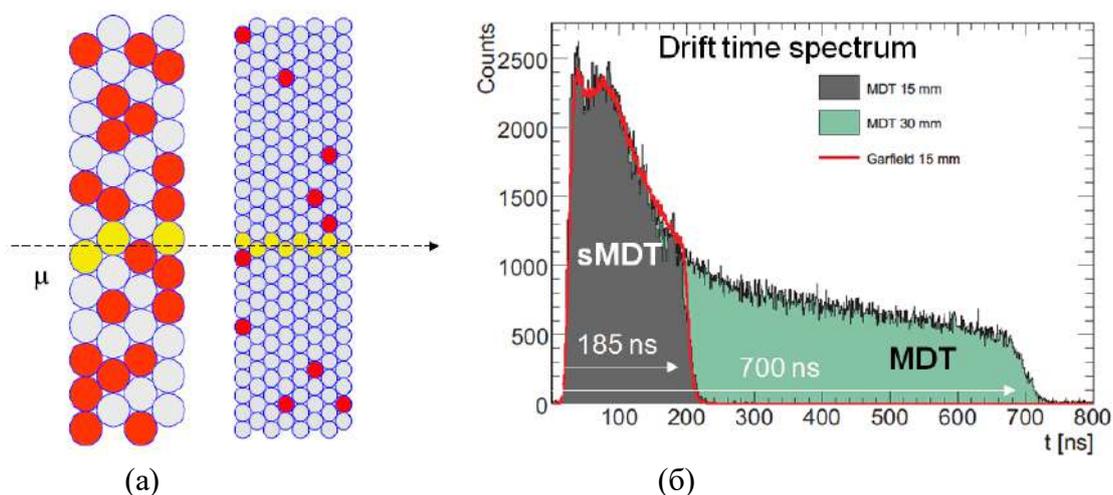


Рис. 25. Реконструкция трека мюона в условиях большого фона (а) и ВЦП- спектры MDT- и sMDT-камер (б)

Преимущество sMDT-камер по нагрузочной способности складывается за счет следующих факторов: а) вдвое меньший диаметр – в 4 раза меньше нагрузка в условиях изотропного фона; б) почти в 4 раза уменьшается время дрейфа (типичный ВЦП-спектр – на рис. 25,б). Помимо этого, в высвобожденном после демонтажа 4-слойных МДТ-камер пространстве можно разместить 8-слойные sMDT-камеры.

Как и в 30-мм трубках, толщина стенки алюминиевой трубы 0.4 мм, диаметр сигнальной проволоки из золоченой W-Re проволоки 50 мкм, позиционирование проволоки осуществляется с помощью локатора-твистера с точностью 10 мкм. На рис. 26 - внешние виды MDT- и sMDT-трубок.



Рис. 26. Внешний вид MDT- и sMDT- трубок

На рис. 27 показана $r(t)$ - зависимость двух вариантов дрейфовых трубок. Для sMDT зависимость почти линейная и не имеет резко возрастающего характера, в отличие от MDT.

Обязательства, принятые и успешно выполненные НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ по проектам sMDT, включали в себя разработку технологии

изготовления, производство и испытания следующих элементов и конструкций:

- торцевые заглушки для sMDT-трубок – более 100 тыс. шт.;
- несущие механические конструктивы sMDT-камер – в сумме 124 комплекта;
- электромагнитные экраны, газовые соединители – 28 и 16 комплектов;
- трансформируемые монтажно-транспортные рамы - 112 шт.

Были выполнены сборка и испытания более 30 тыс. шт. sMDT-трубок.

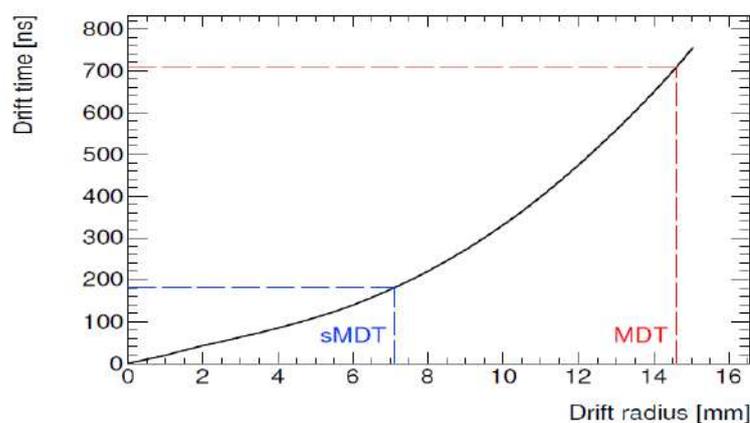


Рис. 27. $r(t)$ - зависимость для двух вариантов ДТ

Финальный контроль качества sMDT – трубок и камер на их основе осуществлялся в Институте Макса Планка (г. Мюнхен, Германия). С помощью 3D- измерительной системы (СММ – Coordinate Measuring Machine, рис. 28,а) измерялись положения сигнальных проволок всех вклеенных в камеру дрейфовых трубок. Результат получился феноменальный (рис. 28,б) – среднеквадратичное отклонение сигнальных проволок от номинального положения в sMDT-камере типа BMG составляет ~ 5 мкм при заданной допустимой (номинальной) точности позиционирования 10 мкм.

На рис. 29 – sMDT- камеры в монтажно-транспортных рамах.

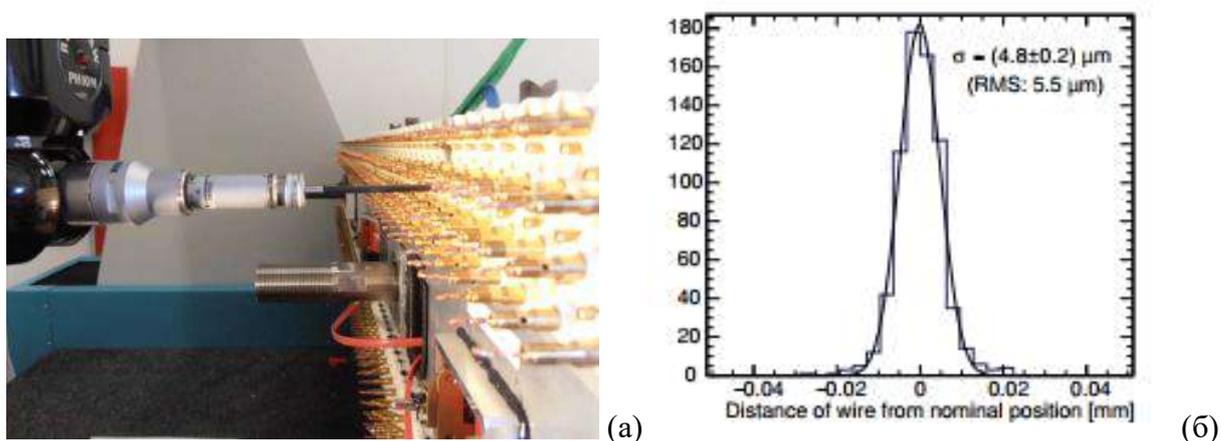


Рис. 28. Измерение положения сигнальных проволок с помощью СТМ-машины (а), распределение отклонений сигнальных проволок от номинального положения (б)



Рис. 29. sMDT- камеры в монтажно-транспортных рамах

В главе 7 обсуждается постановка и результаты экспериментов по изучению возможности долговременной работоспособности дрейфовых камер (ДК) без постоянного обновления рабочей газовой смеси.

Как правило, ДК работают с непрерывным обновлением рабочей газовой смеси, скорость потока варьируется в очень большом диапазоне от 0.01 до 10 объемов камеры в час и зависит от особенностей конструкции камеры и условий эксперимента. Непрерывное прокачивание газовой смеси через камеру вызвано следующими основными причинами:

- стремлением сохранить постоянным состав газовой смеси, компенсировать потери ее компонентов из-за недостаточной герметичности камеры и удалить примеси, проникающие из окружающей среды и выделяющиеся из элементов конструкции камеры;

- желанием поддержать неизменными такие рабочие параметры, как скорость дрейфа и газовое усиление;
- необходимостью удаления из камеры продуктов плазмо-химических реакций, происходящих при газовом усилении и приводящих к радиационному старению камер, особенно при высоких радиационных нагрузках.

Имея достаточно герметичную ДК, работающую в условиях умеренных радиационных нагрузок, и умея оперативно учитывать изменения скорости дрейфа и газового усиления, можно отказаться от постоянного продува ДК рабочей смесью: однажды заполнить камеру и работать так долго, насколько это возможно. Выгоды от работы камер без постоянной циркуляции газовой смеси очевидны: не нужна сложная газовая система с постоянной прокачкой газа через камеры, экономится газ и снижаются трудозатраты на обслуживание.

Говоря о том, что камера используется без постоянного продува газовой смесью, нужно доказать, что она при этом работоспособна. В качестве критериев работоспособности целесообразно использовать ряд таких характеристик, которые измеряются в пределах самой камеры, без привлечения дополнительных детекторов. Эти характеристики следующие:

- Герметичность камеры. Наиболее естественный и простой способ проверки герметичности камеры - измерение падения давления газа в ней. В камере создается избыточное давление, которое затем контролируется в течение некоего времени. По этим данным определяется скорость падения давления $-dP/dt$, как правило, по линейному фиту экспериментальных данных $P(t)$ с коррекцией на изменение температуры.
- Счетная характеристика при естественном радиационном фоне (пример - на рис. 30). На кривой видно явно выраженное плато, F_{plato} - скорость счета на плато. Начало и конец плато отмечены двумя стрелками, V_{beg} и V_{end} , которые определяются как напряжение, при котором скорость счета равна 0.5 и $1.2 F_{\text{plato}}$, соответственно. Величина F_{plato} зависит от геометрических параметров камеры (диаметр и длина ДТ, их ориентация). Рабочее напряжение, из соображений лучшего координатного разрешения, обычно выбирается вблизи конца плато,

немного ниже V_{end} . В закрытой камере, без постоянного газообмена, необходимо предусматривать оперативный контроль счетной характеристики с целью коррекции, при необходимости, рабочего напряжения.

- ВЦП-спектр - распределение сигналов ДТ во времени, dN/dt . Пример спектра для 30-мм ДТ показан на рис. 31. Его края могут быть отфитированы некоторыми функциями (обычно это Ферми-распределение в комбинации с полиномами), и по параметрам фита можно определить характерные точки временного распределения: начало и конец, t_0 и t_1 . Поведение максимального времени дрейфа ($T_{max} = t_1 - t_0$) является индикатором изменения состава и давления газовой смеси в камере.

- Реконструкция треков и оценка координатного разрешения (процедура описана выше применительно к гл.3).

- Автокалибровка - вычисление $r(t)$ -соотношения итерационным методом, анализируя траектории треков частиц, прошедших через достаточно большое количество ДТ в камере.

- Загрузка каналов. Сравнительный анализ загрузок позволяет легко увидеть неработающие или шумящие каналы. Этот метод контроля работоспособности может быть дополнен какими-либо критериями отбора, например, совпадением сигналов с камеры с соответствующим триггерным счетчиком. В бестриггерном режиме простейший отбор - совпадение некоторого числа (N) сигналов с камеры в пределах временного окна ("временной кластер" с числом сигналов N), определяемого максимальным временем дрейфа. На рис. 32 приведен пример загрузки дрейфовых трубок 3-слойной камеры (48 горизонтально расположенных ДТ в слое, естественный радиационный фон) при кластеризации во времени с условием, что число сработавших трубок в кластере $N \geq 20$. Форма распределения на данном рисунке отражает геометрический акцептанс для отбора, три слоя соответствуют трем пикам, уменьшение загрузки в центре слоев связано с наличием омертвленной зоны в середине нескольких трубок каждого слоя.

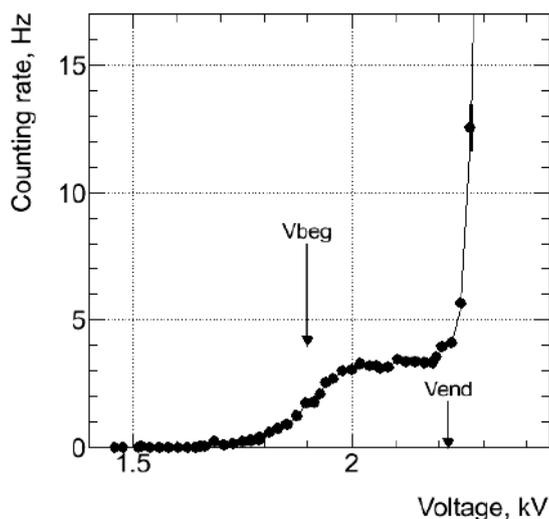


Рис. 30. Пример счетной характеристики

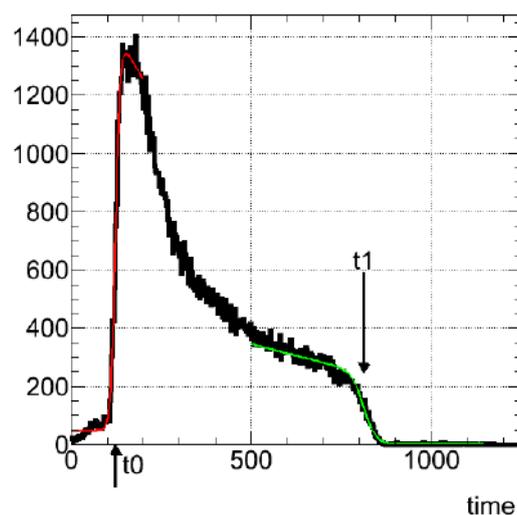


Рис. 31. ВЦП- спектр ДТ

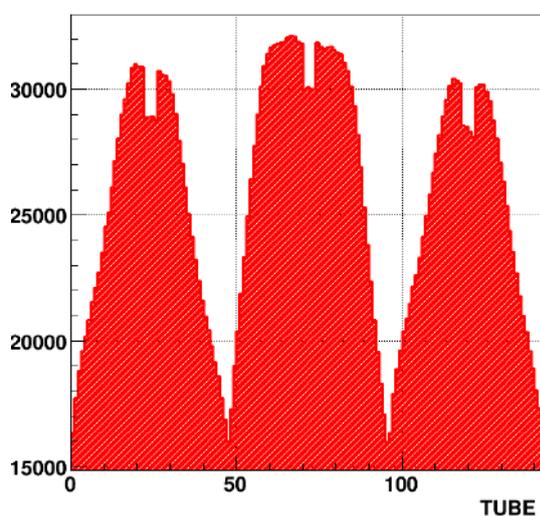


Рис. 32. Загрузка ДТ с отбором по временной кластеризации

Исследования долговременной работоспособности без постоянного обновления рабочей газовой смеси были проведены с большим количеством ДК. Так, из камер на основе 30-мм ДТ в алюминиевом корпусе были исследованы: камеры АТЛАС EOS2A10 (длина трубок от 1.75 до 2.19 м) и EOL5A13 (длина трубок от 4.95 до 5.52 м), камеры прототипов мюонного томографа, камера ОКА. Из камер на основе 30-мм лавсановых ДТ была исследована камера ОКА с длиной трубок 1536 мм. Из камер на основе 15-мм лавсановых ДТ была исследована камера СПАСЧАРМ с длиной трубок 568 мм.

Камера ОКА из ДТ в алюминиевом корпусе была заполнена 28.04.2015 газовой смесью Ar + 7% CO₂ при давлении около 2.9 бар (абс.), падение давления составляло около -1.1 мбар/сутки. Эпизодически измерялись счетные характеристики камеры и определялось максимальное время дрейфа. Счетные характеристики для нескольких высоковольтных сканов (через 1, 8 и 23 месяца после заполнения) приведены на рис. 33 (даты сканов указаны на рисунке).

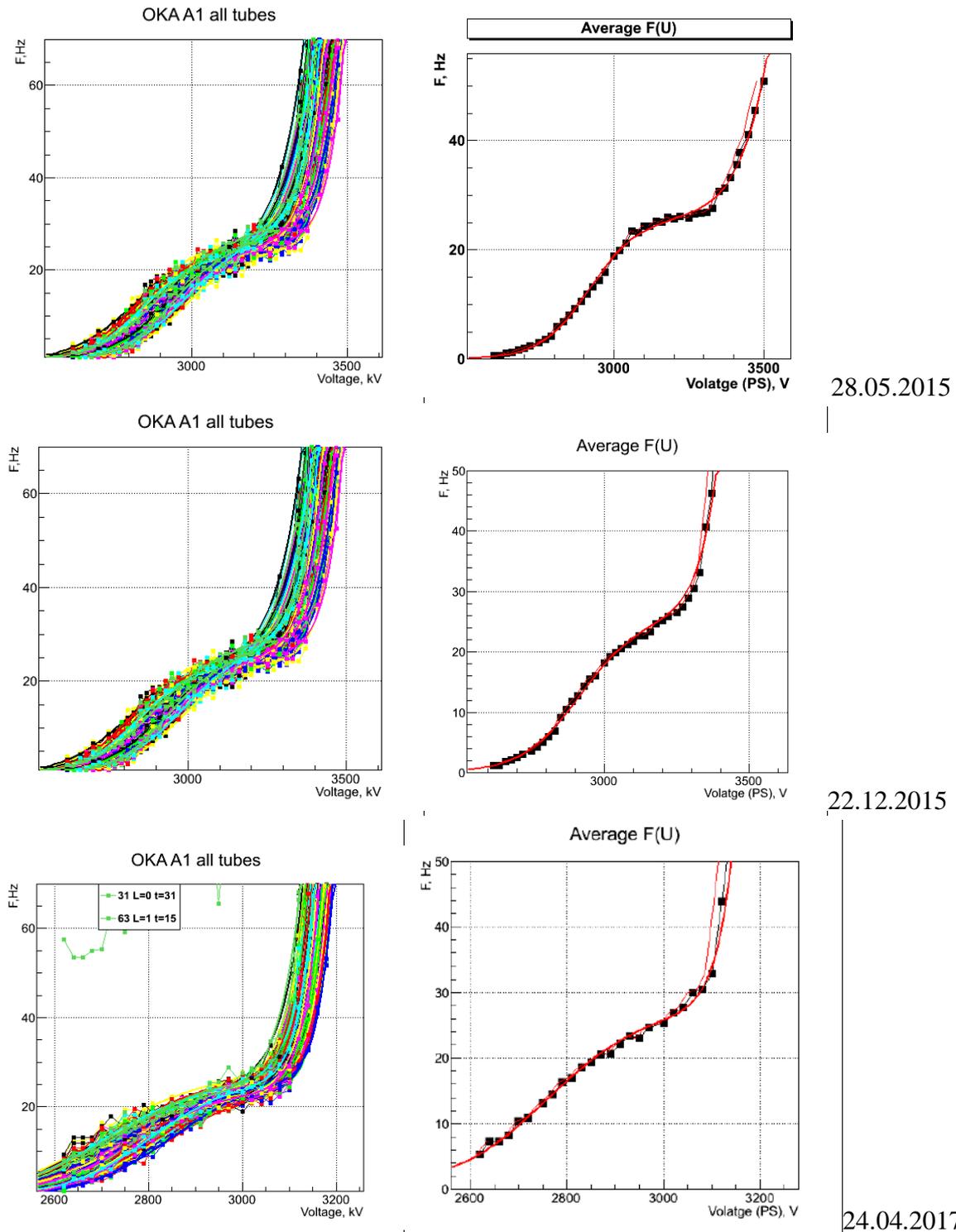


Рис. 33. Счетные характеристики камеры ОКА (с алюминиевыми ДТ)

Из анализа показанных на этом рисунке счетных характеристик можно получить область рабочих напряжений камеры (рис. 34, заштриховано).

Камера ОКА из 30-мм лавсановых ДТ была заполнена газовой смесью Ar+7% CO₂ при давлении 1524 мбар (абс. при 20°C) 28 ноября 2014 г. Падение давления -0.32 мбар/сутки (наклон прямой, линейный фит, рис. 35).

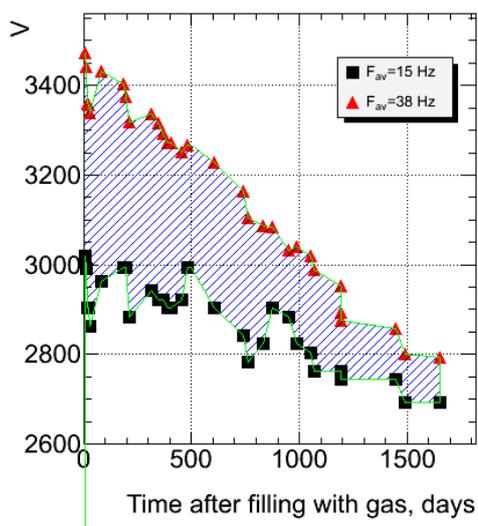


Рис. 34. Область рабочих напряжений

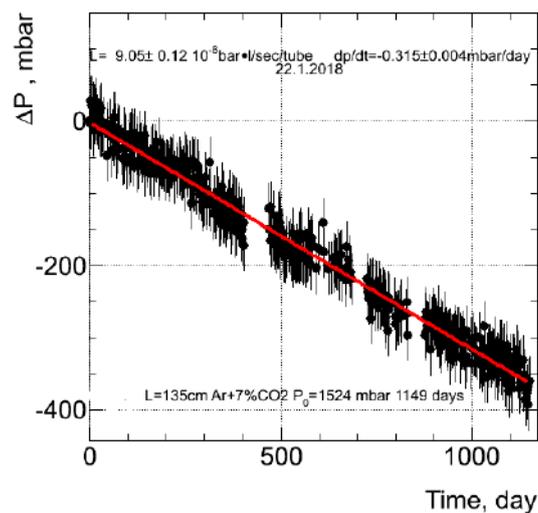
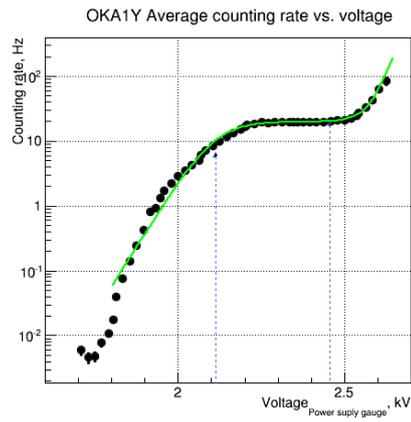
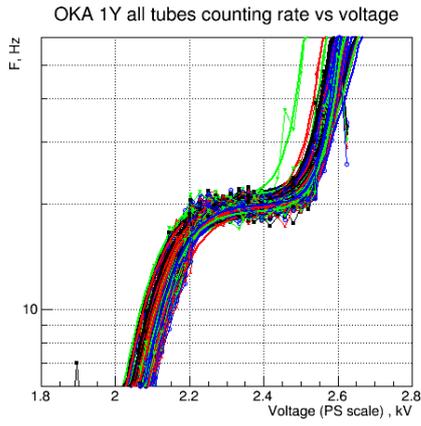


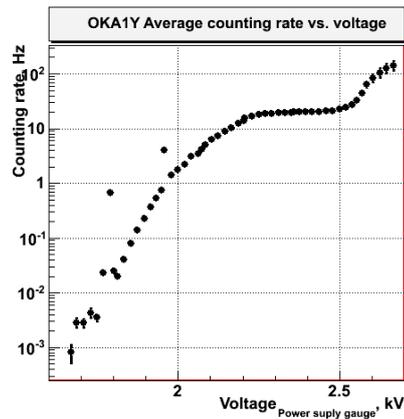
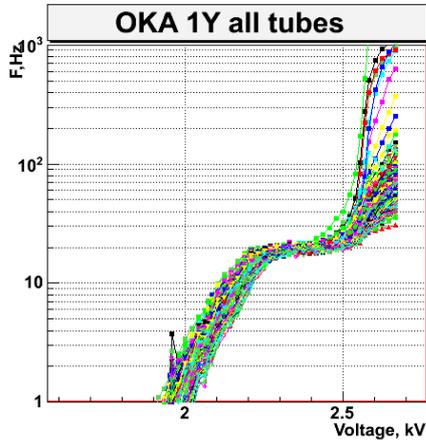
Рис. 35. Падение давления в ДК ОКА

На рис. 36 приведены результаты нескольких сканов с указанными датами сканирования: левый график в каждой паре - счетные характеристики всех трубок, правый - усредненная по трубкам счетная характеристика. Выведенная из анализа показанных на этом рисунке счетных характеристик область рабочих напряжений камеры приведена на рис. 37.

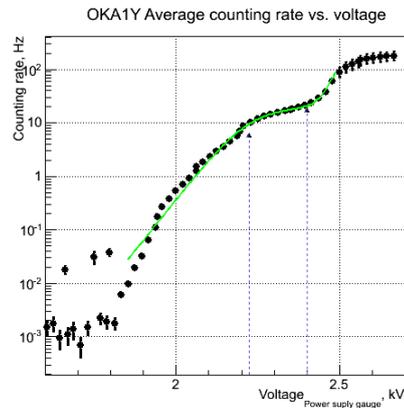
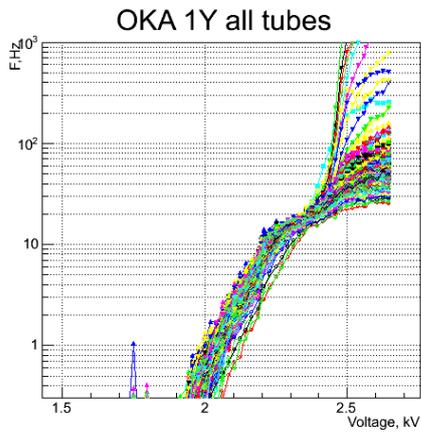
Координатное разрешение, полученное из распределения невязок для треков с числом сработавших ДТ более 25, приведено на рис. 38. Огибающая кривая - фит суммой двух нормальных распределений, для узкой части $\sigma = 209$ мкм. На рис. 39 приведено соотношение $R(t)$ для данной камеры.



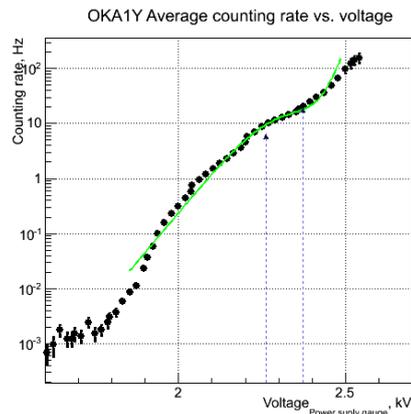
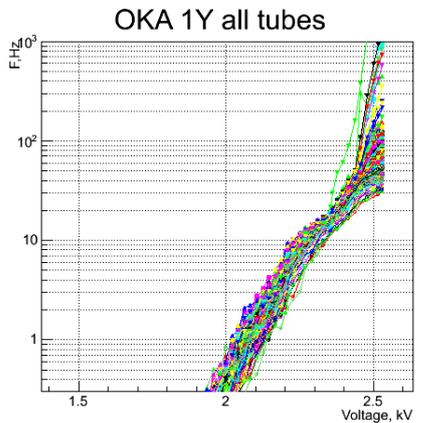
28.11.2014



14.11.2015



11.03.2016



06.06.2016

Рис. 36. Счетные характеристики камеры ОКА (с лавсановыми ДТ)

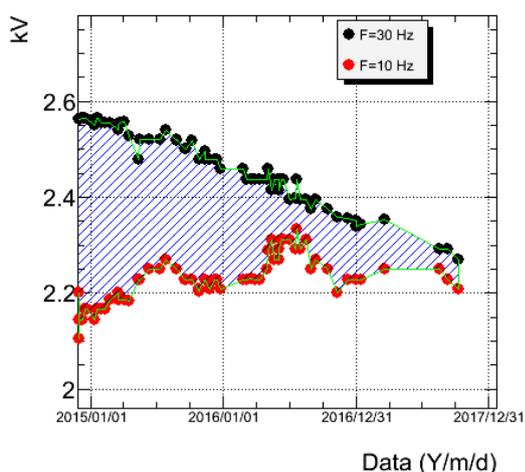


Рис. 37. Рабочая область ДК ОКА

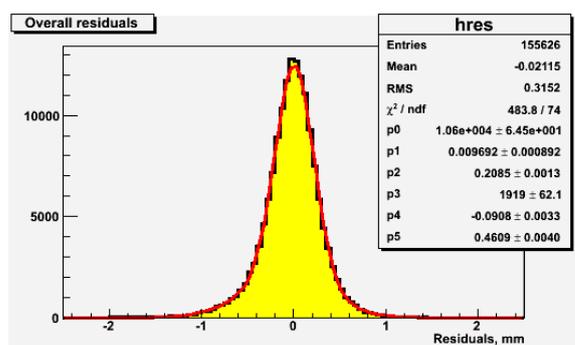


Рис. 38. Распределение невязок

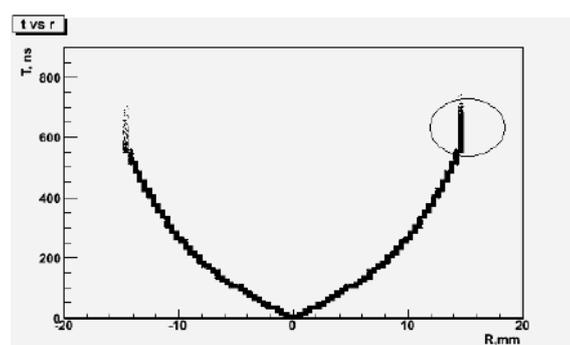


Рис. 39. R(t)-соотношение для ДТ ОКА (лавс.)

Камера из 15-мм лавсановых ДТ при начальном давлении 1940 мбар газовой смеси Ar+7% CO₂ имела падение давления -18.5 мбар/сутки, т.е. герметичность была не очень хорошая. Счетные характеристики всех трубок и усредненные для камеры показаны на рис. 40 для двух в/в сканов: сразу после заполнения камеры рабочей газовой смесью (верхние графики на рисунке) и через 23 дня после заполнения (нижние графики).

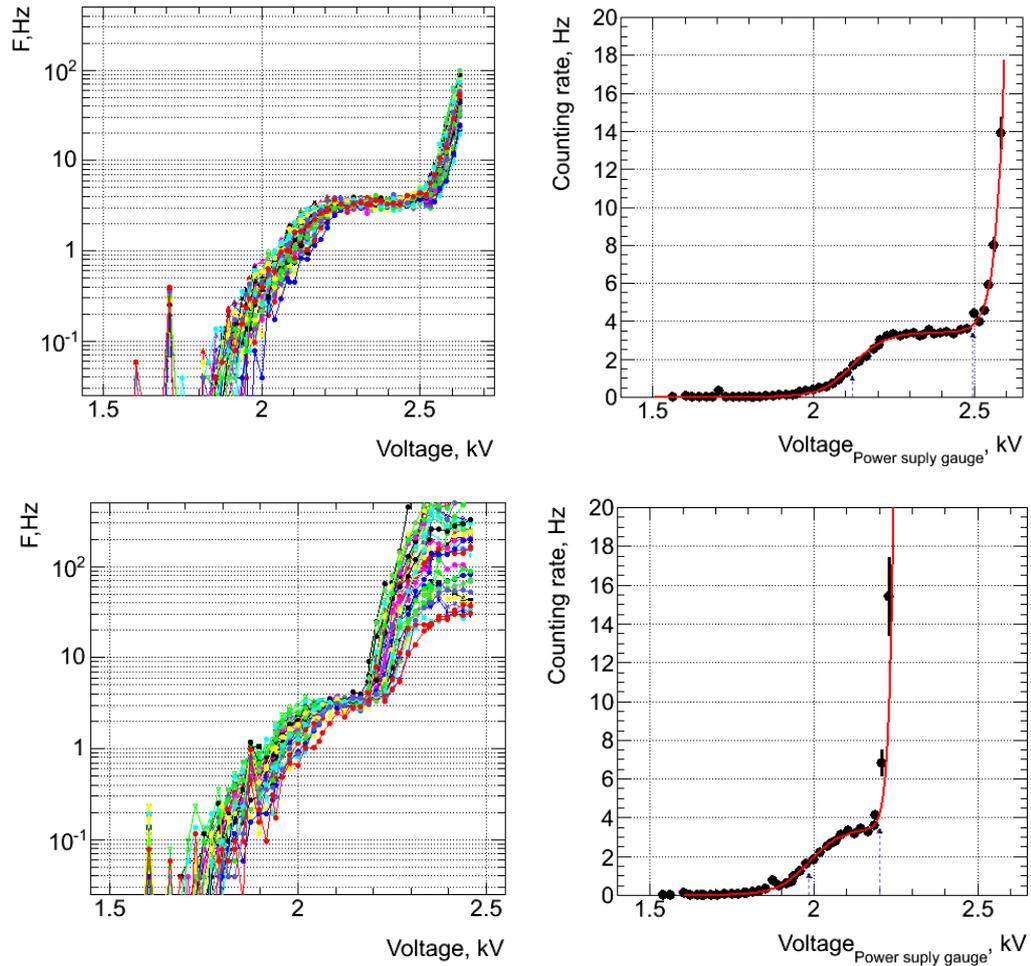


Рис. 40. Счетные характеристики начальные (верхние графики) и через 23 дня (нижние графики)

На рис. 41 показаны начало (нижняя черная кривая) и конец плато (верхняя черная кривая) в зависимости от времени после заполнения газовой смесью. Заштрихована область, где эффективность для регистрации треков близка к 100%.

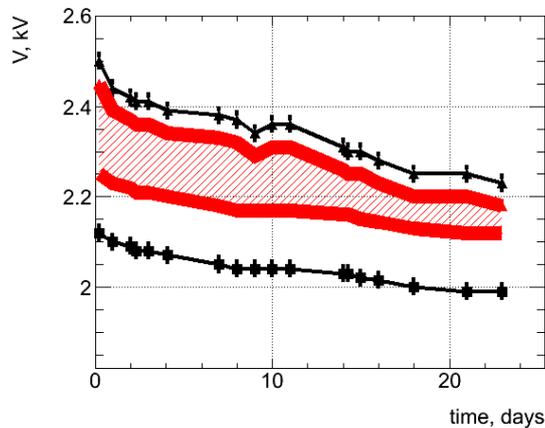


Рис. 41. Область рабочих напряжений модуля из 15-мм лавсановых ДТ

Из-за быстрого изменения давления рабочее напряжение сильно меняется, что учитывалось при проведении длительных экспозиций. За весь период наблюдений, длившихся 23 дня, разрешение варьировалось в интервале 175-250 мкм. Приведенные на рис. 20 при описании результатов главы 3 соотношение «время – расстояние» $R(t)$ и распределение невязок были получены через 3 дня после заполнения камеры газовой смесью. Для распределения невязок отбирались треки с числом сработавших трубок не менее 14, оно фитировано суммой двух гауссианов, для узкой части $\sigma = 225 \pm 5$ мкм. Похожие результаты были получены для всех других модулей из 15-мм лавсановых ДТ при «беспродувном» режиме работы.

Экспериментально обоснованные выводы к главе 7: камеры на основе алюминиевых трубок могут работать без замены газовой смеси годами (эксперимент успешно длился около 9 лет и был вынужденно прерван по техническим причинам); камеры на основе ДТ в корпусе из 125 мкм лавсановой пленки, при обеспечении хорошей герметичности, в зависимости от диаметра и длины трубок могут работать в таком режиме до полутора лет.

Заключение

Основным достижением диссертации является разработка новой методики изготовления многослойных трековых детекторов большой площади, отличающейся тем, что регистрирующими ячейками являются тонкостенные дрейфовые трубки диаметром 15 - 30 мм нового типа, а именно в самоподдерживающихся (сохраняющих форму и выдерживающих натяжение сигнальных проволок 350г без каких-либо специальных поддержек) корпусах из двухсторонне-металлизированной лавсановой пленки толщиной 125 мкм. Данная методика успешно использована при изготовлении новых трековых детекторов для оснащения четырех экспериментальных физических установок НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ: ОКА, ФОДС, ВЕС, СПАСЧАРМ. При этом:

1. Разработаны конструкция и технология массового производства дрейфовых трубок в лавсановых корпусах большой длины – до 2.5 м. Разработана и собрана установка ультразвуковой сварки, позволяющая сваривать герметичным продольным швом лавсановую пленку толщиной 125 мкм с двухсторонним алюминиевым напылением для изготовления корпусов дрейфовых трубок в виде цилиндров правильной формы диаметром 30 мм и 15 мм. Разработан и отлажен весь комплекс испытаний лавсановых дрейфовых трубок, предшествующий их вклеиванию в состав трекового детектора. Изготовлено и испытано более 7 тыс. лавсановых дрейфовых трубок, необходимых для создания новых трековых станций физических установок ОКА, ВЕС, Спасчарм и ФОДС на Ускорительном комплексе У-70 НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.

2. Разработаны конструкция и технология производства трехслойных трековых камер из дрейфовых трубок длиной до 2.5 м в корпусах из 125-мкм лавсана с металлизированным покрытием диаметром 30 мм и 15 мм. В сумме изготовлено 47 камер, объединенных в 20 трековых станций для физических установок ОКА, ВЕС, СПАСЧАРМ и ФОДС. В настоящее время данные станции составляют основу трековых систем всех четырех перечисленных установок и по своим физическим характеристикам – эффективности, пространственному разрешению и загрузочной способности – полностью удовлетворяют требованиям экспериментов, проводимых на этих установках.

3. Разработаны, изготовлены, испытаны и переданы заказчикам для оснащения экспериментальных физических установок ОКА и ФОДС на Ускорительном комплексе У-70 НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ 12 трековых камер, регистрирующими ячейками которых являются дрейфовые трубки в тонкостенном (0.4 мм) цилиндрическом алюминиевом корпусе диаметром 30 мм. Чувствительная площадь камер – от 0.7 x 1.0 м² до 1.7 x 1.7 м², пространственное разрешение – не хуже 0.3 мм. Суммарное количество дрейфовых трубок в камерах - 1536 шт.

По этой же технологии, также на основе 30-мм дрейфовых трубок в алюминиевом корпусе изготовлены 8 трековых камер площадью $1 \times 1 \text{ м}^2$ и 16 трековых камер площадью $1.5 \times 3 \text{ м}^2$ для лабораторного макета и полномасштабного прототипа мюонного томографа на космическом излучении.

4. Комплексно изучены дрейфовые трубки с полеформирующими электродами двух модификаций (плоскими и проволочными): обе модификации - на пучках Ускорительного комплекса У-70, с четырьмя дополнительными проволочными электродами - в потоке космических частиц и с импульсным рентгеновским источником. Существенных различий по физическим характеристикам между данными модификациями нет: обе позволяют получить пространственное разрешение не хуже 200 мкм, двухтрековое разрешение около 2 мм и близкую к линейной зависимость время-координата. Важным преимуществом «проволочного» варианта является возможность реализовать режим, когда в дрейфовой трубке диаметром 30 мм сигнальная и четыре полеформирующие проволоки находятся под одинаковым потенциалом. Экспериментально проверена работоспособность длиной (7.4 м) дрейфовой трубки данной конструкции.

5. Разработана технология и налажено массовое производство высокоточных многофункциональных торцевых заглушек дрейфовых трубок малого (15 мм) диаметра для модернизации трековых камер мюонного спектрометра АТЛАС. В общей сложности изготовлено более 100 тыс. шт. торцевых заглушек, в комплекте с пластиковыми фиксаторами локаторов и медными фиксаторами сигнальных проволок.

6. Организована сборка и испытания персоналом НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ более 30 тыс. прецизионных (обеспечивающих не хуже чем 10-мкм позиционирование сигнальных проволок в склеенной камере) дрейфовых трубок по программам 1-й и 2-й фаз модернизации детектора АТЛАС.

7. Разработана методика изготовления и обеспечено производство механических элементов и конструкций новых мюонных камер на основе

прецизионных 15-мм ДТ в рамках проектов модернизации детектора АТЛАС на БАК (г. Женева, Швейцария). Укомплектовано в общей сложности 126 камер, включающих в себя более 60 тыс. дрейфовых трубок. Все контролируемые параметры находятся в рамках допустимых границ.

8. Разработаны, изготовлены и отправлены в ЦЕРН специальные трансформируемые монтажно-транспортные рамы в количестве 112 шт., предназначенные для манипулирования новыми мюонными камерами во время их оснащения накамерной газовой системой, электроникой, элементами системы оптико - электронного контроля, финальной сертификации и подготовки к монтажу в шахте детектора АТЛАС.

9. Разработаны метод и регламент контроля и корректировки параметров дрейфовых трековых детекторов, позволяющих обеспечить их длительную работу без постоянного обновления рабочей газовой смеси. Показано, что камеры на основе 30-мм алюминиевых трубок могут в таком «беспродувном» режиме работать годами (эксперимент успешно продолжался 9 лет), камеры на основе дрейфовых трубок в корпусе из 125 мкм лавсановой пленки, при обеспечении хорошей герметичности - до полутора лет.

Список цитированной литературы:

1. ATLAS Muon collaboration. ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report. CERN/LHCC 97-22 (1997).
2. CMS collaboration. CMS Technical Design Report. CERN/LHCC 2006-001 (2006).
3. ATLAS collaboration. Letter of intent for the Phase-II upgrade of the ATLAS experiment. LHCC-I-023, CERN/LHCC 2012-022 (2012).
4. S.I.Bityukov, G.V.Borisov, Yu.B.Bushnin, et al. Observation of a resonance with mass $M=1814\text{Mev}$. Physics Letters B, Volume 268, Issue 1, (1991), pp. 137 – 141.
5. V.F.Obraztsov. ОКА: the experimental program with RF-separated K^+ -beam.

- Каон 2005 Int. Workshop. Northwestern University, Evanston, USA, 13-17 June 2005.
6. В.В.Абрамов, Б.Ю.Балдин, А.Ф.Бузулуцков и др. Поворотный двухплечевой спектрометр для исследования жестких взаимодействий на Серпуховском ускорителе. Приборы и Техника Эксперимента, 6, (1992), с.75.
 7. В.В.Абрамов, И.Л.Ажгирей, А.А.Борисов и др. Концептуальный проект СПАСЧАРМ. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2023, Т.54, вып. 1, с. 6 – 189.
 8. S. Ivanov. Accelerator complex U70 of IHEP: status and upgrades, on behalf of the U-70 staff, in: Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, Kaluga Region, Russia, 2014, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/rupac2014/papers/tux02.pdf>.
 9. Ch.Sutton (editor). Russian team builds biggest MDT chambers for muon spectrometer. International Journal of High-Energy Physics “CERN COURIER”, Vol. 45, No 3, 2005.
 10. The ATLAS TRT Collaboration. Journal of Instrumentation JINST 3 P02013 (2008), <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/02/P020132>.
 11. В.В.Акулич, К.Г.Афанасьев, В.Г.Баев и др. Тонкостенные дрейфовые трубки с резистивным катодом из DLC и внешним стриповым считыванием сигнала. Приборы и техника эксперимента, 6, (2023), с. 10-17.
 12. Solenoidal Detector Collaboration. Technical design of a detector to be operated at the Superconducting Super Collider. SDC note 92-201; SSCL-SR-1215, (1 April 1992).
 13. B.Zhou and J.Chapman. Field Shaped Drift Cells. Presentation at ATLAS Muon Upgrade meeting on 28.10.2008, <http://indico.cern.ch/materialDisplay.py?contrId=43987>.
 14. ATLAS collaboration. The ATLAS BIS78 project, ATL-MUON-INT-2016-002, CERN, 2016.

15. C.Ferretti, H.Kroha on behalf of the ATLAS Muon collaboration. Upgrades of the ATLAS Muon Spectrometer with sMDT chambers. Nucl. Instr. and Meth., A824 (2016), p. 538.
16. H.Kroha, et al. Construction and test of new precision drift tube chambers for the ATLAS Muon Spectrometer. Nucl. Instr. and Meth., A845 (2017), p. 244.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, включенных в Перечень ВАК и представленных в базах цитирования Web of Science и Scopus:

1. M.E.Barinov, V.V.Biryukov, A.A.Borisov, S.V.Erin, **R.M.Fakhrutdinov**, A.P.Filin, V.N.Gushchin, A.N.Isaev, A.S.Kozhin, A.V.Larionov, N.A.Shalanda, M.M.Soldatov, V.I.Yakimchuck. Development of 10 sq.m hodoscope made of drift tubes for cosmic ray muon registration. Physics of Atomic Nuclei, 2024, Vol.87, No 2, pp.93-98.
2. N.I.Bozhko, A.A.Borisov, A.S.Kozhin, and **R.M.Fakhrutdinov**. Cosmic-Ray muon tomography setup: long-term life of drift tube chambers. Physics of Atomic Nuclei, 2020, Vol.83, No 2, pp.258-261.
3. O.Kortner, H.Kroha, S.Nowak, S.Podkladkin, P.Rieck, K.Schmidt-Sommerfeld, E.Takasugi, V.Walbrecht, **R.Fakhrutdinov**, A. Kozhin. Upgrades of the ATLAS muon spectrometer with new small-diameter drift tube chambers. Nucl. Instr. and Meth., A936, 2019, pp.509-510.
4. G.Aad, B.Abbott, D.C.Abbott, ..., **R.Fakhrutdinov**, et al. Resolution of the ATLAS muon spectrometer monitored drift tubes in LHC Run 2. Journal of Instrumentation JINST_14_P09011 (2019) pp.1-34.
5. Н.И.Божко, А.А.Борисов, А.С.Кожин, **Р.М.Фахрутдинов**. Дрейфовые камеры из лавсановых трубок диаметром 15 мм и длиной до 2,5 метров. Ядерная физика и инжиниринг, 2019, том 10, № 1, с. 49-55.

- Перевод: N.I.Bozhko, A.A.Borisov, A.S.Kozhin, and R.M.Fakhrutdinov. Drift chambers made of mylar tubes with diameter of 15 mm and length of up to 2.5 m. Physics of Atomic Nuclei, 2019, Vol.82, No 9, pp.1311-1316.*
6. A.Kozhin, A.Borisov, N.Bozhko, **R.Fakhrutdinov** and I.Plotnikov. Tracking chamber made of 15-mm mylar drift tubes. Journal of Instrumentation JINST_12_C05005, 2017, pp.1-5.
 7. Н.И.Божко, А.А.Борисов, А.С.Кожин, **Р.М.Фахрутдинов**. Трековые камеры из дрейфовых трубок в лавсановом корпусе для экспериментов на ускорительном комплексе НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ. Ядерная физика и инжиниринг, 2017, том 8, № 4, с.1-7.
Перевод: N.I.Bozhko, A.A.Borisov, A.S.Kozhin, and R.M.Fakhrutdinov. Tracking chambers made of mylar drift tubes for experiments at the accelerator complex of the National Research Center “Kurchatov Institute” - IHEP. Physics of Atomic Nuclei, 2018, Vol.81, No 9, pp.1312-1317.
 8. И.С.Плотников, А.А.Борисов, Н.И.Божко, А.С.Кожин, А.С.Козелов, Д.С.Марков, **Р.М.Фахрутдинов**, Н.А.Шаланда, О.П.Ющенко, В.И.Якимчук. Система сбора данных мюонного томографа на базе камерной электроники. Приборы и Техника Эксперимента, 2017, №1, с.40-44.
 9. H.Kroha, **R.Fakhrutdinov** and A.Kozhin. New high-precision drift-tube detectors for the ATLAS muon spectrometer. Journal of Instrumentation JINST_12_C06007, 2017, pp.1-7.
 10. G.Aad, V.Abbott, J.Abdallah, ..., **R.Fakhrutdinov**, et al. Muon reconstruction performance of the ATLAS detector in proton – proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV. Eur. Phys. J. C76 (2016) 292, pp. 1 – 45.
 11. А.А.Борисов, Н.И.Божко, В.Н.Гущин, А.С.Кожин, А.В.Ларионов, Б.В.Леонтьев, И.С.Плотников, **Р.М.Фахрутдинов**. Камера из прецизионных майларовых дрейфовых трубок. Приборы и Техника Эксперимента, 2014, №4, с.39-45.

- Перевод: A.A.Borisov, N.I.Bozhko, V.N.Gushchin, A.S.Kozhin, A.V.Larionov, B.V.Leont'ev, I.S.Plotnikov, and R.M.Fakhrutdinov. A chamber composed of precision mylar drift tubes. Instruments and Experimental Techniques, 2014, Vol. 57, No 4, pp.410 – 416.*
12. A.Borisov, N.Bozhko, **R.Fakhrutdinov**, A.Kozhin, B.Leontiev and A.Levin. Track chambers based on precision drift tubes housed inside 30 mm mylar pipe. Journal of Instrumentation JINST_9_C06010, 2014, pp.1-7.
 13. А.А.Борисов, Н.И.Божко, А.С.Кожин, А.В.Ларионов, А.Н.Левин, И.С.Плотников, **Р.М.Фахрутдинов**. Прецизионная дрейфовая трубка в корпусе из лавсана. Приборы и Техника Эксперимента, 2013, №2, с.16-21.
 14. Yu.Antipov, L.Baliev, V.Batarin, V.Bezzubov, O.Eroshin, **R.Fakhrutdinov**, Yu.Gorin, V.Medovikov, S.Nikitin, A.Mitin, A.Petrukhin, V.Startsev, A.Tukhtarov, V.Vaniev, S.Zimin. Track chambers based on proportional drift tubes with wire field shaping electrodes. Nucl. Instr. and Meth., A379, 1996, pp.434-435.
 15. Антипов Ю.М., Батарин В.А., Беззубов В.А., Бушнин Ю.Б., Ваньев В.С., Волков А.А., Горин Ю.П., Ерошин О.В., Зимин С.А., Мандриченко И.В., Медовиков В.А., Коноплянников А.К., Петрухин А.И., **Фахрутдинов Р.М.** Исследование дрейфовых трубок с полеформирующими электродами двух типов на пучке серпуховского ускорителя. Приборы и Техника Эксперимента, 1995, №5, с.31-38.
 16. Н.И.Божко, А.С.Вовенко, В.Ю.Глебов, В.Н.Горячев, В.И.Кочетков, В.И.Кравцов, В.И.Полетаев, Ю.И.Саломатин, В.Н.Рыченков, С.К.Черниченко, **Р.М.Фахрутдинов**, Г.Л.Щукин. Большой жидкостный сцинтилляционный счетчик. Приборы и Техника Эксперимента, 2, (1985), с.57-61.

Регистрация интеллектуальной деятельности – патенты на полезную модель:

17. А.А.Борисов, А.С.Кожин, **Р.М.Фахрутдинов**. Прецизионная дрейфовая трубка в лавсановом корпусе // Патент на полезную модель № 160135, дата регистрации 11.02.2016.
18. А.А.Борисов, А.С.Кожин, **Р.М.Фахрутдинов**. Прецизионная дрейфовая трубка с полеформирующими электродами // Патент на полезную модель № 136945, дата регистрации 20.01.2014.
19. А.А.Борисов, А.С.Кожин, **Р.М.Фахрутдинов**. Прецизионная дрейфовая трубка // Патент на полезную модель № 79004, дата регистрации 10.12.2008.

Препринты НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ:

20. Н.И.Божко, А.А.Борисов, А.С.Кожин, **Р.М.Фахрутдинов**. Опыт работы с дрейфовыми камерами без постоянного обновления рабочей газовой смеси. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ 2019-14.
<http://web.ihep.su/library/pubs/prep2019/ps/2019-14.pdf>.
21. Антипов Ю.М., Батарин В.А., Беззубов В.А., Бушнин Ю.Б., Ваньев В.С., Волков А.А., Горин Ю.П., Ерошин О.В., Зимин С.А., Мандриченко И.В., Медовиков В.А., Коноплянников А.К., Петрухин А.И., **Фахрутдинов Р.М.** Исследование характеристик дрейфовых трубок с полеформирующими электродами двух типов на пучке серпуховского ускорителя. Препринт ИФВЭ 94 – 58. Study of drift tubes with field shaping electrodes in the beam of Serpukhov accelerator. Материалы Международной конференции «Wire Chamber Conference», 1995, Vienna, Austria.