

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМЕНИ В. П. ДЖЕЛЕПОВА

На правах рукописи



Гонгадзе Алекси

**Разработка и создание трековых систем большой  
площади для мюонного спектрометра эксперимента  
ATLAS на Большом адронном коллайдере**

Специальность 01.04.01 —  
«Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2021

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дженелепова  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: **Шелков Георгий Александрович**  
кандидат физико-математических наук  
ЛЯП ОИЯИ,  
ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Меркин Михаил Моисеевич**,  
доктор физико-математических наук,  
НИИЯФ МГУ,  
заведующий лабораторией

**Еник Темур Львович**,  
кандидат физико-математических наук,  
ЛФВЭ ОИЯИ,  
начальник группы

С электронной версией диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <http://dissertations.jinr.ru/ru>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета  
Доктор физико-математических наук

Г. А. Карамышева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Полное сечение неупругого взаимодействия на Большом адронном коллайдере составляет около 70 мб. Это на много порядков превышает парциальное сечение «интересных» физических процессов (например, рождение топ-кварков — менее 1000 пб, рождение бозонов Хиггса — менее 100 пб). Выделение одного «интересного» события среди миллионов фоновых является сложнейшей задачей. Для ее решения часто используют тот факт, что почти во всех фоновых событиях рождаются только заряженные и нейтральные адроны. В то же время "интересные" события часто характеризуются рождением высокоэнергичных лептонов (электронов или мюонов). Таким образом, наблюдение высокоэнергичного мюона является важнейшим критерием, позволяющим выделить «интересные» события при подавлении фона на много порядков.

Измерение импульса мюона в коллайдерных экспериментальных установках в ТэВ-ной области энергий возлагается на внешнюю область детектора, что, естественно, требует большой рабочей поверхности трековой системы. К тому же трековая система должна обеспечивать измерение координат треков заряженных частиц по всей огромной области покрытия не хуже 100 мкм. Например, область покрытия дрейфовых MDT-камер (Monitored Drift Tube chambers) в мюонном спектрометре эксперимента ATLAS составляет чуть больше 5500 м<sup>2</sup>, что примерно равно площади футбольного поля! Площадь покрытия Micromegas-детекторов в NSW (New Small Wheel, новое малое колесо) ATLAS меньше — чуть более 1500 м<sup>2</sup>, если говорить об общей активной поверхности. Но в данном случае произошел качественный скачок в сторону увеличения площади Micromegas-детекторов с резистивным покрытием. Для сравнения, до недавних времен самими большими по площади являлись детекторы Micromegas для эксперимента COMPASS — 0,16 м<sup>2</sup>, к тому же без резистивного покрытия. Другой важной особенностью является то, что данные трековые системы рассчитаны на длительный — 20 лет и более — период эксплуатации.

В предлагаемой диссертационной работе представлены результаты разработки, методика создания и тестирования трековых систем большой площади на основе дрейфовых MDT-камер и камер Micromegas, рассчитанных на длительный период эксплуатации, а также результаты разработки и создания детекторов типа bulk Micromegas на участке полного производственного цикла. Разработанные методики создания и тестирования в дальнейшем могут быть использованы для производства современных проволочных и микроструктурных детекторов для будущих экспериментов в области физики высоких энергий.

**Целью данной работы** является разработка методик по созданию и тестированию трековых систем большой площади на основе дрейфовых MDT-камер и камер Micromegas.

**Научная новизна и практическая значимость.**

1. Впервые в коллайдерном эксперименте реализованы трековые системы большой площади для мюонного спектрометра на основе:
  - прецизионных цилиндрических дрейфовых трубок с точностью позиционирования сигнальных проволок 10 мкм в трубке и 20 мкм в камере из 6 слоев трубок (2 мультислоя с 3 слоями в каждом), позволяющей измерять импульс мюона с точностью 10% при энергии 1 ТэВ;
  - микроструктурного газового детектора нового типа – Micromegas большой площади (площадь поверхности считывающей панели 3 м<sup>2</sup>) с резистивным покрытием, позволяющий измерять импульс мюона с точностью 15% при энергии 1 ТэВ.

Камеры MDT и Micromegas это единственные трековые детекторы мюонного спектрометра ATLAS. Характерной особенностью мюонного спектрометра является способность независимого (standalone) измерения импульсов мюонов, а при  $p_t > 100$  ГэВ мюонный спектрометр играет определяющую роль. Точность измерения импульса мюона определяется прежде всего координатным разрешением мюонной системы.

2. Был создан первый в России участок полного производственного цикла по созданию детекторов Micromegas, где возможна разработка, создание и паспортизация детекторов различной конфигурации, определяемой требованиями конкретной задачи.

**Достоверность результатов** данной работы подтверждается: а) бесперебойной и качественной работой с 2005 года в мюонном спектрометре эксперимента ATLAS MDT-камер, созданных на участке в ЛЯП ОИЯИ; б) успешными результатами тестирования и установки на структурах NSW мюонного спектрометра ATLAS детекторов Micromegas, также созданных на участке в ЛЯП ОИЯИ.

**Основные Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработана методика массового производства и контроля качества газовых координатных детекторов — мюонных дрейфовых трубок для мюонного спектрометра установки ATLAS на Большом адронном коллайдере. С применением этой методики изготовлены и испытаны около 65 000 дрейфовых трубок.
2. Разработана технология сборки и методика контроля качества мюонных MDT-камер для мюонного спектрометра установки ATLAS. С их использованием изготовлены и испытаны 86 мюонных камер типоразмеров BMS и BMF для центральной части спектрометра.

3. Разработана технология изготовления и методика контроля качества микроструктурных газовых детекторов Micromegas большой площади с резистивным покрытием для NSW мюонного спектрометра ATLAS. Основываясь на этих результатах, изготовлены и испытаны 70 считывающих панелей детекторов Micromegas и 33 модуля детекторов Micromegas (типоразмер LM2).
4. В ОИЯИ создан первый в России участок полного производственного цикла по производству детекторов bulk Micromegas.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы многократно докладывались на рабочих совещаниях коллаборации ATLAS Муон и ATLAS NSW, на еженедельных совещаниях ОИЯИ-ATLAS по физике, на научных семинарах ЛЯП ОИЯИ и на общеинститутском семинаре, а также на международных конференциях:

1. IEEE 2001 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC 2001). 4–10 November 2001. San Diego, CA, United States;
2. 13th Vienna Conference on Instrumentation (VCI 2013). 11–15 February 2013. Vienna, Austria;
3. 3rd International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors (MPGD2013). 1–5 July 2013. Zaragoza, Spain;
4. 7th International Conference on New Developments in Photodetection (NDIP14). 30 June–4 July 2014. Tours, France.

**Публикации.** По теме диссертационной работы были опубликованы 22 научные работы, в том числе 10 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Личный вклад автора.** Автор внес значительный вклад в разработку методов создания и тестирования прецизионных цилиндрических дрейфовых трубок для MDT-камер. Будучи руководителем группы, автор внес определяющий вклад в разработку методик юстировки, контроля сборки и тестированию MDT-камер. Автор является инициатором и руководителем работ, внесшим определяющий вклад по созданию участка Micromegas для NSW ATLAS и участка полного производственного цикла по производству детекторов bulk Micromegas.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации **151** страница. Работа содержит **123** рисунка, **5** таблиц и список литературы из **141** источника.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** раскрывается актуальность темы, обозначена цель и указаны научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, представлены положения, выносимые на защиту, апробация работы

и личный вклад автора. А также указывается структура и объем диссертации.

В **Главе 1**, ни в коей мере не претендуя на оригинальность и полноту подачи материала, дается краткое изложение основных принципов работы газовых детекторов.

**Главе 2** посвящена методикам разработки, производства и тестирования прецизионных цилиндрических дрейфовых трубок с повышенным давлением рабочего газа и дрейфовых MDT-камер на их основе для мюонного спектрометра эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере.

В вводной части дается краткое описание установки ATLAS и ее подсистем: магнитной системы, внутреннего детектора, калориметров и мюонного спектрометра, с акцентом на последнем. Представлены их основные характеристики.

Мюонный спектрометр (МС) является внешней и самой большой частью установки ATLAS, покрывающей весь оставшийся объем после калориметров. Из-за наличия магнитного поля, индуцируемого тороидальными магнитами, треки мюонов и других заряженных частиц, преодолевающих систему калориметров, изогнуты, и, определяя сагитту, можно измерить заряд и импульс. Мюон с импульсом 1 ТэВ/с при средней величине магнитного поля в мюонном спектрометре  $\sim 0,5$  Тл отклонится от прямой линии только на 500 мкм, т. е. для достижения необходимого уровня импульсного разрешения 10% требуется измерять сагитту траектории мюона с точностью  $\sim 50$  мкм.

Изготовленные с абсолютной точностью позиционирования проволоки  $\sim 20$  мкм r.m.s. MDT-камеры являются основным компонентом прецизионной трековой системы МС. Упомянутая точность камер достигается путем обеспечения точного позиционирования и величины силы натяжения сигнальных проволок в дрейфовых трубах, а также их точной сборкой в камеры. Дубненская группа была ответственна за MDT-камеры типа BMS и BMF с пятью типоразмерами в количестве 84 шт.

Дрейфовая трубка (ДТ) представляет собой газонаполненную тонкостенную алюминиевую трубку с натянутой внутри позолоченной проволокой вольфрам-ренийевого сплава. Ее составными компонентами являются алюминиевая трубка с толщиной стенок  $(0,400 \pm 0,03)$  мм и наружным диаметром  $(29,97 \pm 0,015)$  мм, сигнальная проволока и две концевые заглушки, выполняющие функции надежного крепления и точного позиционирования проволоки относительно референсной поверхности, а также обеспечивают герметизацию рабочего объема, вход/выход рабочего газа, надежность земляного и сигнального контактов.

Измерение наружного диаметра трубок производилось бесконтактным оптическим способом, а толщины стенки — ультразвуковым на

специально созданном для этого стенде [1], где вся процедура измерения была автоматизирована и программно управлялась с ПК (рис. 1).

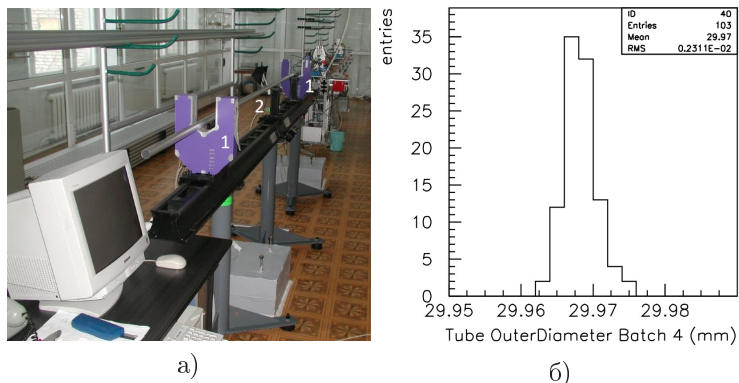


Рис. 1 а) Измерительный стенд геометрических параметров алюминиевых трубок: 1 — лазерные измерители внешнего диаметра трубок, 2 — ультразвуковой измеритель толщины стенки; б) результат измерения одной из партии трубок

Из-за жесткого графика производства ( $\sim 100$  трубок/день) была разработана и создана полуавтоматическая линия. На линии системой сжатый воздух-вакуум проволока протаскивается через трубку и концевые заглушки. Заглушки крепятся на алюминиевой трубке с помощью обжима высоким давлением в 180 атм через уплотнительное кольцо для герметизации. А проволока фиксируется опрессовкой капиллярных медных трубочек на концах заглушек [2]. Сборка ДТ производилась в чистом производственном помещении (ЧПП) со стабилизацией температуры и влажности [3].

Для обеспечения необходимой точности, а также стабильной и долговременной работы ДТ натяжение сигнальной проволоки должно измеряться с точностью 1 г при номинальном значении натяжения 350 г или с точностью 0,3 %. Столь высокое требование обусловлено необходимостью точного прогнозирования гравитационного/температурного провисания проволоки для последующего использования в качестве поправок при восстановлении координат трека. В условиях массового производства измерение должно быть быстрым и проводиться автоматически, как часть процедуры сборки трубок. Итого был разработан и создан прибор, работа которого основывалась на измерении ЭДС, наведенной на проволочку в результате свободных затухающих колебаний, возбужденных импульсом электрического тока. Для определения спектрального состава колебаний полученные данные анализировались с помощью преобразования Фурье, после чего определялся основная гармоника этих колебаний [4] (рис. 2).

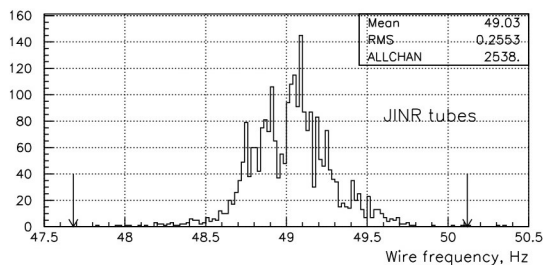


Рис. 2 Распределение результатов измерения натяжения проволочки (стрелками показаны критерии допуска)

После завершения механической сборки дрейфовые трубки проходят ряд тестов. Первым из них являлось измерение позиции сигнальной проволоки относительно референсной поверхности концевой заглушки. Для этой цели был создан стенд на рентгеновских лучах [5]. Для определения положения сигнальной проволоки используется тенеграмма, получаемая на ПЗС-матрице после облучения концевых заглушек ДТ потоком гамма-квантов от двух рентгеновских трубок, создающих стереопару (рис. 3).

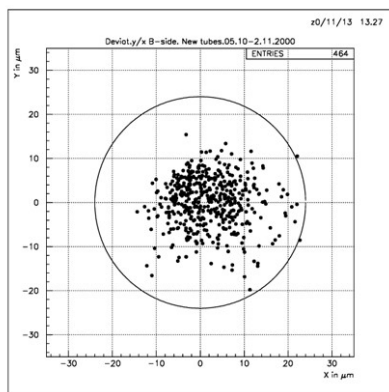


Рис. 3 Результаты измерения партии ДТ в количестве 464 шт. Окружность является критерием выбраковки трубок

Для предотвращения обратной диффузии и загрязнения газа на величину допустимой течи каждой отдельной дрейфовой трубки в камерах MDT при номинальном рабочем давлении 3 бар был установлен жесткий предел в  $10^{-8}$  бар·л/с. Группой была разработана схема определения уровня течи путём непосредственного измерения вытекающего из трубки в вакуум количества газа [6].

Детектируемым газом был выбран гелий, что имеет ряд преимуществ:



1. Снижаются требования к герметичности установки – так как в атмосфере практически нет гелия.
2. В вакууме поверхность трубки освобождает адсорбированный ранее газ ("outgasing"), имитируя течь.

Принцип измерения прост: дрейфовая трубка заполняется газом с примесью гелия и помещается в откачиваемый объем (т.н. "торпеда"), соединенный с чувствительным детектором гелия. Чтобы реализовывать «конвейерные» условия теста, поочередно использовались две «торпеды». При такой схеме скорость проверки ДТ — 15–20 трубок в час. На рис. 4 показаны результаты измерений 8660 дрейфовых трубок.

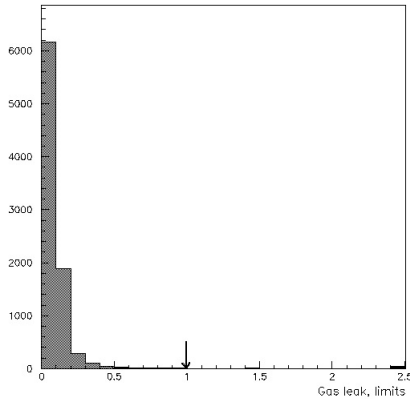


Рис. 4 Распределение уровней течи для дрейфовых трубок. Единица соответствует предельной течи  $10^{-8}$  бар·л/с

Финальным испытанием ДТ было высоковольтное тестирование. Требования, предъявляемые к работе ДТ на высокое напряжение, следующие: темновой ток не более 7,5 нА (2 нА/м) на 3400 В и скорость счета в пределах  $(40 \pm 20)$  Гц на 3200 В в рабочем газе  $\text{ArCO}_2$  (93:7). Для скорости тестирования  $\sim 100$  трубок в день был создан тест для одновременного тестирования 96 ДТ длиной 3100 или 3800 мм [7].

Стенд кроме механической конструкции для размещения ДТ, включал систему заполнения рабочим газом, высоковольтный источник HV, электронику для обработки сигналов и программное обеспечение.

Всего были изготовлены и испытаны около 65 000 дрейфовых трубок. Из них больше половины предназначались для производства камер типа BOS/F (длина собранной трубки 3773,3 мм) в Институте физики Общества Макса Планка в Мюнхене (MPI for Physics, Munich).

Каждая собранная с точностью не хуже 20 мкм, камера MDT тщательно контролируется в детекторе ATLAS на предмет ее положения,

внутренних деформаций и условий окружающей среды, таких как температура и магнитное поле, посредством 10 датчиков температуры (для камер BMS/BMF) и 2 датчиков магнитного поля, установленных на камерах. MDT-камеры типа BMS/F изготовленные в ЛЯП ОИЯИ состоят из 2 мультислоев дрейфовых трубок, приклеенных на несущей конструкции (спейсер) с двух сторон. Каждый мультислой состоит из трех слоев дрейфовых детекторов, число которых различно в зависимости от типа камер (табл.1).

Таблица 1 MDT-камеры, произведенные в ОИЯИ (\* длина камеры с оснасткой; \*\* длина собранной дрейфовой трубки)

Тип	BMS960	BMS/F1440	BMS1680	BMF1920	BMF2160
Кол-во камер	12	52	12	4	4
Длина камеры в z (мм)*	976,1	1456,7	1696,9	1937,2	2177,5
Длина трубки (мм)**	3071,5	3071,5	3071,5	3071,5	3071,5
Кол-во слоев	2x3	2x3	2x3	2x3	2x3
Кол-во труб в слое	32	48	56	64	72
Высота спейсера (мм)	170	170	170	170	170
Высота камеры (мм)	364	364	364	364	364
Масса камеры (кг)	140	190	215	240	260
Газовый объем (л)	395	592	691	790	889

Структурными компонентами спейсера являются три поперечные пластины, к которым приклеиваются дрейфовые трубки, и две продольные балки, соединяющие поперечные пластины. На спейсере устанавливается оптическая система внутреннего контроля деформации камеры с измеряемой точностью до 20 мкм (рис. 5).

Для достижения высокой точности сборки камеры были разработаны и созданы матрица опорных линий для расположения дрейфовых трубок и точные башни для позиционирования несущей рамы, определяющие необходимое взаимное расположение склеиваемых слоев по высоте, вдоль и поперек трубок [8], [9]. И опорные линии, и башни располагались на точном гранитном столе. Сборка камер происходила в ЧПП со стабилизацией температуры  $(22 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$  и влажности  $(45 \pm 5)\%$  воздуха [10], [11].

Максимальное количество трубок в камере по ширине 72. Так как изготовление высокоточной опорной линии длиной 2160 мм связано со многими технологическими проблемами, было принято решение делать более

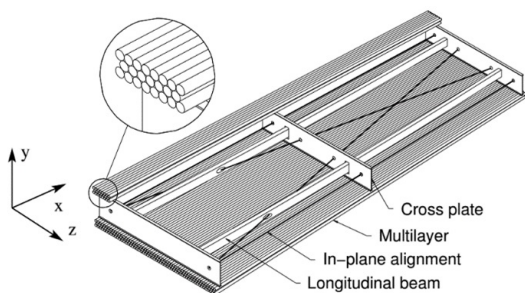


Рис. 5 Схематический вид MDT-камеры типа BMS/BMF

короткие отдельные опоры и в дальнейшем склеивать их по 4 в одну линию. Точный шаг (30,035 мм) опорных линий обеспечивался с помощью высокоточного шаблона. После производства опоры промерялась на 3D-машине и результаты обрабатывались (рис. 6).

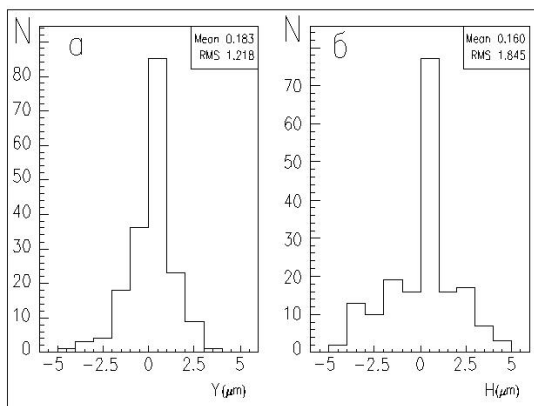


Рис. 6 Результаты измерений 10 опор: а — отклонение от заданного шага, б — отклонение по вертикали

Для юстировки опорных линий на гранитный стол была разработана и создана основанная на интерференции система создания и обработки изображения, состоящая из лазерного диода, коллиматора, регистрирующего устройства на базе ПЗС, разделителя луча, двух пентапризм и отражающего зеркала.

Еще на стадии изготовления прототипов мюонных камер [12] исследовались различные варианты методик склейки камер для массового производства. По результатам этих работ группой ОИЯИ был разработан и принят в качестве рабочего так называемый «спейсерный» метод [11], при котором каждый последующий слой клеится к предыдущему, после чего камера переворачивается и производится симметричная склейка с другой

стороны камеры. Все этапы производства контролировались оптико-электронной системой RASNIK в разных модификациях.

Для устранения прогибов камеры в процессе сборки использовалась специально разработанная система компенсации с регулируемой поддержкой продольных балок спейсера. Это позволяет достичь требуемой точности для величин расстояний между сигнальными проволочками слоя дрейфовых трубок, лежащего на опорных линиях и слоем, приклеенным к спейсеру ранее [13], [14]. На рис. 7 приведены результаты измерения камеры типа VMF2160. Разными типами маркеров обозначены 6 разных слоев трубок. Пунктирной линией показан суммарный прогиб камеры, который, как видно, не превышает 15 мкм.

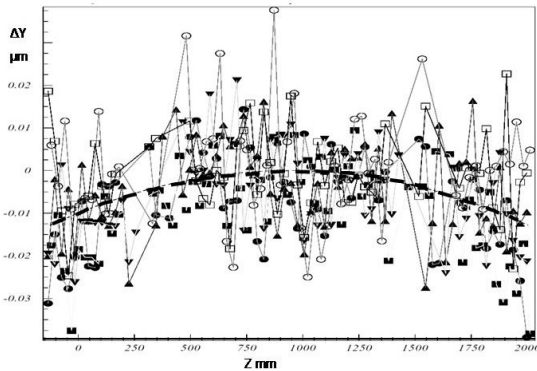


Рис. 7 Результаты измерения камеры типа VMF2160 (JINR044) на рентгеновском томографе в ЦЕРН.  $Z$  — ширина камеры,  $\delta Y$  — отклонение координат проволочек в вертикальной плоскости

Для нанесения равномерного слоя клея в процессе сборки/склейки MDT-камер была разработана и создана полуавтоматическая склеивающая машина [15]. Она позволяла наносить тонкие слои клея в зазорах соприкосновения трубок друг с другом, а также в местах, где этот слой трубок будет приклеен к другому слою.

В процессе выбора процедуры сборки было проведено исследование по проверке эффективности и целесообразности наличия гибких температурных компенсаторов (flexo) на наружных поперечных пластинах спейсера для уменьшения влияния неравномерного температурного поля на деформацию слоев трубок в шахте ATLAS. Наличие flexo из-за избыточной гибкости значительно затрудняло оптический контроль взаимного положения элементов камеры. Моделирование, а затем экспериментальная проверка, проведенная группой, показали линейное распределение температуры внутри камеры и ненужность в flexo для среднего (VM) и внутреннего (VI) слоев мюонного спектрометра.

Собранные камеры оснащались системой газораспределения, датчиками температуры и магнитного поля, RASNIK-системами для связи и непрерывного мониторинга взаимного расположения камер в установке ATLAS. На торцах камер, в экранах типа клеток Фарадея, размещалась часть электроники считывания и система распределения высоковольтного напряжения для питания трубок.

Каждая ДТ, используемая для производства камер, проверялась на газовую течь. Понятно, что при наличии большого числа - от 600 до 1500 - соединений в газораспределительной системе камеры течь может быть существенной. Поэтому перед отправкой ЦЕРН камеры проверялись на герметичность. Проверка герметичности осуществлялась путем контроля разницы давлений в тестируемой камере и в герметичной “референсной” емкости с использованием датчика разности давлений. В качестве тестового газа применялся аргон при давлении 3 бар [16]. Результаты тестов всех произведенных дрейфовых камер на производственном участке приведены на рис. 8.

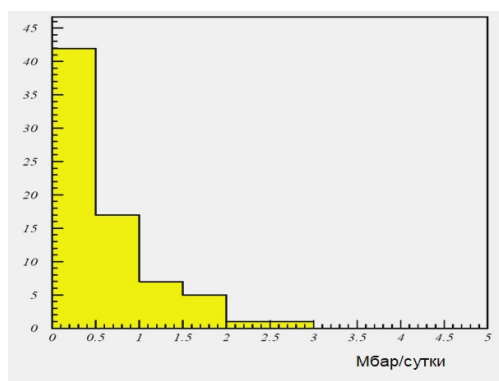


Рис. 8 Распределение величины течи произведенных MDT-камер

Для контроля качества 15% произведенных камер были проверены на рентгеновском томографе в ЦЕРН. Измерения показали, что качество сборки камер достаточно хорошее – среднеквадратичное отклонение ниже требуемого 20 мкм. Что подтверждает правильность методики производства MDT-камер в ОИЯИ (рис. 9).

После прибытия MDT-камер в ЦЕРН силами группы происходила интеграция с триггерными камерами RPC с помощью системы совместной кинематической подвески, которая была разработана группой и произведена в опытном производстве ОИЯИ. С двух сторон каждой MDT-камеры устанавливалось по одной камере RPC, образуя триплет камер.

Для максимального приближения прогиба отдельной детекторной трубки к соответствующему провисанию сигнальной проволоки на

Parameters and standard deviations of grid fit shifts											
Scan BMS3_2002_01_p3_r0_483. BMS. Dubna. January 2002.											
Number of wires: nominal: 32 (estimated 32) × 6 = 192											
measured: 182 (94.8%)											
Estimated parameters ( $Z_0$ , $Y_0$ and $\text{Angle}_0$ not shown)											
Fit number	$dZ, \mu\text{m} (^{\circ})$	$dY, \text{mm} (^{\circ})$	$d\text{Angle}, \text{prad}$	Pitch $_z$ - 30 mm, in $\mu\text{m}$ / Pitch $_{\text{Pitch}_z}$ - 30 mm, in $\mu\text{m}$ (Pitch $_y$ , in mm)				Bad wires out of 3 st. dev.	Z St. dev., $\mu\text{m}$	Y St. dev., $\mu\text{m}$	St. dev., $\mu\text{m}$
				ML $_1$	ML $_2$	ML $_1$	ML $_2$				
				Nominal Values							
	-0.0	200.020	-0.0	35.00							
				34.9 (26.011)							
1	Nominal values							-	13.6	14.7	14.2
2								0	13.6	14.7	14.2
3	-	200.014 (252.058)	-	34.96		47.7 (26.022)		-	13.6	8.3	11.3
4	-	200.014 (252.058)	-	34.96		47.7 (26.022)		0	13.6	8.3	11.3
5	-3.0 (-3.1)	200.036 (252.058)	2.7			35.03		-	13.6	12.3	12.9
6	-3.0 (-3.1)	200.036 (252.058)	2.7			35.03		0	13.6	12.3	12.9
7	-3.1 (-3.2)	200.014 (252.058)	3.4	34.96		47.7 (26.022)		-	13.6	8.3	11.2
8	-3.1 (-3.2)	200.014 (252.058)	3.4	34.96		47.7 (26.022)		0	13.6	8.3	11.2
9	-3.1 (-3.2)	200.014 (252.058)	3.1	34.95	34.97	44.3 (26.019)	50.9 (26.025)	-	13.6	8.0	11.1
10	-3.1 (-3.2)	200.014 (252.058)	3.1	34.95	34.97	44.3 (26.019)	50.9 (26.025)	0	13.6	8.0	11.1

Рис. 9 Результат измерения одной из камер

BMS/BMF камере, устанавливаемой в определенный сектор МС с заданным углом наклона, проводилась операция регулировки прогиба. Чем меньше разница, тем ближе к центру трубки проходит сигнальная проволочка, что влияет на однородность газового усиления по всей длине ДТ. Для этого с помощью специальной системы регулирования прогиба, встроенной в среднюю поперечную пластину спейсера, вводились определенные величины коррекции прогиба детектора, отсчитываемые относительно нулевого значения деформации данной камеры, записанного в процессе производства системой RASNIK внутреннего контроля деформации камеры (Рис. 10).

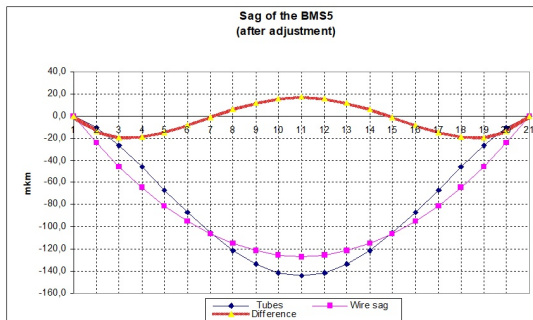


Рис. 10 Результаты компенсации прогиба для камеры BMS960. Синяя линия — прогиб ДТ (измеренная), фиолетовая — прогиб проволочек (рассчитанная), красная — разница прогибов

После интеграции модули RPC-BMS-RPC до спуска в шахту и установки в детектор ATLAS проходили функциональный тест на стенде космических лучей.

Всего были произведены и протестированы 86 камер типа BMS/BMF, из них 84 для мюонного спектрометра. 2 камеры типа BMF2160 используются на стенде на космических лучах в корпусе №4 ЛЯП ОИЯИ.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена детекторам Micromegas. В водной части дается маленький экскурс по газовым детекторам и краткое описание некоторых микроструктурных газовых детекторов (MPGD). Более подробно описывается микросеточное газовое устройство (Micromegas). Показывается принцип его работы, рассматриваются все существующие типы Micromegas-детекторов. Дается схема их производства и подчеркиваются преимущества и недостатки.

Остальная часть главы посвящена созданию и тестированию Micromegas-камер для модернизации NSW мюонного спектрометра ATLAS и первого в России участка полного производственного цикла по разработке и производству детекторов типа bulk Micromegas.

После запланированной модернизации БАК и увеличения светимости до двух номинальных ( $2 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) увеличится радиационная нагрузка детектора ATLAS, особенно в местах, близких к точке взаимодействия пучков. Это и вызывает необходимость модернизации некоторых, не рассчитанных на такую нагрузку подсистем детектора. Одним из таких участков является внутренний торец мюонного спектрометра EI (End-cap Inner) или, говоря иначе - малое колесо (SW, Small Wheel), две стороны которого (A и C) расположены симметрично от точки взаимодействия на примерных расстояниях 7,4 м. Потребность замены SW на NSW (New Small Wheel) вызвана двумя причинами: стремлением сохранения высокой эффективности выделения частиц и повышением уровня подавления фоновых событий в триггере первого уровня [17]. Для этого существующая система заменяется трековым Micromegas и триггерным детектором sTGC (small-strip Thin Gap Chamber).

NSW, как и весь мюонный спектрометр, разделен на 16 клиновидных секторов — 8 больших и 8 малых. Каждый клин Micromegas, в свою очередь, поделен на две части трапецеидальной формы. Итого существует 4 типа модулей Micromegas на внутренних и на наружных частях клина: малый модуль 1 и малый модуль 2 (SM1 и SM2 от small module) в малых секторах и большой модуль 1 и большой модуль 2 (LM1 и LM2 от large module) в больших секторах NSW. Количество каждого типа модулей на два NSW составляет 32. Каждый модуль Micromegas состоит из 2 двухсторонних считывающих и 3 дрейфовых — 2 односторонних и 1 двухсторонних — панелей (рис. 11). Детекторы были спроектированы таким образом, чтобы достигать пространственного разрешения лучше чем 100 мкм в прецизионном радиальном ( $\eta$ ) направлении и 2—3 мм в неточном направлении  $\phi$ . Соответственно, одна панель считывания имеет полосы, параллельные друг другу и перпендикулярные радиальному направлению

(эта панель), а в другом — стерео панель — считывающие полосы наклонены на  $\pm 1,5^\circ$  относительно  $\eta$ .

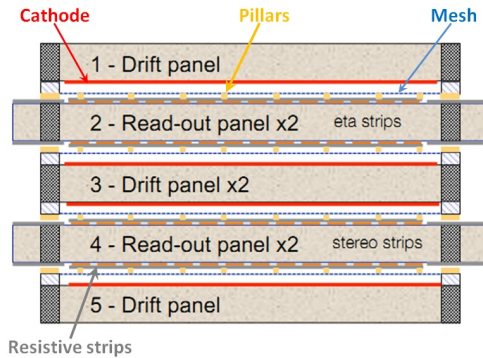


Рис. 11 Схематический вид модуля/квадруплета Micromegas

ЛЯП ОИЯИ была ответственна за изготовление и тестирование LM2 — модулей Micromegas для наружной части больших секторов NSW. В ОИЯИ должны были быть изготовлены и протестированы все 64 (плюс дополнительно 2 запасные) считывающие панели общей площадью  $384 \text{ м}^2$  из  $1200 \text{ м}^2$  предусмотренных для всего NSW. Кроме того, используя 96 дрейфовых панелей, произведенных в ATh (Салоники, Греция), мюонная группа ЛЯП должна была собрать и протестировать перед отправкой в ЦЕРН 32 модуля Micromegas (плюс дополнительно один модуль).

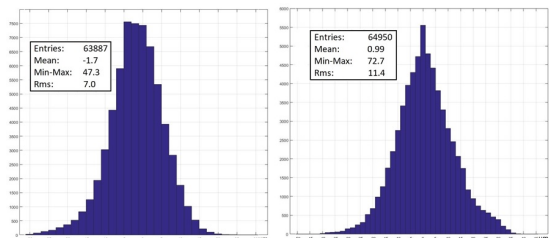
Одна из самых больших проблем, связанных с газонаполненными детекторами, является искрение, вызванное сильноионизирующими частицами. Поэтому для производства детекторов Micromegas была выбрана конструкция печатных плат с резистивным покрытием. Каждая поверхность считывающей панели состоит из 3 печатных плат разной длины. Поскольку возможность промышленной фотолитографии ограничена шириной печатных плат 600 мм, то размер печатных плат был сохранен в одном измерении менее 600 мм, в то время как другой размер может достигать 2220 мм (число каналов 1022). Далее описывается конструкция считывающей печатной платы и панели, обосновывается выбор сетки для детектора и конструкции с плавающей сеткой. Рассматриваются требования к конструкции детектора.

Участки для производства и тестирования детекторов Micromegas NSW ATLAS были созданы в результате существенного развития и оснащения новым современным оборудованием участков для MDT ATLAS [18].

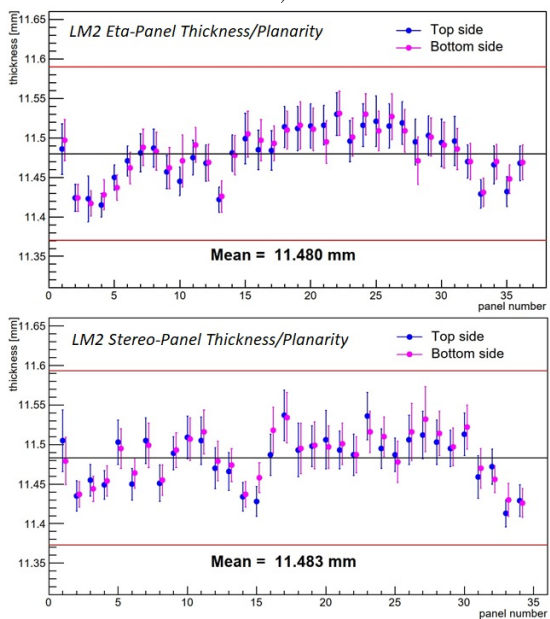
Для производства считывающих панелей группа, в отличие от других участников коллаборации, использовала метод двух специально разработанных точных вакуумных столов (BC). Чтобы максимально уменьшить



влияние температуры и влажности, вакуумные столы создавались из эпоксидного геля и слоев углеродного волокна методом вакуумного инжестирования клея. Референсной поверхностью для создания точной рабочей поверхности ВС служил гранитный стол. Непосредственное измерение поверхностей ВС и последующие измерения толщины и плоскостности считывающих поверхностей показали их высокое качество (максимальное допустимое отклонение  $\pm 110$  мкм) (рис. 12).



а)



б)

Рис. 12 а) Гистограммы измерения плоскостности точных поверхностных слоев вакуумных столов, б) Результаты измерения толщины и плоскостности всех произведенных считывающих панелей. Красной линией отмечены допуски  $\pm 110$  мкм от среднего значения

Изготовленные панели проходили тесты на измерение толщины и плоскостности на специально разработанном и созданном стенде 3-осевого линейного модуля с измерительным оптическим зондом. Также измерялись точности выравнивания верхних и нижних печатных плат друг относительно друга в считывающей панели посредством считывания RASNIK масок, описанных в главе 2, нанесённых с двух сторон в центре печатных плат. Та же техника использовалась в дальнейшем для контроля точности выравнивания положения считывающих панелей друг относительно друга в модуле (рис. 13).

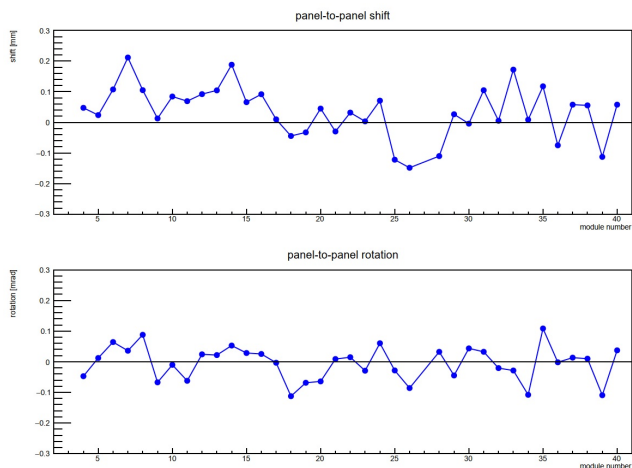
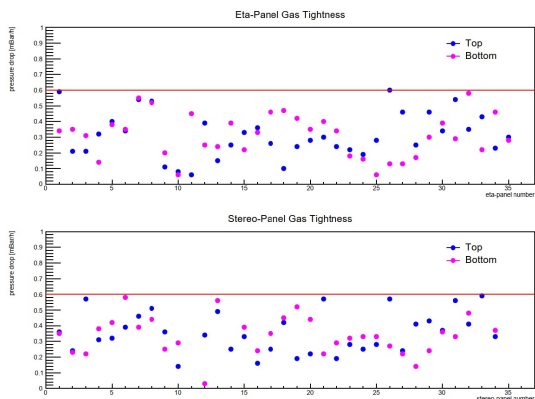


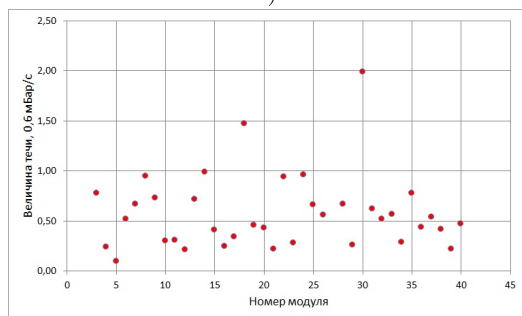
Рис. 13 Измерения точности выравнивания считывающих панелей друг относительно друга в модуле

Как панели, так и собранные модули подвергались тестам на герметичность (скорость утечки газа не должна превышать  $10^{-6}$  бар·л/с при избыточном давлении 3 мбар). Для измерения течи использовался метод «перепада давления» ( $dP/dt$ ). При измерении учитываются показания атмосферного давления и температуры, а также объемная деформация из-за избыточного давления. Для этих целей были разработаны и созданы 2 тестовых стенда. Рис. 14 демонстрирует измерения на газовую течь всех панелей и модулей.

Самым важным и времязатратным этапом производства являлась сборка панелей в модуль с одновременным тестированием на высокое напряжение. Этому предшествовала процедура мойки и сушки по специально отработанной технологии для удаления загрязнений, остатков от литографических процессов и возможных ионных компонентов солей. Сборка производилась панель за панелью. После установки каждой панели производился быстрый тест на ВН на воздухе путем подачи 800 В. До полного



а)



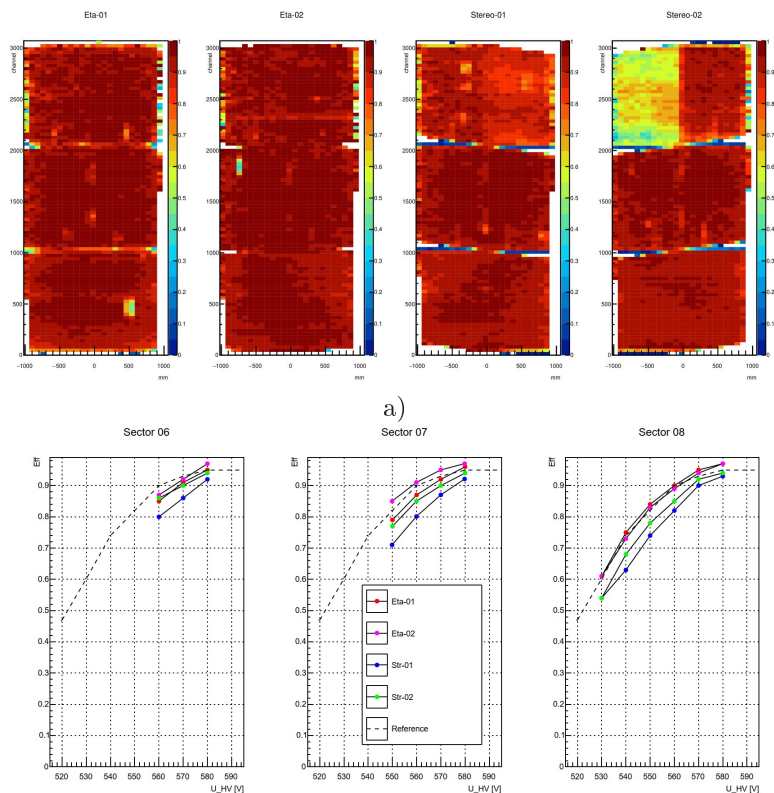
б)

Рис. 14 а) Графики измерения величины течи панелей. Красной линией показано предельное значение допустимой течи; б) измерения величины течи всех собранных модулей. «1» на ординатной оси соответствует максимально допустимой течи в 0,6 мбар/ч

закрытия модуль подключался к источнику чистого сухого воздуха производительностью 300–500 л/ч и тестировался на максимальное стабильное высокое напряжение (средний ток не более 10 нА). Выбранный группой метод тестирования в потоке чистого сухого воздуха имеет ряд преимуществ. Во-первых, за счет высокого потока можно без опасения загрязнения рабочего объема проводить тестирование до окончательной герметизации и закрытия модуля; во-вторых, высокий поток способствует окончательной просушке модуля; в-третьих, подача максимального напряжения позволяет качественно проверить изоляцию считывающих панелей и входные высоковольтные цепи; в-четвёртых, данный метод значительно уменьшает время сборки-тестирования модуля.

Для окончательной паспортизации модулей они тестировались на стенде на космических лучах. Основной целью тестирования является измерение эффективности регистрации «космических» мюонов модулем

Micromegas при рабочем напряжении детектора 580 В и рабочей газовой смеси  $\text{ArCO}_2$  (93:7). Кроме того, тест дает возможность обнаружения дефектов считывающих плат, например, обрыв сигнальных стрипов, которые в дальнейшем документируются. Данный тест также дает дополнительную возможность наблюдения за поведением модуля под ВН, т.е. является своеобразным продолжением теста на ВН. При наличии времени проводились дополнительные наборы данных на пониженных напряжениях 530-570 В (рис. 15). При этом предполагается, что у исправного модуля эффективность выходит на плато при рабочем напряжении.



б)

Рис. 15 а) Пример измерения эффективности регистрации мюонов четырьмя детектирующими плоскостями модуля Micromegas; б) зависимость измеренной эффективности для модуля LM2 №16 от рабочего напряжения

Всего на участке были произведены и протестированы 36 эта и 34 стерео панелей и 33 модуля типа LM2 (32+1 запасной). 32 из них были интегрированы на структурах NSW. Запасной модуль вместе с другими

типами модулей (SM1, SM2, LM1) находится на долговременном радиационном тесте на старение на установке GIF++ (Gamma Irradiation Facility) в ЦЕРН с целью изучения возможности замены рабочего газа Ar:CO<sub>2</sub> (93:7) на Ar:CO<sub>2</sub>:iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (93:5:2).

Последняя часть главы 3 посвящена созданию первого в России участка полного производственного цикла по производству Micromegas-детекторов. На участке была произведена настройка оборудования и отработана технология производства. Были созданы и протестированы тестовые образцы. В настоящее время на участке идут совместные с Туринским университетом работы по разработке, производству и тестированию Micromegas-детекторов для их возможного использования в модернизации установки COMPASS++/AMBER на ускорителе SPS в ЦЕРН. Созданы и протестированы, в том числе на мюонном пучке в ЦЕРН, несколько вариантов прототипов детектора. Разработан новый метод контроля качества детектора для выявления слабых мест, вызывающих искрения детектора, основанный на обработке видеоинформации. Совместно с сотрудниками ИЯП БГУ были произведены Micromegas-детекторы и изучены некоторые аспекты повышения надежности работы детектора [19]. Идет создание установки нанесения резистивного DLC (Diamond-like carbon) покрытия на разные материалы. Очевидно, что создание участка полного цикла по производству современных координатных детекторов типа Micromegas в ЛЯП ОИЯИ и способность разработки и производства опытных образцов и небольших партий детекторов на этом участке дает сотрудникам института возможность более эффективно участвовать как в реализации разных физических экспериментов, так и в прикладных исследованиях.

В **заклучении** перечислены основные результаты работ, отраженных в диссертации:

1. Для мюонного спектрометра эксперимента ATLAS были разработаны:
  - Методика массового производства и контроля качества газовых координатных детекторов — прецизионных цилиндрических дрейфовых трубок с точностью позиционирования проволок 10 мкм. Изготовлены и испытаны около 65000 дрейфовых трубок.
  - Технология сборки и методика контроля качества мюонных MDT-камер типоразмеров BMS/BMF для баррельной части. Точность позиционирования сигнальных проволок 20 мкм в камере из 6 слоев трубок (2 мультислоя с 3 слоями в каждом), что с сочетанием площади покрытия в 5500 м<sup>2</sup> является беспрецедентным. Изготовлены и испытаны 86 мюонных камер.
  - Технология изготовления и методика контроля качества микроструктурных газовых детекторов Micromegas

большой площади с резистивным покрытием для NSW. Уникальность в том, что в первые в экспериментальной установке были использованы детекторы Micromegas большой площади ( $3 \text{ м}^2$ ) с резистивным покрытием. Изготовлены и испытаны 70 считывающих панелей детекторов Micromegas и 33 модуля детекторов Micromegas (типоразмер LM2).

2. В ОИЯИ создан первый в России участок полного производственного цикла по созданию детекторов bulk Micromegas. Возможность вести новые разработки, производить и тестировать опытные образцы и небольшие партии детекторов на этом участке позволит сотрудникам института эффективно участвовать как в реализации новых физических экспериментов, так и в проведении прикладных исследований.

### Основные публикации автора по теме диссертации:

1. F. Bauer, . . . , A.L. Gongadze, et al., «The first precision drift tube chambers for the ATLAS muon spectrometer», NIMA 478 (2002) 153–157
2. Comanescu B., . . . , A.L. Gongadze et al., «Equipment for gluing the parts of an optoelectronic detector», Proceeding of SPIE Volume 4068 (1999), p.669–675
3. Comanescu B., . . . , A.L. Gongadze et al., «High precision towers for support an optoelectronic detector», Proceeding of SPIE Volume 4068 (1999), p. 172–17
4. Comanescu B., . . . , A.L. Gongadze et al., «Method for calculus of the sag of frame of an optoelectronic detector», Proceeding of SPIE Volume 4068 (1999), p.676–683
5. G. Aad, . . . , A.Gongadze et al., «The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider», 2008 JINST 3 S08003
6. D. Attie, . . . , A.Gongadze et al., «A Piggyback resistive Micromegas», 2013 JINST 8 P05019
7. J. Galán, . . . , A. Gongadze et al., «Characterization and simulation of resistive-MPGDs with resistive strip and layer topologies», NIMA 732 (2013) 229–232
8. A.Peyaud, . . . , A.Gongadze et al., «The ForFire photodetector», NIMA 787 (2015) 102–104
9. A.L. Gongadze, «Micromegas Chambers for the Experiment ATLAS at the LHC (A Brief Overview)», Physics of Particles and Nuclei, 2016, Vol. 47, No. 2, pp. 270–289
10. М.Балькина, . . . , А.Гонгадзе и др., «Разработка технологии производства и методов контроля Micromegas-детекторов в ЛЯП им.

## Список литературы

1. Стенд для прецизионного измерения геометрических параметров алюминиевых трубок / Д. Ванча, Г. Л. Глонти, А. Л. Гонгадзе [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2001-202. — 2001.
2. Краткое описание производства дрейфовых трубок для МДТ-камер эксперимента ATLAS / Г. Л. Глонти, А. Л. Гонгадзе [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2001-211. — 2001.
3. Чистое производственное помещение для сборки дрейфовых трубок / Г. Л. Глонти, А. Гонгадзе [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2001-179. — 2001.
4. Прибор для измерения натяжения сигнальной проволочки в дрейфовых трубках / Д. В. Дедович [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2001-201. — 2001.
5. Измерение позиции сигнальной проволочки в дрейфовых трубках мюонной системы установки ATLAS с помощью рентгеновского излучения / М. Госткин [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2001-197. — 2001.
6. Высококчувствительный стенд контроля герметичности дрейфовых трубок / Д. Дедович [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2001-200. — 2001.
7. Стенд для высоковольтного тестирования дрейфовых трубок мюонной системы установки ATLAS / М. Госткин [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2001-212. — 2001.
8. High precision towers for support an optoelectronic detector / В. Comanescu, А. Gongadze, [et al.] // Proceeding of SPIE. — 2000. — Vol. 4068. — P. 172—177.
9. Опорные линии для сборки МДТ-камер эксперимента ATLAS / Г. Глонти, А.Л.Гонгадзе [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2001-219. — 2001.
10. Краткое описание производства BMS/BMF МДТ-камер для мюонного спектрометра эксперимента ATLAS / А. Барашков, Г.Л.Глонти, А.Л.Гонгадзе [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2005-212. — 2005.
11. Автоматизированная линия сборки и испытания детекторов мюонной системы установки ATLAS / Г. Глонти, А.Л.Гонгадзе [и др.] // Препринт ОИЯИ P13-2001-218. — 2001.

12. The First Full-Scale Prototype of a BOS MDT Chamber for ATLAS Muon Spectrometer / V. Anosov, A. Gongadze, [et al.] // ATLAS Internal Note MUON-NO-195. — 1997.
13. Система компенсации прогиба для сборки MDT-камер эксперимента ATLAS / А. Барашков, Г.Л.Глonti, А.Л.Гонгадзе [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2005-29. — 2005.
14. Method for calculus of the sag of frame of an optoelectronic detector / B. Comanescu, A. Gongadze, [et al.] // Proceeding of SPIE. — 2000. — Vol. 4068. — P. 676—683.
15. Equipment for gluing the parts of an optoelectronic detector / B. Comanescu, A. L. Gongadze, [et al.] // Proceeding of SPIE. — 1999. — Vol. 4068. — P. 669—657.
16. Система контроля герметичности BMS/BMF-MDT камер мюонного спектрометра эксперимента ATLAS / А. Барашков, А.Л.Гонгадзе [и др.] // Сообщение ОИЯИ P13-2005-213. — 2005.
17. *Gongadze, A.* Micromegas chambers for the experiment ATLAS at the LHC (A Brief Overview) / A. Gongadze // Physics of Particles and Nuclei. — 2016. — Vol. 47. — P. 270—289.
18. Разработка технологии производства и методов контроля Micromegas-детекторов в ЛЯП им. В.П. Дзелепова ОИЯИ / М. Балькина, А. Гонгадзе [и др.] // Письма в ЭЧАЯ. — 2021. — Т. 18, № 3. — С. 261—280. — (235-я сер.)
19. Improved robust Micromegas detector with resistive DLC anode / V. G. Bayev, A. Gongadze [и др.] // NIMA, в печати. — 2022.