

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**СИСТЕМА ТЕСТИРОВАНИЯ ТРУБОК
ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ДЕТЕКТОРОВ HGTD И ИТК ДЛЯ ФАЗЫ-2
МОДЕРНИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS**

Научный руководитель
к.ф.-м.н., ведущий инженер

_____ П. Е. Тетерин

Выполнила

_____ Н. С. Бойко

Москва 2021

Оглавление

1	Введение	2
2	Система охлаждения	4
2.1	Первые системы охлаждения	4
2.2	Пиксельный детектор	6
2.3	Временной детектор	9
3	Система тестирования трубок на давление	12
3.1	Конструкция установки	12
3.2	Техника безопасности	12
3.3	Условия тестирования	12
4	Процесс тестирования	14
5	Заключение	15
	Список использованных источников	16

1 Введение

В данной работе была спроектирована система тестирования титановых трубок охлаждающей системы ITk и HGTD, эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере (БАК). Как будет показано далее, работа детекторов в условиях в низком температурном режиме способствует снижению уровня шумов при снятии данных экспериментов, а также уменьшению скорости распространения радиационных повреждений чувствительных элементов, что способствует увеличению срока службы приборов. Описан процесс тестирования для проверки прочности трубок и отсутствия утечек, пользуясь методом оценки изменений внутреннего давления с течением времени. Были учтены условия, при которых детекторы функционируют в штатном режиме, а также параметры в случае аварийных ситуаций.

"ATLAS крупнейший эксперимент на Большом адронном коллайдере (БАК), участие в котором принимают более 2000 ученых из 35 стран. Работающий с 2008 года, он нацелен на отслеживание и идентификацию частиц для исследования широкого спектра физических явлений, от изучения бозона Хиггса и t-кварка до поиска новых измерений и частиц, из которых могла бы состоять темная материя. На основе данных, полученных в результате протон-протонных столкновений с энергиями в системе центра масс 7 и 8 ТэВ, в 2011-2012 гг. была найдена последняя частица стандартной модели - бозон Хиггса.

В 2015 году при увеличении светимости было подтверждено открытие бозона Хиггса, во втором сеансе БАК при энергиях соударения 13 ТэВ. Однако никаких других частиц, выходящих за рамки стандартной модели, не было обнаружено. Поэтому для дальнейших экспериментов было решено повысить светимость до $L = 7.5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}$, это позволит увеличить число событий в детекторе.

Для увеличения радиационной стойкости оборудования, а также для расширения охвата событий вокруг точки столкновения и повышения детализации реконструируемых событий были проведены мероприятия по модернизации детекторов эксперимента ATLAS. Каждый этап производился в время длинных остановок БАК (Long Shutdown, LS), хронология и некоторые характеристики каждого этапа модернизации представлены на



Рисунок 1 – Хронология этапов модернизации БАК

рисунке 1.

В начале 2019 г. начался второй этап модернизации БАК, который продолжался до 2020 г. За это время, согласно [1], на коллайдере планируется довести энергию протон-протонных столкновений до 14 ТэВ, выйдя таким образом на проектную величину. Интегральная светимость за период 2021–2023 гг. составит 300 фб⁻¹.

Из письма о намерениях [2], завершающий этап модернизации будет осуществляться с начала 2024 г. до середины 2026 г. На этом этапе БАК претерпит довольно серьёзную реконструкцию. В частности, планируется обновление криогенных систем, криостатов, компонентов и узлов магнитов, коллиматоров, высоковакуумных систем, электрооборудования; применение новых материалов, стойких к высокой температуре. В данной конфигурации ускорительная система будет работать предположительно порядка 10 лет. Планируется довести значение пиковой светимости до величины $L = 5 - 7 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, среднее число столкновений протонов на одно пересечение сгустков составит $h_{\mu} = 200$, интегральная светимость к 2037 г. достигнет 3000 фб⁻¹, краткий обзор представлен в статье [3].

2 Система охлаждения

2.1 Первые системы охлаждения

Кремниевые детекторы необходимо охлаждать и поддерживать стабильную температуру, чтобы максимизировать соотношение сигнала к шумам, а также предотвращать перегрев, от которого зависит скорость радиационных повреждений чувствительных элементов. То есть благодаря системе охлаждения увеличивается эффективность и срок службы детекторов. В предыдущем поколении кремниевых детекторов для физики элементарных частиц, построенных в 1990-х годах, они охлаждались водой в однофазном режиме в замкнутой системы, находящейся под атмосферным давлением. Основным недостатком была недостаточно низкая температура фазового перехода воды (0°C) и ее низкий КПД.

Одним из преимуществ двухфазного охлаждения является поддержание необходимого температурного режима. Однородность температуры между датчиками способствует единообразию собранных данных.

От идеи водного раствора отказались в пользу системы испарительного охлаждения на основе перфторуглеродов (C_3F_8), по причине их более благоприятным термодинамическим свойствам, не токсичности, не воспламеняемости и радиационной стойкости. Это было реализовано для слоев SCT и пиксельного детекторов ATLAS, и установлено в 2000-х годах. Основными причинами, по которым система испарительного охлаждения предпочтительнее однофазной системы, являются: более высокий коэффициент теплопередачи, меньшие температурные градиенты вдоль длинных каналов охлаждения и меньший размер, необходимый для каналов охлаждения. Меньший размер системы и, следовательно, меньшие массовые потоки охлаждающей жидкости обусловлены большей холодопроизводительностью на единицу объема в испарительной системе, в результате использования теплоты испарения, а не удельной теплоемкости жидкостей.

Позже новые технологии для испарительного охлаждения на основе CO_2 приобрели популярность в сообществе физиков высоких энергий. Она уже использовалась для охлаждения внутреннего В-слоя (IBL) и была выбрана в качестве эталона для охлаждения всей системы детекторов ITk, ее установка планируется на 2024 год. Сравнение систем охлаждения на

основе C_3F_8 и CO_2 , а также оценка их основных характеристик и выводы об оправданности перехода к углекислому газу в качестве хладагента подробно представлены в [4].

Метод 2-фазного контура, управляемого аккумулятором

Электроника и чувствительные элементы детектора требуют легкого веса и радиационно-стойкой системы охлаждения для обеспечения стабильной и безопасной работы. Современным достижением в области технологий охлаждения детекторов является испарительное охлаждение CO_2 , основанное на метода 2-фазного контура, управляемого аккумулятором (“Two Phase Accumulator Controlled Loop”, 2PACL). Опираясь на материал статьи [5], основными преимуществами CO_2 по сравнению с используемыми в настоящее время фторуглеродами являются низкая стоимость самого хладагента и экологичность. Более того, когда в испарительном цикле используется CO_2 , превосходный коэффициент теплопередачи в сочетании с низкой вязкостью обеспечивают малый размер трубок внутри детектора, тем самым сокращая общую стоимость материалов.

2PACL представляет собой 2-фазный контур накачки, где температура испарения детектора косвенно регулируется давлением аккумулятора. Эта технология уже применяется для охлаждения некоторых составляющих внутреннего детектора ATLAS, более подробное описание можно найти в [6]. Такой метод охлаждения характеризуется отсутствием каких-либо активных компонентов внутри детектора. Процесс полностью контролируется с холодильной установки, которая может быть расположена на относительно большом расстоянии от детектора (в идеале в доступной и свободной от излучения зоне), в то время как внутри объема детектора требуется только трубка малого диаметра. Основными компонентами холодильной установки являются емкость, насос, теплообменник и “первичный” источник холода (охладитель). Емкость (называемая аккумулятором) используется для хранения насыщенной смеси жидкости и пара CO_2 . Смесь сжижается в теплообменнике (конденсаторе), который охлаждается первичной системой. Затем жидкость перекачивается по передаточным линиям в детектор, где она испаряется внутри небольших трубок (испарителей), расширяясь до заданного значения давления и становится двухфазным хладагентом, отводящим тепло детектора, а затем возвращается в

теплообменник, после чего цикл повторяется. Аккумулятор действует как расширительный сосуд и регулирует давление внутри системы и, следовательно, температуру испарения внутри детектора.

Во время работы кремниевые детекторы необходимо поддерживать при температуре значительно ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы уменьшить радиационные повреждения. Для выполнения этого требования в качестве нижнего предела рабочего диапазона выбрана температура охлаждающей жидкости $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как локальная система управления температурой на детекторе обеспечивает разницу температур ниже $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ между датчиками и охлаждающей жидкостью.

2.2 Пиксельный детектор

Общие характеристики

Внутренний детектор представляет собой систему трех дополняющих друг друга типов детекторов. Ближе всего к оси, вдоль которой движутся частицы, располагается четыре слоя кремниевых пиксельных. В центральной части (барреле) они размещены на цилиндрах с осями, совпадающими с осью движения пучка. На краях они смонтированы на дисках, перпендикулярных оси пучка. Прецизионная трековая система полупроводниковых детекторов обеспечивает измерения в области псевдобыстрот $|\eta| < 2.5$. На рисунке 2 представлено схематическое изображение структуры внутреннего детектора.

Наиболее точные измерения координат необходимо проводить вблизи соударений пучков. Каждая частица пересекает четыре слоя пиксельных детекторов. Элемент сенсорной ячейки пиксельных детекторов имеет размеры $50\text{ мкм} \times 400\text{ мкм}$. Общее число каналов считывающей электроники пиксельных детекторов составляет 638 млн.

Пиксельный детектор предназначен для обеспечения очень высокой детализации, высокоточного набора измерений как можно ближе к точке взаимодействия. Система обеспечивает три точных измерения в течение полного приема и в основном определяет разрешение параметров воздействия и способность Внутреннего детектора обнаруживать короткоживущие частицы, такие как B -адроны и τ -лептоны. Система содержит в общей сложности 140 миллионов детекторных элементов, каждый 50 мкм в направлении R и 300 мкм в z , которые имеют неопределимое значение для сбора

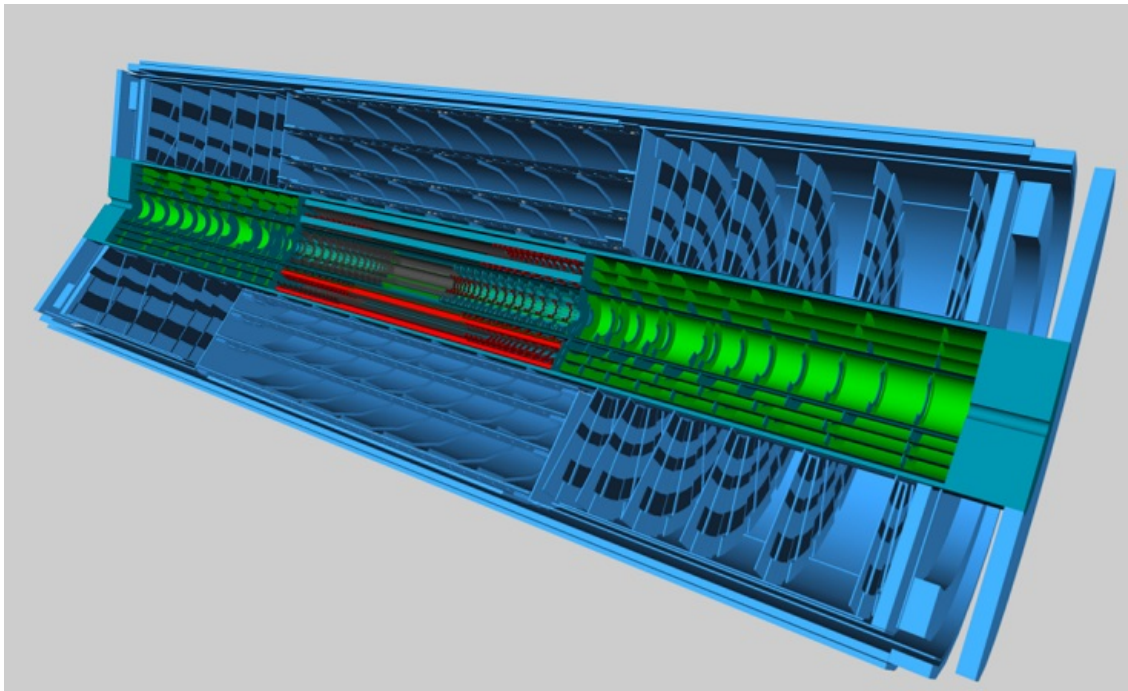


Рисунок 2 – Представление внутреннего детектора ITk. Красным отмечен пиксельный детектор, зеленым - микростриповый

данных в переполненной среде БАК.

Система состоит из трех слоев со средними радиусами 4 см, 10 см и 13 см и пяти дисков радиусами 11 и 20 см, которые захватывают угловое покрытие. Система спроектирована как высокомодульная, содержащая примерно 1500 модулей в цилиндрах и 700 модулей в дисках, и использует только один тип опорной конструкции в цилиндрах и два типа в дисках. Пиксельные модули спроектированы так, чтобы быть идентичными в корпусе и дисках. Каждый модуль имеет длину 62,4 мм и ширину 21,4 мм, с 61 440 пиксельными элементами, показания с которых считываются 16 чипами, каждый из которых обслуживает массив размером 24 на 160 пикселей. Выходные сигналы направляются по поверхности датчика на гибрид поверх микросхем, а оттуда на отдельную интегральную схему синхронизации и управления. Подробное описание пиксельного детектора представлено в источнике [7].

Система охлаждения пиксельного детектора

В отчете технического проектирования [8] указано, что в период второй фазы модернизации ATLAS будет проведена полная замена некоторых модулей пиксельного детектора на новые, изменение геометрии расположения секций и улучшение дизайна торцевых колес, в частности, во внеш-

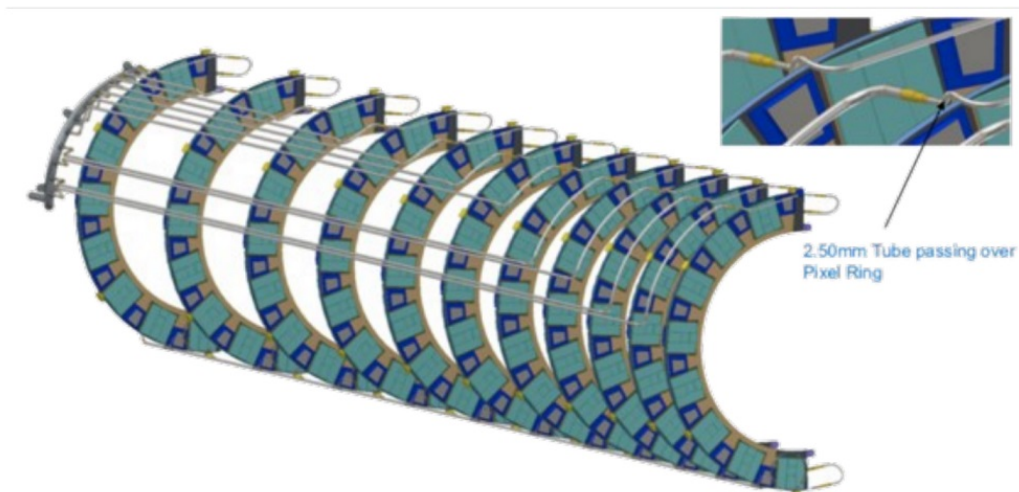


Рисунок 3 – Один из слоев торцевого элемента пиксельного детектора. Чувствительные элементы объединены в виде модулей, отмеченных зеленым цветом, и располагаются в плоскости дисков

них слоях цилиндра радиус плоского участка будет увеличен на 5 мм по сравнению с наклонными участками, чтобы снизить сложность проектирования изгиба охлаждающих трубок. Кольцевая система торцевой крышки будет смоделирована в виде 2 полуколец с сегментами, расположенными в шахматном порядке на 10 мм по z между их центрами, что обеспечивает максимальное расстояние 16 мм между соседними модулями в области перекрытия. В систему торцевых крышек пиксельного детектора был добавлен дополнительный слой внутреннего кольца, чтобы улучшить охват, близкий к $|\eta|$ около 4, и уменьшить расстояние экстраполяции между концом цилиндра и первым попаданием в торцевые диски.

МИФИ участвует в создании торцевых частей переходного трекового детектора. Торцевые элементы имеют 3 слоя. Потребление энергии всего пиксельного детектора составляет около 100 кВт, поэтому для выведения выделяемого тепла предусматривается система охлаждения. Рабочая температура детектора будет около -40 °С. На рисунке 3 показана часть системы распределения углекислого газа, соответствующая сборке модулей.

Система распределения углекислого газа для охлаждения модулей состоит из распределителя (manifold). Трубок с внешним диаметром 4 и 5 мм, изогнутых специальным образом чтобы удовлетворять геометрии детектора и подвести газ к дискам и тонкостенных трубок диаметром 3 мм приваренных на концах трубок большего диаметра, которые подводят газ

непосредственно дискам с рабочими элементами.

2.3 Временной детектор

Общие характеристики

Временной Детектор (High-Granularity Timing Detector, HGTD) — это высоко гранулярный детектор измеряющий момент времени, когда частица пересекает этот детектор. Он расположен вблизи области сталкивающихся пучков частиц на торцевых частях внутреннего детектора эксперимента ATLAS. HGTD представляет собой диск толщиной 7.5 см и диаметром 2 м. Детектор содержит около 2 000 000 чувствительных элементов (пикселей) с размером примерно $1.3 \times 1.3 \text{ мм}^2$ способных измерять время прохождения частицы с точностью 50 пс.

Важнейшим аспектом прецизионных измерений является точное определение светимости. HGTD обладает уникальными возможностями для измерения как яркости в режиме реального времени на основе группового анализа во время работы HL-LHC, так и для высокоточного определения интегрированной яркости в автономном режиме. Неопределенность светимости уже является одной из ведущих неопределенностей в измерениях связей Хиггса во время первых двух запусков БАК, и, таким образом, HGTD будет способствовать определению точного измерения светимости для выяснения свойств Хиггса.

Каждый слой HGTD является двусторонним, т.е. модули с датчиками и встроенной электроникой установлены на передней и задней сторонах общего охлаждающего диска. На рисунке 4 представлена упрощенная модель HGTD, а в таблице 1 приведены основные параметры детектора.

Система охлаждения временного детектора

Пластина охлаждения представляет собой две алюминиевые пластины с выгравированными канавками куда помещается изогнутая титановая трубка. Пластины стягиваются между собой винтами. Для улучшения теплового контакта канавки частично заполняются теплопроводящей смазкой. На рис. 5 показана система трубок для половины диска пластины охлаждения. Вся система трубок разбита на 7 секций, которые вставляются одна в другую. На концах трубок приварены специальные штуцеры для последующего соединения с газораспределительной системой. Требования к системе трубок аналогичная. Более подробно о конструкции и характеристиках в

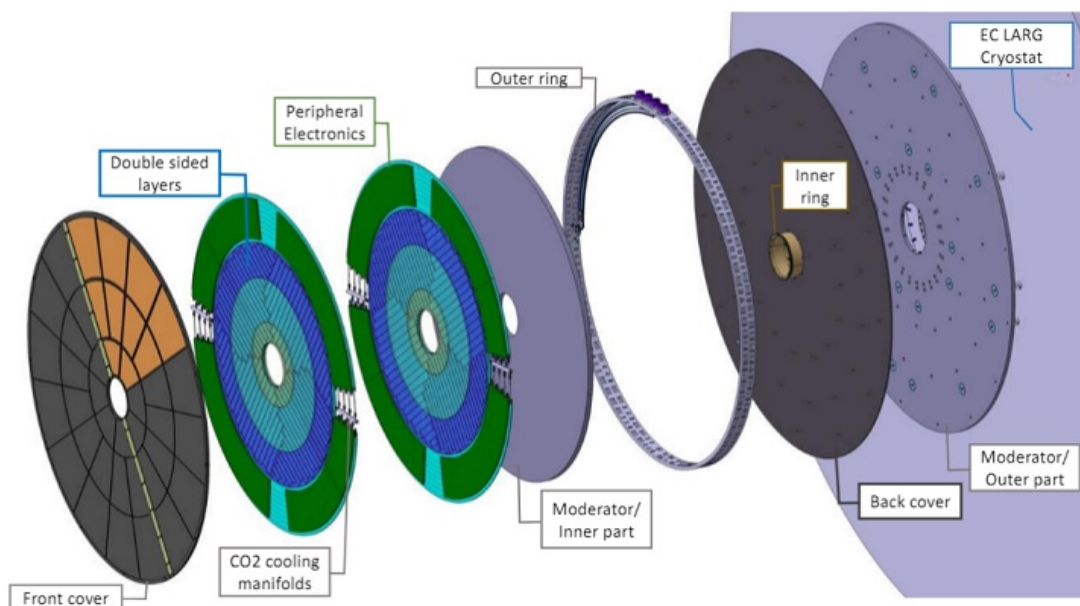


Рисунок 4 – Общий вид HGTD, который будет установлен на каждом из двух калориметров с торцевой крышкой. Показаны различные компоненты: герметичный сосуд (передняя и задняя крышки, внутреннее и внешнее кольца), два двухсторонних слоя с иллюстрациями (установлены на двух охлаждающих дисках с датчиками спереди и сзади каждого охлаждающего диска), две детали замедлителя, размещенные внутри и снаружи герметичного сосуда

источнике [9].

Согласно документу спецификации [9], в связи с тем, что система охлаждения CO_2 практически идентична системам ИТК, тепловые циклы и аварийные случаи ИТК применяются к компонентам HGTD, за исключением спецификаций однородности температуры на активных модулях, которые отличаются. Самая низкая номинальная температура испарения системы охлаждения составляет -35°C на входе в канал кипения. Однако в случае внезапного отключения тепловой нагрузки детектора падение давления исчезает, и канал кипения устанавливается на давление аккумулятора в холодильной установке. Это приводит к температуре насыщения -45°C . Система блокировки выключит питание модуля, если температура модуля превысит $+40^\circ\text{C}$. Поэтому диапазон рабочих температур устанавливается равным $-45^\circ\text{C} < T < +40^\circ\text{C}$.

В некоторых аварийных условиях давление в передающих трубопроводах может снизиться до атмосферного давления, что приведет к снижению температуры в трубах детектора до точки замерзания CO_2 при -55°C .

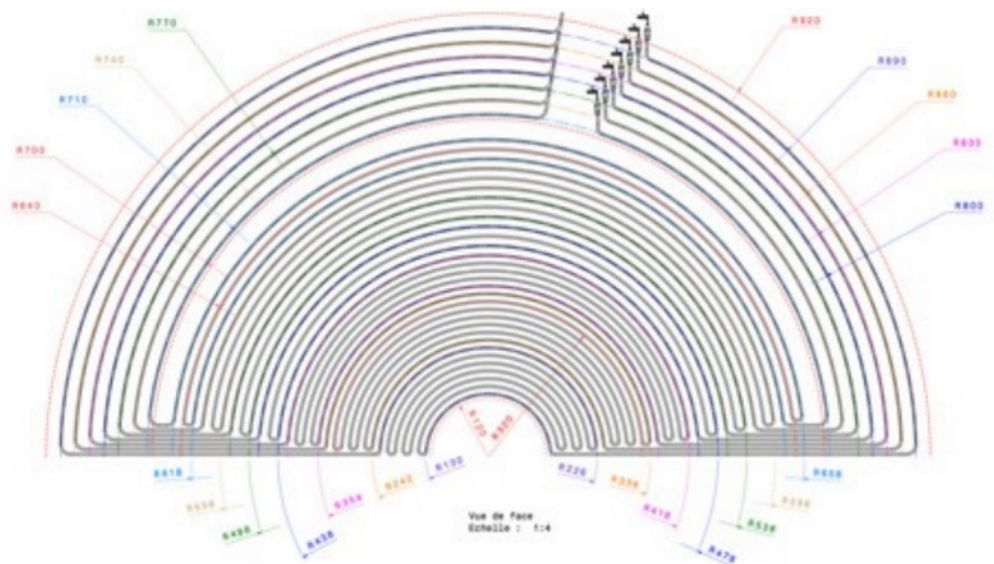


Рисунок 5 – Комплект состоящий из 7 секций изогнутых трубок для распределения охлаждающего газа для временного детектора

Таким образом, расчетный температурный диапазон сборки охлаждающих пластин составляет $-55\text{ }^{\circ}\text{C} < T < +60\text{ }^{\circ}\text{C}$, что включает случайные высокие температуры во время сборки, хранения и транспортировки. В рамках проекта по системе охлаждения МИФИ должен поставить изогнутые трубки, один комплект которых показан на рис 5. В комплект входят 7 секций, вставленных одна в другую и состоящих из труб внутренним диаметром 3 мм и внешним диаметром 4 мм. Каждая секция гнется из цельной трубы длиной от 4.2 до 5.8 м. Всего требуется изготовить таких 9 комплектов.

3 Система тестирования трубок на давлении

3.1 Конструкция установки

При испытаниях холодильной установки на прочность используется следующее оборудование:

Манометры (2 шт.) класса точности не ниже 1,5 с диаметром корпуса не менее 160 мм и шкалой с максимальным значением, равным $4/3$ измеряемого давления;

баллоны с азотом;

редуктор с предохранительным клапаном, предназначенный для работы с азотом.

Испытания холодильного контура на прочность проводятся путем заполнения трубок сухим (точка росы не выше $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) азотом под давлением.

3.2 Техника безопасности

Так как мы работаем с пневматическим испытанием системы при очень высоких давлениях, то есть вероятность разрыва как самих трубок в местах сварки или дефекта, так и повреждение системы тестирования с резким выбросом газа и осколков. Даже при соблюдении техники безопасности во время процесса, подразумевающей постепенное увеличение давления и постоянный осмотр на предмет деформаций трубок это может принести вред здоровью персонала, проводящего испытание на давление. Именно поэтому существует необходимость в защитном экранировании системы, чтобы осколки не могли вылететь за ее пределы. Например, можно создать емкость с сетчатыми стенками, в которую будет помещаться система тестирования. Если будет использоваться экран с глухой стенкой, то есть вероятность ее разрыва под действием резкого возрастания давления.

3.3 Условия тестирования

Как упоминалось ранее, система охлаждения CO_2 для HGTD практически идентична системам ИТК, поэтому условия тестирования трубок на прочность и отсутствия утечек будут одинаковыми. В первую очередь, задача заключается в проверке качества изготовленных трубок, то есть их герметичность и способность выдержать давление хладагента, в нашем

случае CO₂.

Система охлаждения оснащена предохранительными клапанами, установленными на давление 130 бар. Это расчетное давление для охлаждающих коллекторов и змеевиков. Допустимое давление для всех трубопроводов и фитингов CO₂ составляет 186 бар, включая коэффициент безопасности 1,43.

Чтобы гарантировать постоянный сухой объем внутри герметичного сосуда, соответствующий точке росы детектора ниже -55°C, в ограниченном объеме устанавливается рабочее избыточное давление 5 мбар с предохранительным клапаном на 10 мбар для учета скорости утечки хладагента. Конструктивное максимально допустимое отклонение давления составляет 100 мбар.

Давление, при котором будет осуществляться проверка составит 186 бар.

Дальнейшие тесты оценки эффективности охлаждающей системы данной конструкции и ее радиационной стойкости будут проведены позже, на этапе подключения системы охлаждения, в ЦЕРНе.

4 Процесс тестирования

Испытания необходимо проводить в следующей последовательности:

Установить один манометр после запорного вентиля у источника давления, а второй—в самой удаленной точке системы.

В холодильном контуре открыть запорные вентили и при необходимости—электромагнитные клапаны—так, чтобы каждый участок контура имел возможность подачи и сброса азота.

Поднять давление в контуре до величины давления испытания. Подъем давления следует осуществлять со скоростью не выше 1 бар в минуту. При достижении давления, равного 0,3 и 0,6 давления испытания, необходимо прекратить повышение давления и провести промежуточный осмотр и проверку наружной поверхности контура.

Под давлением испытания система должна находиться не менее 10 мин, после чего давление следует постепенно снизить до расчетного, также указанного в документации. Затем следует осмотреть наружную поверхность на предмет дефектов. Применение мыльной воды для проверки герметичности не применимо в нашем случае, поэтому мы исследуем наличие утечки хладагента с помощью разницы давлений на двух манометрах с течением времени.

Результаты признаются удовлетворительными, если во время испытаний не произошло разрывов, видимых деформаций, падения давления по показаниям манометра.

При обнаружении утечек, деформаций, разрывов необходимо сбросить давление из контура, выполнить работы по устранению неисправностей и повторить предыдущие операции.

Места расположения заглушек на время проведения испытания должны быть отмечены предупредительными знаками, и пребывание около них людей не допускается.

5 Заключение

В результате проделанной работы, были изучены современные данные исследований, связанные с временным и пиксельным детекторами эксперимента ATLAS. Разобран принцип работы системы охлаждения, хладагентом которого выступает углекислый газ, ее планируется установить для рассматриваемых нами детекторов во время следующей долгой остановки БАК.

На основе схожести условий работы временного и пиксельного детекторов, был сделан вывод, что условия тестирования трубок охлаждающей системы на давление будут одинаковыми. Даны рекомендации по составляющим конструкции системы тестирования, а также о процессе тестирования с учетом техники безопасности.

Изначально поставленная цель была достигнута не до конца, так как не была построена сама система. Однако в будущем я планирую продолжить работу над поставленной задачей и выполнить поставленную цель, пользуясь уже полученными знаниями, применить их на практике.

Список используемых источников

1. *ATLAS collaboration*. Letter of Intent for the Phase-I Upgrade of the ATLAS Experiment : tech. rep. — 2012. — P. 148.
2. *ATLAS collaboration*. Letter of Intent for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Experiment : tech. rep. — 2013. — P. 148.
3. *В. В. Синецкий Л. Н. С.* Задачи модернизации трековой системы детектора ATLAS // УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. — 2019. — т. 1. — с. 1910203.
4. *Barroca P.* Modelling of CO2 cooling of the ATLAS ITk Pixel Detector //. — 2019.
5. *M. Alhroob M. Battistin S. B.* Custom real-time ultrasonic instrumentation for simultaneous mixture and flow analysis of binary gases in the CERN ATLAS experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2017. — т. 845. — с. 273–277.
6. *Viehhauser G.* Evaporative cooling in ATLAS—Present and future // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2011. — Vol. 628, no. 1. — P. 251–255.
7. *ATLAS collaboration*. ATLAS inner detector : Technical Design Report : tech. rep. — 1997. — P. 256.
8. *ATLAS collaboration*. Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector : tech. rep. — 2017. — P. 8.
9. *ATLAS collaboration*. Technical Design Report: A High-Granularity Timing Detector for the ATLAS Phase-II Upgrade : tech. rep. — 2020. — P. 11.