

ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ —
ТРЕКЕР УСТАНОВКИ ATLAS:
ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ, МАССОВОЕ
ПРОИЗВОДСТВО МОДУЛЕЙ ТИПА В

*Ю. В. Гусаков, Н. Григалашвили, Г. Д. Кекелидзе,
В. М. Лысан, В. В. Мялковский, В. Д. Пешехонов,
Н. А. Русакович, А. А. Савенков, Е. М. Хабарова*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Ф. Диттус, Д. Фруадево

Европейская организация ядерных исследований, Женева

ВВЕДЕНИЕ	5
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	7
КОНСТРУКЦИЯ	9
НЕКОТОРЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ДУБНЕ	10
Радиационные исследования конструктивных материалов.	10
Прототипное исследование охлаждения детектора.	12
Радиационные исследования баррельного прототипа.	14
Разработка прототипов.	15
Измерение натяжения анодных проволок.	16
Методы проверки кривизны и цилиндричности строу.	17
Станция тестирования модулей TRT.	19
ОСНОВНЫЕ СБОРОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОДУЛЕЙ TRT	22
Кольцевые элементы субмодулей.	22
Тонкопленочные дрейфовые трубки.	23
Армированные строу.	24
Пластиковые сборочные элементы.	26
Радиаторы переходного излучения.	27
Платы считывания.	28

ПРОЦЕДУРА СБОРКИ, СБОРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА	29
ПРОИЗВОДСТВО ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ СУБМОДУЛЕЙ	31
Подготовка строу к сборке.	31
Предварительная сборка четырехслойного субмодуля.	33
Сборка четырехслойных субмодулей.	35
СБОРКА ВОСЬМИСЛОЙНЫХ МОДУЛЕЙ	37
ТЕСТИРОВАНИЕ ВОСЬМИСЛОЙНЫХ МОДУЛЕЙ	38
ТРАНСПОРТИРОВКА	41
РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ TRT	41
СБОРКА И УСТАНОВКА TRT ВО ВНУТРЕННИЙ ДЕТЕКТОР	43
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	48

ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ —
ТРЕКЕР УСТАНОВКИ ATLAS:
ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ, МАССОВОЕ
ПРОИЗВОДСТВО МОДУЛЕЙ ТИПА В

*Ю. В. Гусаков, Н. Григалашвили, Г. Д. Кекелидзе,
В. М. Лысан, В. В. Мялковский, В. Д. Пешехонов,
Н. А. Русакович, А. А. Савенков, Е. М. Хабарова*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Ф. Диттус, Д. Фруадево

Европейская организация ядерных исследований, Женева

Рассматривается опыт участия ОИЯИ в коллаборации с рядом российских и международных научных организаций в разработке и создании (1994–2007 гг.) детектора переходного излучения — трекера для внутреннего детектора установки ATLAS большого адронного коллайдера.

The article considers participation of the JINR TRT team for the ATLAS transition radiation tracker (TRT) building together with the large international collaboration of the ATLAS Inner Detector TRT for the LHC. The R&D and build up of the TRT went from 1994 up to 2007 at the Laboratory of Particle Physics, JINR, and CERN.

PACS: 07.77.Kq; 29.40.Gx; 41.60.Dk

ВВЕДЕНИЕ

Создаваемый в ЦЕРН большой адронный коллайдер (LHC — Large Hadron Collider) предназначен для расширения понимания природы частиц и их взаимодействий при энергии столкновения протонов 14 ТэВ в системе центра масс сталкивающихся пучков при светимости до 10^{34} см² · с⁻¹, со скважностью сгустков протонных пучков в 25 нс и числом перекрывающихся столкновений в сгустке до 22 [1, 2]. При этом вероятность наблюдения наиболее интересных процессов, таких как образование бозона Хиггса или суперсимметричных частиц, составляет величину, на 13 порядков меньшую по сравнению с частотой «обычных» взаимодействий протонов в сгустках. Задача

регистрации подобных событий определяет чрезвычайно высокие требования к экспериментальным установкам, предназначенным для работы на LHC. Одной из таких установок является крупнейший детектор ATLAS, создание которого потребовало объединения усилий более чем 2 тыс. физиков из 37 стран.

Внутренний детектор (ВД) установки, расположенный вокруг точки столкновения встречных пучков, является наиболее компактной системой и находится в крайне сложных радиационных условиях, поэтому при его разработке и создании его сервисных систем был необходим ряд оригинальных конструктивных решений. Будучи «двухъярусным» детектором, ВД вблизи точек столкновения содержит твердотельные трековые детекторы первого яруса. Детекторы второго яруса (TRT — Transition Radiation Tracker), расположенные на большем удалении от точек столкновения и состоящие из тонкостенных дрейфовых трубок (строу), предназначены для реконструкции треков заряженных частиц с $|\eta| < 2,1$, развития триггера второго уровня и идентификации электронов, являясь одновременно детекторами переходного излучения и трекером.

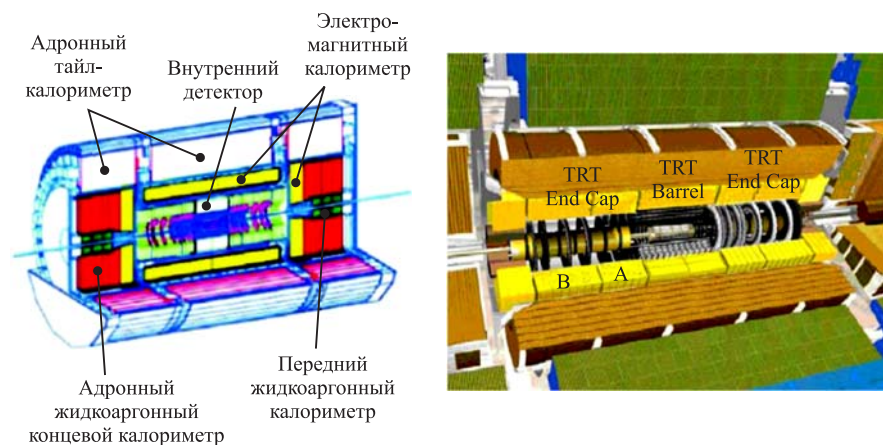


Рис. 1. Общий вид установки ATLAS (слева) и внутреннего детектора ATLAS (справа)

Схема расположения TRT в составе установки представлена на рис. 1. Полный TRT включает два детектора переднего направления (ЕС — End Cap) и детектор бокового окружения (баррель), различающиеся конструктивными решениями. Детектор бокового окружения состоит из расположенных вдоль оси пучка строу длиной $\sim 1,5$ м, детекторы переднего направления содержат наборы кольцевых модулей со строу чувствительной длиной 37,2 см, расположенными внутри колец в радиальном направлении.

Проектные требования к TRT [2]:

- пространственное разрешение не хуже 170 мкм;
- фактор режекции пионов от электронов ~ 100 ;
- минимизация вещества детектора для уменьшения загрузки от низкоэнергетичных частиц (главным образом e^-), образуемых нейтронами и низкоэнергетичными протонами;
- быстродействие ЕС до 7 МГц при осцирапсу до 30 %.

Необходимо выполнение ряда жестких проектных требований по точности к механической сборке модулей для обеспечения как компактности детектора, так и высокой однородности супермногоканального детектора. Принципиальная конструктивная схема детектора, определяемая физическими требованиями, должна была быть обеспечена современными промышленными технологиями материалов, сборочного оборудования, средствами поэтапного оперативного контроля как в процессе сборки, так и при эксплуатации детектора и его сервисных систем.

Кольцевые модули ЕС были двух типов (А и В) и различались конструктивно шагом между слоями строу. В ОИЯИ изготавливались 17 кольцевых модулей типа В с полным числом строу и, соответственно, каналов считывания 104 448. Организации в ОИЯИ полномасштабного сборочного производства способствовал большой опыт предшествующих опытно-конструкторских разработок и научно-исследовательских работ по созданию детекторов частиц и их использованию в экспериментальных установках.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Внутренний детектор установки ATLAS предназначен для работы в соленоидальном магнитном поле 2 Тл в течение десяти лет, и суммарная доза облучения может достигать величины ~ 1000 кГр. В соответствии с этим материалы, применяемые при его изготовлении, должны обладать высокой радиационной стойкостью.

Для обеспечения требований к пространственному разрешению и однородности многоканальной детектирующей системы необходима стабилизация температуры, давления газового наполнения, величин высоковольтного и низковольтного напряжений на электродах детектора и электроники считывания с высокой точностью. Температурный режим внутри модулей детектора определяют малая скорость их продува газовой смесью и крайне низкая собственная теплопроводность. Эти особенности для TRT переднего направления приводят к тепловыделению внутри строу с величиной рассеиваемой мощности до 9 мВт/строу при неравномерном распределении нагрева по длине [3]. Требования постоянства величины скорости дрейфа накладывают ограничения на максимально допустимый температурный разброс внутри детектора $\sim 10^\circ\text{C}$ [2].

Объем работ и их сложность определили необходимость проведения масштабных работ по разработке и промышленному созданию элементов детектора и его сервисных систем, разработке и созданию многочисленного прецизионного оборудования для выполнения практически каждой сборочной операции и тщательного контроля их качества. Большая коллаборация специалистов из российских институтов, ОИЯИ, ЦЕРН, университетов США и др. успешно выполнила эти разработки и создала методику сборки, оперативного контроля и тестирования TRT, используя промышленно-технологический потенциал Америки, Европы и России. Особую организационно-техническую роль сыграла на разных этапах работ находящаяся в ЦЕРН международная группа коллаборации под руководством М. Прайса с ее сотрудниками Э. Давидом, Ф. Перез-Гомезом, Н. Диксоном, Дж. Бендотти, С. Муравьевым и др.

Работы по детектору TRT начались в ОИЯИ с исследований свойств тонкопленочных дрейфовых трубок, проводимых в основном в рамках проекта R&D6 (ЦЕРН), инициированного профессором МИФИ Б. А. Долгошеиным. Были разработаны и исследованы строу различной длины (до 3 м) с анодным считыванием [4] и строу с высокоточным катодным считыванием [5]. Однако разработка детектора переходного излучения — трекера на основе строу требовала не только широкомасштабных исследований их свойств, но и поиска оригинальных решений для обеспечения стабильности их работы в течение длительного времени.

Использование строу в составе внутреннего детектора было обусловлено рядом факторов: возможностью создания двухфункционального детектора (переходного излучения и трекера), минимальной радиационной толщиной в сравнении с остальными известными координатными детекторами, достаточно хорошими радиационной стойкостью и пространственно-временными параметрами, стоимостными оценками. При этом требования к строу и сервисным системам детектора были достаточно жесткие, например, отклонение от соосности анода и катода строу должно быть менее 300 мкм. Необходима также высокая стабилизация высоковольтного напряжения и парциального состава компонентов газовой смеси.

Использование для TRT строу малой длины и диаметра с полным временем сбора заряда 42 нс и газовым усилением около $5 \cdot 10^4$, обеспечивающих высокоэффективную трековую регистрацию частиц в условиях ожидаемых загрузок, позволило создать на их основе детектор, удовлетворяющий всем требованиям к TRT внутреннего детектора ATLAS, в том числе и таким, как:

- отношение площади чувствительной зоны к полной площади детектора, близкое к 1;
- малые радиационные толщины чувствительной и конструктивной зон детектора;
- позиционирование каждой строу в пространстве не хуже 50 мкм;

— однородность параметров всех детектирующих каналов в пределах $\pm 5\%$;

— минимальная величина потерь рабочего газа на основе ксенона.

В 1995 г. было принято решение о выполнении работ по созданию ЕС-модулей типа В в ОИЯИ. Для проведения этих работ в Лаборатории физики частиц ОИЯИ были подготовлены и оборудованы помещение с высотой потолка 8 м для армирования строу (1999 г.), чистая зона площадью 100 м^2 с восемью участками для выполнения различных операций по подготовке строу к сборке детектора (2000 г.), основное сборочное помещение размером $150 \text{ м}^2 \times 7 \text{ м}$ (2000 г.), перепланированное в середине 2001 г. в соответствии с окончательно принятой коллаборацией процедурой сборки субмодулей, подсобное помещение складирования элементов и готовых изделий и, наконец, помещение для тестирования готовых модулей площадью 28 м^2 (2002 г.). Все сборочные помещения были класса 10 000 по чистоте, с локальной освещенностью не менее 500 лк, круглосуточной температурой $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ и с влажностью менее 50%. Сборочное помещение было оборудовано системой сжатого воздуха и подъемным устройством грузоподъемностью до 1 т.

2. КОНСТРУКЦИЯ

Детектор переходного излучения — трекер (TRT) представляет собой часть внутреннего детектора установки ATLAS и предназначен для идентификации электронов и восстановления треков всех заряженных частиц с быстротами $|\eta| < 2,1$ и поперечными импульсами $p_T > 0,5 \text{ ГэВ}$. Частицы пересекают ~ 40 баррельных строу на радиусе 560–1070 мм от оси пучков, а на радиусе 617–1106 мм — строу ЕС, расположенные в зоне $827 < |z| < 2744 \text{ мм}$.

Особое внимание было уделено минимизации вещества ЕС в области его внутреннего радиуса. Электроника считывания и все сервисные системы подключались на его внешнем радиусе. Диаметр строу 4 мм был выбран исходя из условий гранулированности детектора, числа электронов первичной ионизации и времени чувствительности.

TRT бокового окружения, создаваемый университетами США, состоит из трех цилиндрических колец по 32 модуля в каждом. Модули первого кольца содержат 19 слоев аксиальных строу по 329 в каждом, второго — 24 слоя по 520 аксиальных строу и третьего — 30 слоев по 793 строу в каждом. Строу вставлены в просверленные в пенообразном радиаторе переходного излучения отверстия диаметром 4,3 мм.

Каждая часть из двух идентичных ЕС-детекторов содержит 16 и 24 четырехслойных кольцевых субмодуля типа В (ОИЯИ) и А (создаваемых в ПИЯФ) соответственно, с расположенными между слоями строу пленочными радиаторами переходного излучения. Пионы и электроны, пересекая строу, дают

типичные сигналы в результате ионизации ими газового наполнения. При регистрации электронов, в случае рождения ими в радиаторах квантов переходного излучения, в строу может быть выделена дополнительная энергия, приводящая к увеличению амплитуды сигнала. Для идентификации этих случаев для каждой строу используется двухпороговая считывающая электроника с порогами $\sim 0,2$ и ~ 5 кэВ.

3. НЕКОТОРЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ДУБНЕ

3.1. Радиационные исследования конструктивных материалов. При вклеивании строу в submodule и установке анодов в строу широко применяются клеи и элементы, изготовленные из органических материалов. Было исследовано влияние величины радиационной дозы [6] на механические свойства ряда клеев (ЭЛК-5, ЦМК-5) отечественного производства и пластмасс (полисульфона и поликарбоната) [7], которые могут быть использованы для изготовления методом литья под давлением легких и прецизионных внутренних элементов детекторов.

Облучение выполнялось на экспериментальной установке импульсного реактора ИБР-2 ОИЯИ [8]. Для проводимых измерений использовался поток быстрых нейтронов интенсивностью $1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с энергетическим спектром в диапазоне 0,1–20 МэВ и средней энергией нейтронов около 1 МэВ. Кроме нейтронов в пучке присутствовали образованные в результате ядерных реакций γ -кванты, обеспечивающие скорость набора радиационной дозы до 10 Гр/с. Соотношение между флюенсом нейтронов и γ -дозой оптимизировалось выбором пучковых фильтров и поглотителей. Средняя энергия γ -составляющей пучка соответствовала 1,5–2 МэВ при максимальной величине энергетического спектра 9 МэВ. При прохождении свинцового фильтра γ -доза ослабевала до 4% от полной дозы радиационного поля и составляла в зоне облучения 350 Гр/ч. Для определения поглощенной дозы, обусловленной γ -составляющей, применялись термoluminesцентные детекторы TLD-700. Для оценки суммарной поглощенной дозы использовался эквивалент биологической ткани.

Были измерены твердость по Бринеллю, предельные и предельно допустимые величины прогиба образцов из поликарбоната и полисульфона в зависимости от поглощенной дозы. Полное время облучения составило около 300 ч, облучение состояло из 7 циклов. После каждого цикла образцы соответствующей группы вынимались из активной зоны и поступали для исследования их механических свойств. Поглощенная за все время облучения γ -доза составила 536 кГр, а сопутствующая ей доза, обусловленная быстрыми нейтронами, — 474 кГр. Полученные зависимости показали хорошее сохранение механических свойств материалов. Наблюдалось небольшое увеличение предельных и

предельно допустимых нагрузок после облучения при средних дозах, а также увеличение на 15 % твердости по Бринеллю при больших дозах. Контроль плотности образцов показал ее незначительное увеличение ($\sim 0,25\%$) при больших поглощенных дозах.

При создании детекторов широко используются различного типа эпоксидные клеи, в том числе «Araldite Standard», «Araldite 201», «Araldite 2013» и др., радиационная стойкость которых известна [9]. Разработанные в Институте неметаллов ОАО НПО «Композит» двухкомпонентные клеи типа ЭЛК-5 и ЦМК-5 обладают высокой текучестью и хорошей адгезией с лавсановыми и полиимидными пленками, что представляет большой интерес для создания детекторов на основе строу. С целью устранения образования пузырьков воздуха при подготовке клеев к работе в их состав была введена дегазирующая добавка. Элементный состав данных клеев представлен в работе [6]. Для определения относительного удлинения и предела прочности при растяжении были приготовлены методом полива на фторопластовой подложке образцы из вышеперечисленных клеев в виде пленок толщиной 0,2–0,3 мм (по 5 образцов для каждого цикла облучения и соответствующего типа клея). Максимальная величина дозы облучения образцов составила ~ 100 кГр для каждого цикла облучения, что соответствует приблизительно году работы вну-

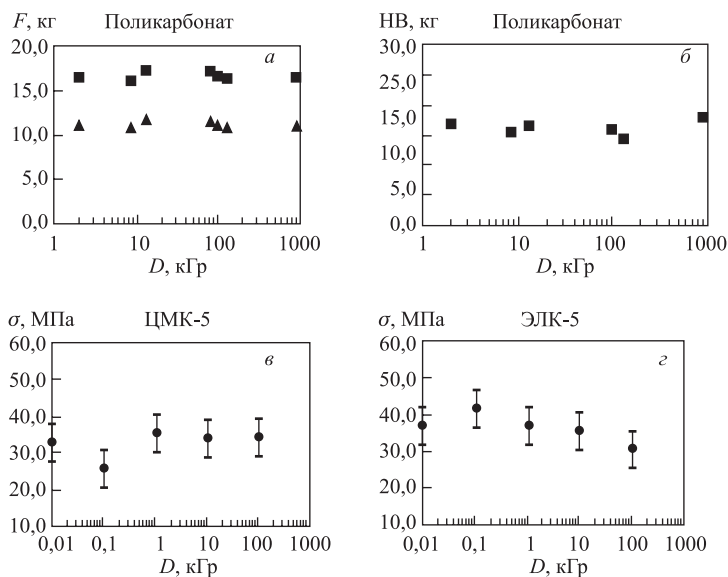


Рис. 2. Зависимость предельной (■) и предельно допустимой (▲) нагрузок от величины поглощенной дозы (а) и зависимость твердости поликарбоната по Бринеллю от величины поглощенной дозы (б). Зависимость предела прочности при растяжении от величины поглощенной дозы для образцов клея (в, г)

тренного детектора. Испытания контрольной группы и облученных образцов, проведенные в Институте неметаллов ОАО НПО «Композит», показали, что образцы клея ЦМК-5 до максимальной поглощенной дозы практически сохраняют эластичность и значения пределов прочности при растяжении, тогда как для образцов клея ЭЛК-5 при максимальной дозе наблюдается 15 %-е уменьшение величины предела прочности. Некоторые зависимости свойств материалов приведены на рис. 2.

Проведенный в ОИЯИ нейтронно-активационный анализ после облучения показал незначительное наличие в клее примесей Вг и Na, а также следы Zn, Co, Au, Cr, As. При этом в образцах с клеем ЭЛК-5 обнаружено Вг и Na примерно в 30 и 2 раза больше, чем в образцах с клеем ЦМК-5. Вследствие наличия этих примесей у образцов наблюдалась небольшая наведенная активность. Измерения показали слабое изменение механических свойств исследованных эпоксидных клеев до величины дозы облучения ~ 1000 кГр, что позволяет использовать их в наших целях.

3.2. Прототипное исследование охлаждения детектора. Изменение температуры газовой смеси координатных детекторов с анодным считыванием информации вызывает ухудшение пространственного разрешения детекторов из-за изменения скорости дрейфа электронов ионизации. Традиционно регистрирующая электроника детекторов для стабилизации ее параметров охлаждается. Однако крайне низкая собственная теплопроводность детектора в нашем случае вызывает эффект накопления рассеиваемой мощности, что приводит к изменению температурного режима внутри субмодулей. Для проведения термометрических измерений и выбора схемы охлаждения в ОИЯИ в 1995 г. совместно с представителем коллаборации Р. Гебартом (R. Gebart, ЦЕРН) была начата разработка полномасштабного секторного (42°) прототипа модуля кольцевого детектора TRT [10]. Были разработаны конструкция прототипа, микроустройства для имитации радиационного нагрева детектора, специализированные термодатчики с высокой чувствительностью при предельно низкой их собственной теплопроводности, создано необходимое оборудование и программное обеспечение. На рис. 3 приведены схема прототипа и общий вид измерительного стенда на его основе.

Разработанная методика исследований на созданном прототипе с полным комплектом необходимого оборудования использовалась в ОИЯИ в течение 1996–1997 гг. для проведения совместных (J. Godlevsky, ЦЕРН) циклов измерений в режиме сеансов.

Секторный прототип содержал 17 плоскостей радиаторов и расположенные между ними 16 плоскостей строу длиной 575 мм. Полное количество радиально расположенных строу было 1100, и точность их позиционирования составляла 0,2 мм. Радиатор толщиной 2 мм содержал 10 полипропиленовых пленок с зазором 0,2 мм. На краях секторного прототипа находилось вещество, что приводило к краевым эффектам по теплопередаче и в дальней-

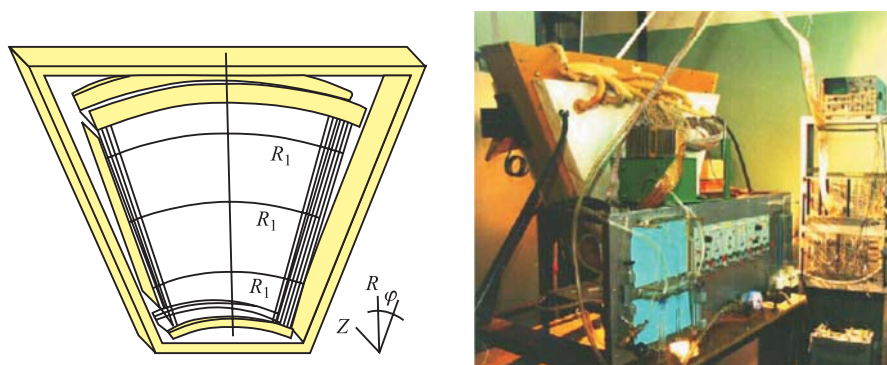


Рис. 3. Слева — схематичное изображение секторного прототипа модуля ЕС TRT; справа — общий вид измерительного стенда

шем потребовало дополнительных исследований. Для имитации нагрева были разработаны и установлены внутри строу вместо анодных проволок 1100 нагревательных элементов длиной 500 мм из нихромовых проволок диаметром 14 мкм, уложенных зигзагообразно с переменным шагом, что обеспечивало переменный по их длине нагрев в соответствии с ожидаемым на пучке. Медь-константановые термодатчики в количестве 123 шт. были изготовлены из проволок диаметром 0,1 и 0,06 мм соответственно. Теплопроводность их была сравнима с теплопроводностью элементов реального детектора. В 7 из 16 слоев строу на трех уровнях по радиусу сектора были установлены внутри строу и приклеены к нагревателям 120 термодатчиков по разработанной схеме. Термопары были установлены также на входе охлаждающего газа в сектор, до и после теплообменника с водяным охлаждением, который в реальных условиях должен был восстанавливать первоначальную температуру газа перед входом его в следующую модульную часть TRT для ее охлаждения. Для контроля потока охлаждающего газа использовались датчики дифференциального давления.

Схема расположения термодатчиков позволяла измерять распределение температур внутри прототипа по φ -, R - и Z -координатам. Положение сектора по φ изменялось от 0 до 180°, а поток охлаждающего газа мог меняться от 0 до 90 л/ч. Разработанные электроника и программное обеспечение позволяли обрабатывать данные в реальном времени и представлять на монитор изменения температур для любой из групп по 16 датчиков. Предварительно была снята температурная карта по всем 123 датчикам при отключенных нагревателях и без охлаждения, г. м. с. распределения составило 0,26 °С.

При измерениях после нагрева включались продув прототипа газом (N_2 или CO_2) и его водяное охлаждение при фиксированных температурах и

скоростях потоков. В результате исследований на прототипе была показана необходимость его принудительного охлаждения, выработаны требования к системе газового охлаждения восьмислойного модуля, но также была показана низкая эффективность трубчатого жидкостного теплообменника для снятия нагрева охлаждающего модуль газа перед выходом его из охлажденного модуля в следующий.

Для устранения этого был разработан высокоэффективный теплообменник с большой охлаждающей поверхностью за счет установленных с шагом 2 мм на 4-миллиметровой в диаметре водопроводной трубке металлических лепестков размером $50 \times 6 \times 0,5$ мм. Проведенная в 1997 г. модернизация прототипа позволила завершить цикл исследований. Были разработаны конструктивные элементы теплообменников, определены режимы газового и жидкостного охлаждения. Было отмечено некоторое различие температур для верхнего и нижнего положений прототипа ($\varphi = 0$ и 180°) из-за конвекции газа внутри строу. Так, г. м. с. температурных распределений сегмента в этих положениях даже при продуве 80 л/ч составляли 3,4 и 4 °С соответственно. При использовании CO_2 эффект охлаждения увеличивается на 19 % в сравнении с N_2 .

Созданный прототип и выполненные исследования позволили приступить к созданию в ЦЕРН системы охлаждения TRT.

3.3. Радиационные исследования баррельного прототипа. Баррельная часть TRT, содержащая $\sim 50\,000$ дрейфовых трубок длиной 1,5 м, окружает оси пучков ATLAS в области их столкновения. Сборка барреля осуществлялась группой из университетов США. При больших радиационных нагрузках от потоков заряженных частиц и нейтронов возможны изменения электрических и механических свойств используемых материалов. Это может привести как к повышению токов стекания и изменению номинальной величины высоковольтного напряжения на электродах TRT, так и к нарушению его механической целостности, что должно проявиться в его разгерметизации и повышении потерь газовой смеси.

На реакторе ИБР-30 ОИЯИ в июне 2001 г. с целью проверки баррельного детектора в условиях радиационной нагрузки, эквивалентной 20 годам работы в ЛНС, было проведено тестирование опытного образца модуля баррельной части детектора пучками нейтронов с флюенсом $3 \cdot 10^{14}$ см⁻² и заряженных частиц от гамма-конверсии $2 \cdot 10^{16}$ см⁻² (В. В. Голиков, В. И. Лушиков). Одновременно с этим облучался набор сборочных элементов модулей.

Модуль размером $150 \times 25 \times 25$ см был размещен на специальном устройстве в канале реактора на расстоянии 3,3 м от его активной зоны, сервисное оборудование прототипа располагалось в экспериментальном холле. На рис. 4 показан момент установки модуля на канале реактора.

Измерение энергетического спектра и флюенса нейтронов проводилось методом активационного анализа восемью наборами датчиков по семь фольг

в каждом. Каждый набор измерял поток быстрых ($E_n > 100$ кэВ), тепловых ($E_n < 0,4$ эВ) и резонансных ($0,4$ эВ $< E_n < 100$ кэВ) нейтронов. Модуль в процессе облучения продувался газовой смесью ArCO₂ и находился под напряжением, обеспечивающим в нем низкое газовое усиление. Как и в реальной установке, строу охлаждались внешним обдувом CO₂. Потоки заряженных частиц, протонов и нейтронов, ожидаемые в TRT ATLAS за 20 лет работы, составляют 10^6 , 10^7 и $1,3 \cdot 10^6$ см⁻² · с⁻¹ соответственно. Полученные на ИБР-30 за 10 сут облучения потоки составляли $8 \cdot 10^6$, $8 \cdot 10^8$ и $7 \cdot 10^8$ см⁻² · с⁻¹ соответственно. При облучении постоянно контролировались температура и влажность окружающей среды, темновой ток модуля и потери продуваемой газовой смеси.

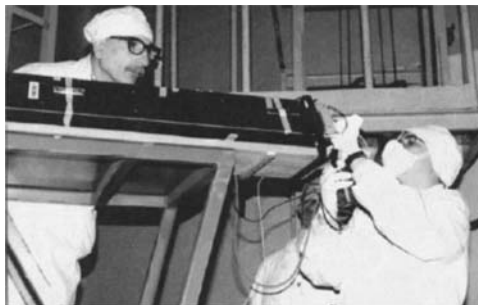


Рис. 4. Установка модуля баррельного детектора на канале реактора ИБР-30. Справа сотрудник Университета шт. Индиана (США) П. Ганьон

По результатам сеанса было отмечено незначительное увеличение темновых токов модуля (от 0,08 до 0,23 мкА), что частично объяснялось изменением влажности.

После облучения была зарегистрирована активация модуля, объясняемая применением проводящего клея на основе серебра. Проведенный в ОИЯИ через 3 месяца после облучения модуля нейтронно-активационный анализ показал наличие долгоживущих нуклидов, в том числе ^{110m}Ag с периодом полураспада 250 сут, образуемого в реакции $^{109}\text{Ag}(n, \gamma)^{110m}\text{Ag}$ с тепловыми и резонансными нейтронами. Вклад ^{110m}Ag в суммарную наведенную активность составлял более 90%. Были обнаружены следы сурьмы ^{124}Sb ($T_{1/2} = 60$ сут), присутствующей, как правило, в олове в виде примеси. Присутствие ^{46}Sc ($T_{1/2} = 88$ сут) и ^{124}Sb может быть объяснено реакциями $^{123}\text{Sb}(n, \gamma)^{124}\text{Sb}$ и $^{45}\text{Sc}(n, \gamma)^{46}\text{Sc}$ под действием тепловых и резонансных нейтронов. Возможно, ^{46}Sc образуется в реакции $^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$ под действием быстрых нейтронов.

После уменьшения уровня активации (март 2002 г.) модуль был отправлен в ЦЕРН и затем в США, где была проведена проверка механических свойств облученных сборочных элементов: образцов клея и адгезивных лент из университетов Дюка и Пенсильвании, образцов радиатора, анодных проволок и др. Результаты тестирования модуля показали возможность использования барреля TRT в ЛНС.

3.4. Разработка прототипов. Для проверки параметров TRT сотрудниками МИФИ, ФИАН и ОИЯИ был разработан и собран 30-градусный сек-

торный прототип (1993 г.), содержащий 5 идентичных модулей с 16 слоями радиально расположенных 32 строу в каждом, используемый в течение ряда лет для тестовых исследований на пучке SPS (ЦЕРН). Общий вид модуля показан на рис. 5. Всего модули содержали 2560 строу. Перед каждым слоем располагался радиатор из 17 пленок

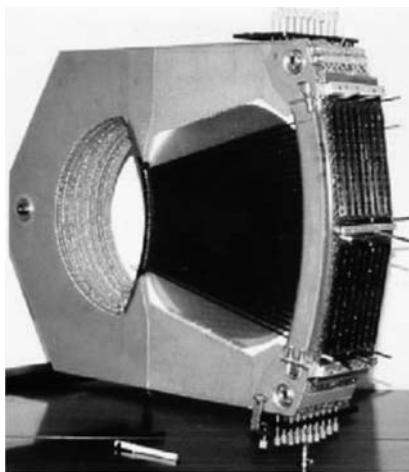


Рис. 5. Модуль сегментного прототипа

толщиной 15 мкм с зазором между ними 230 мкм. В ОИЯИ была разработана технология его сборки и создано специализированное оборудование, используемое для совместной работы по сборке модулей.

3.5. Измерение натяжения анодных проволок. Все методы измерения натяжения проволок в многопроволочных детекторах базируются на фундаментальной связи резонансной частоты механических колебаний с натяжением проволок и различаются способами возбуждения этих колебаний и поиска частоты резонанса. Ряд известных методов требует гальванического контакта с обоими концами проволок, что невоз-

можно в нашем случае. Это является причиной использования нами акустического метода. Из-за колебаний анодной проволоки под воздействием звуковых волн меняется емкость строу; так, для строу диаметром 4 мм при отклонении проволоки диаметром 30 мкм на 0,1 мм изменение емкости составляет $\sim 0,05\%$. При разности анод-катодных потенциалов возможна регистрация электрических сигналов, максимальных при совпадении частоты звуковых волн с резонансной частотой колебаний анодной проволоки.

На анод строу подается напряжение ~ 600 В. Излучатель звуковых колебаний (динамик, расположенный вблизи строу) получает от управляемого генератора через усилитель мощности синусоидальный сигнал переменной частоты. Импульс с анодной проволоки через полосовой усилитель подается на дискриминатор. При сканировании по частоте регистрируются сигналы с анода, превышающие порог дискриминатора. Разработанный в ОИЯИ измеритель натяжения в режиме реального времени определял резонансную частоту с точностью ± 1 Гц, точность определения натяжения проволоочки составляла ± 3 г [11].

В дальнейшем коллаборацией были созданы акустические измерители подобного типа, идентичные для всех пользователей. На детектор устанавливался динамик, и на группу из 32 строу измеряемого слоя подавалось постоянное напряжение ~ 500 В. Информация о натяжении проволоки предста-

влялась на мониторе и документировалась. Допустимым считалось натяжение проволочек в пределах 55–80 г.

3.6. Методы проверки кривизны и цилиндричности строу. Высокие требования к цилиндричности и прямолинейности строу для TRT переднего направления вызвали необходимость измерения этих величин для сортировки строу по данным параметрам перед их установкой. В ОИЯИ был предложен метод определения кривизны строу по анализу интегральных характеристик светового пятна от проходящего через строу параллельного пучка света с расходимостью не более 0,2 мрад. Сформированный оптической системой параллельный световой пучок проходил через исследуемую строу, далее через фокусирующую оптику проецировался на ПЗС-матрицу. Анализ среднеарифметической величины радиуса светового пятна и отклонений от геометрического центра позволял определять прямолинейность строу с точностью ~ 200 мкм и выявлять с высокой точностью локальные поверхностные дефекты [12].

Одновременно с этим в ЦЕРН был разработан прямой метод измерения прямолинейности строу [13]. Строу вертикально устанавливалась в двух соосных держателях и вращалась вокруг своей оси. Установленная WEB-камера перемещалась вдоль строу сверху вниз с остановками в семи позициях, где производилась серия снимков с шагом вращения строу в 10° . Результат анализа, содержащий информацию о кривизне и цилиндричности строу, выводился на монитор. По полученным данным о кривизне строу они распределялись по четырем категориям: менее 100, 100–200, 200–300 и более 300 мкм (или плохая цилиндричность). Этот метод проверки прямолинейности строу на подготовительной стадии перед их установкой в кольцевой submodule был принят коллаборацией, и созданная в ЦЕРН аппаратура поступила в ОИЯИ в мае 2000 г. В течение 6 месяцев была собрана установка, настроен режим тестирования и подготовлен персонал. За два года было протестировано 113 851 строу для установки в submodule типа В и частично А (около 8000). В 2003 г. было проверено 49 353 строу типа С длиной около 51 см. Представление результата измерения кривизны одной строу на мониторе показано на рис. 6.

Однако возникшая затем целесообразность в оперативной проверке прямолинейности вставляемых в submodule строу до полного завершения этого сборочного этапа вызвала возврат к предложенному ранее методу анализа изображения светового пучка, прошедшего сквозь строу. Кроме того, возникла необходимость в проверке на отсутствие резистивного контакта между проводящей наружной поверхностью каждой строу с соседними или с проводящими кольцами submodule. Для оперативного выполнения этих тестов в ОИЯИ была разработана и изготовлена автоматизированная система, содержащая два отдельных устройства с общей системой управления. В отличие от ранее предложенного метода вместо ПЗС-матрицы использовалась

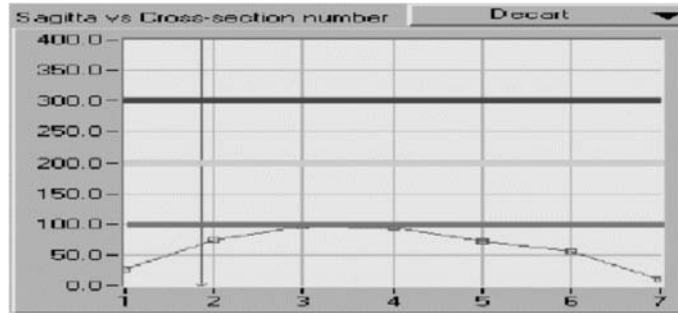


Рис. 6. Отображение изогнутости строу на мониторе. По оси ординат отложено отклонение строу от оси (в мкм), по оси абсцисс — номер позиции вдоль строу

WEB-камера с оптической системой, что позволило повысить точность измерения прямолинейности строу до 100 мкм [14].

Аппаратура была установлена на каретке, перемещающейся по столу вокруг собираемого submodule (рис. 7). Блок управления осуществлял ее перемещение, остановку у проверяемой строу и передачу информации в персональный компьютер. Одновременно проводилась проверка на отсутствие резистивных контактов с другой исследуемой строу. Цикл измерений начинался оператором с нижнего слоя строу. Шаговый двигатель опускал измерительные контакты на три соседние строу, при этом на поверхность центральной подавалось напряжение величиной 1 кВ, а поверхности соседних строу находились под потенциалом земли. Автоматически контролировалось

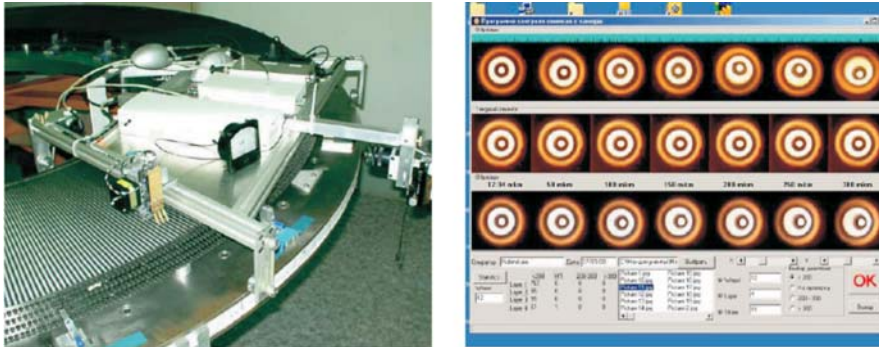


Рис. 7. Слева — общий вид устройства, проводящего проверку кривизны и отсутствия резистивных контактов установленных строу. Справа — изображение на мониторе исследуемой на кривизну строу

качество контактов, затем проводилось измерение тока в цепи устройства. При токе более 200 нА, указывающем на наличие резистивного соединения исследуемой строу, блокировалось перемещение каретки до его устранения оператором.

Измерение прямолинейности проводилось для впереди расположенной строу. Отраженный от экрана свет попадал в строу через отверстие в ее концевой втулке. Установленная с противоположного конца строу WEB-камера с дополнительной оптической системой с глубиной резкости ± 5 см относительно центра по длине строу фиксировала и передавала в ПК световое изображение в виде набора концентричных колец, степень искажения которых характеризует меру кривизны строу. На рис. 7 приведено изображение исследуемой строу (средний ряд) и два идентичных набора изображений от калибровочных строу с известной их кривизной в диапазоне от 0 до 300 мкм с шагом в 50 мкм (нижний и верхний ряды), используемых оператором для сравнительного анализа.

Развитие программного обеспечения на основе программы MATLAB позволило не только представлять на мониторе записанные световые изображения от всех строу слоя, но и автоматически классифицировать их по категориям А, В, С и D (< 200 , ~ 200 , $200\text{--}300$, > 300 мкм соответственно), представлять статистическую информацию и адресный список подлежащих замене строу, создавать базу данных изображений [15].

3.7. Станция тестирования модулей TRT. Для автоматизированного тестирования одновременно двух объединенных субмодулей TRT были разработаны и созданы 3 идентичные тест-станции (ТС) для использования в ЦЕРН, ПИЯФ (Гатчина) и ОИЯИ, позволяющие набирать данные для каждой из 6144 строу модуля в шести точках по их длине [16]. В состав оборудования входили механические элементы станций и источники гамма-излучения, регистрирующая электроника и программное обеспечение, мониторный счетчик (МС), системы газообеспечения и высоковольтного питания. При тестировании модули продувались газовой смесью — Ar/CO₂ (70/30 %) со скоростью продува 40 л/ч и облучались источниками ⁵⁵Fe с энергией γ -квантов 5,9 кэВ. Одновременно два источника облучали МС и 12 коллимированных источников облучали модуль. С учетом эффективности фотоэффекта в Ar, количества вещества от источников ⁵⁵Fe до удаленных слоев строу и требуемой коллимации была определена необходимая активность источников, составляющая ~ 5 мКи. В ОИЯИ в 1999 г. были созданы и сертифицированы источники с требуемой активностью для всех ТС.

Механическое оборудование было изготовлено в 1999–2000 гг. в ОИЯИ и поставлено в ЦЕРН и ПИЯФ. Тестируемый детектор вывешивается вертикально на ферму тест-станции, после чего вплотную к нему устанавливается «ротор» с шестью радиальными стержнями, на которых в определенных позициях по радиусу (рис. 8) в герметичных контейнерах-коллиматорах находятся

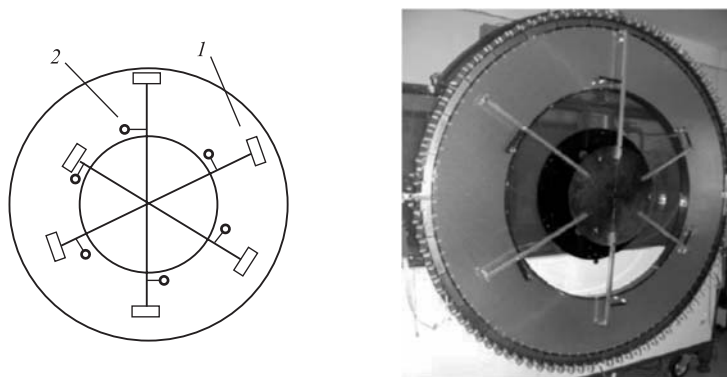


Рис. 8. Слева — изображение ротора с коллимированными источниками для исследования строу (1) и референсными источниками (2). Справа — общий вид тестируемого модуля на ТС

12 гамма-источников: 6 — для облучения тестируемых строу и 6 — для облучения референсных строу первого слоя. В зону облучения от каждого источника попадает по 8 строу каждого слоя.

В каждой угловой позиции ротора одновременно измерялись спектры (6 × 8) строу первого и четвертого слоев, затем — второго и третьего слоев, после чего ротор автоматически поворачивался в следующую угловую позицию для измерений следующих (6 × 32) строу. Спектры с контрольных строу первого слоя (6 × 8) измерялись постоянно.

Измерение четырех слоев проводилось непрерывно и занимало ~ 40 ч. Измерение одной позиции требовало ~ 3 мин, а интервалы между измерением спектров одних и тех же строу в разных точках по длине составляли 7–8 ч.



Рис. 9. Общий вид мониторингового счетчика

Данные с фиксированных позиций калибровочных строу использовались для коррекции результатов с учетом изменений параметров окружающей среды или сервисных систем станции. Так как отношение интенсивностей облучения одноименных строу первого и четвертого слоев было около 35, по окончании первого этапа измерений модуль переставлялся с разворотом на 180° и проводились измерения строу его второго субмодуля.

Мониторный счетчик тестовой станции (рис.9), предназначенный для контроля чистоты газовой смеси и стабильности парциального давления ее

компонентов, содержал 6 строу диаметром 4 мм и длиной 15 см и подключался параллельно модулю TRT к общей газовой системе.

Данные с тестируемого модуля, мониторингового счетчика, датчиков атмосферного давления, влажности и расположенных по наружному и внешнему диаметрам модуля восьми температурных датчиков поступали в базу данных для анализа спектров сигналов со строу и определения для каждой строу величины D , характеризующей ее прямолинейность и вычисляемой по формуле

$$D = \frac{2(A_{\max} - A_{\min})}{A_{\text{in}} + A_{\text{out}}},$$

где A_{\max} , A_{\min} — максимальное и минимальное значения измеренных амплитуд сигналов строу; A_{in} и A_{out} — амплитуды сигналов, измеренных в начале и в конце строу по направлению потока рабочей газовой смеси. Коррекция амплитуд сигналов за счет изменения давления и температуры позволяет считать провисание анода основной причиной изменения коэффициента газового усиления G . На рис. 10 показано типичное изменение G в зависимости от величины провисания анодной проволоки.

При $D \geq 9\%$ строу отключалась по высоковольтному напряжению.

Для обеспечения необходимой точности тестирования модулей было проведено тестирование газовой системы с собственным объемом 199,6 см³ при помощи МС. При продуве 500 см³/ч смена одного объема газовой смеси происходила за ~ 23 мин, отклик данных с монитора на изменения параметров окружающей среды наблюдался с задержкой на эту же величину. В результате тестирования были определены корректирующие коэффициенты изменения амплитуды сигналов в зависимости от температуры (k_T) и давления (k_P), равные 6,24% на 1 °С и 0,66% на 1 мбар соответственно.

Полученное значение указало на необходимость замены типовых газовых ротаметров на электронные, автоматически корректирующие скорости продува газовых компонент по данным датчиков температуры и давления, т. е. повышающие стабильность их парциального давления. После установки электронных ротаметров значение k_T составило величину 2,9% на 1 °С. Газовая система собрана из компонентов и материалов высокой чистоты (не содержащих следов масел и Si), обеспечивает подачу номинальной газовой смеси с заданным потоком, соответствующим одной смене объема газа в восьмислойном модуле в час (~ 30–40 л/ч).

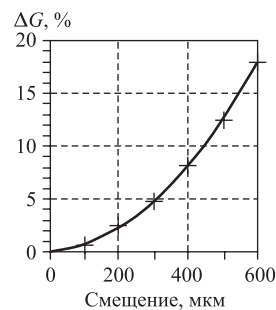


Рис. 10. Изменение G в зависимости от смещения анодной проволоки диаметром 30 мкм. Напряжение на строу 1,38 кВ, Ar/CO₂ (76/24 %)

С декабря 2002 г. по декабрь 2005 г. были протестированы семнадцать модулей с общим числом строу 104 448. По результатам тестов выявлено 157 неработающих строу ($\sim 0,15\%$) и 12 строу с аномальным поведением ($\sim 0,01\%$), все эти строу были отключены. В процессе тестирования часть неработающих каналов из-за непрохождения сигналов по плате считывания ремонтировалась. Количество отремонтированных каналов составило 1057, а общее количество отключенных строу $\sim 0,16\%$.

4. ОСНОВНЫЕ СБОРОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОДУЛЕЙ TRT

4.1. Кольцевые элементы submodule. Основными механическими элементами TRT ЕС являются композитные кольца, изготовленные в РФ из углеродных волокон отечественного производства. Хорошие механические свойства материала, высокая радиационная стойкость, низкий коэффициент температурного расширения, низкая газовая адгезия и прозрачность позволяют создавать из него легкие, прочные и стабильные во времени конструкции, удовлетворяющие самым высоким требованиям. Сотрудниками ОИЯИ был проведен поиск в РФ и подготовлено предварительное соглашение об изготовлении уникальных прецизионных колец для коллаборации TRT ATLAS на заводе «Машиностроитель» (Пермь), где под руководством В. В. Балдина в дальнейшем был успешно выполнен весь требуемый объем работ по созданию композитных колец всех типов.

Для модулей типа В необходимо было изготовить по 34 кольца В1, В2 и В3. Каждый submodule типа В собирается из одного внутреннего (В1) и двух внешних (В2 и В3) углекомпозитных колец шириной ($54,9_{-0,2}$) мм и диаметром ($1268,4_{-0,5}$), ($2006_{-0,5}$), ($2058_{-0,5}$) мм соответственно. Толщина колец была ($1,2_{-0,1}^{+0,1}$) мм (В1) и ($4_{-0,2}^{+0,2}$) мм (В2, В3). Кольца В1 и В2, используемые для поддержки строу, имеют 3072 отверстия с угловой точностью их позиционирования $\pm 10''$ и с аксиальной точностью $\pm 0,02$ мм. Отверстия диаметром ($3,0_{-0}^{+0,03}$) мм (В1) и ($5,3_{-0}^{+0,03}$) мм (В2) использовались для вклейки в них четырех слоев строу, в каждом слое одно отверстие являлось также референсным. Дополнительно в кольце В1 сверлилось 96 отверстий, а в кольцах В2 и В3 — по 192 отверстия диаметром ($2,1_{-0}^{+0,06}$) мм для установки пинов заземления колец. Кольцо В3 имело еще 4 отверстия диаметром ($3,0_{-0}^{+0,075}$) мм для установки газовых элементов, 14 референсных отверстий диаметром ($4,0_{-0}^{+0,075}$) мм и 2 отверстия для установки газовых разъемов. Референсные отверстия использовались при сборке submodule.

После сборки submodule объединялись в восьмислойные модули с установкой на них всех элементов сервисных систем. Затем в ЦЕРН восьмислойные модули типов А и В объединялись для установки их во внутренний детектор.

Партии изготовленных колец проходили контроль в Перми с представителями институтов-изготовителей TRT, от ОИЯИ таким представителем являлся Ю. Л. Злобин. Каждая поступавшая в ОИЯИ партия также проходила входной контроль, заключающийся в визуальном контроле, проверке геометрических размеров и величин деформации под собственным весом и при нагрузке.

4.2. Тонкопленочные дрейфовые трубки. Хорошо известно использование металлических или пластиковых дрейфовых трубок для регистрации заряженных частиц, например, мюонов. Известно применение тонких пленок с проводящим покрытием для изготовления трубок малого диаметра и создания на их основе прототипов и небольших детекторов частиц [17, 18]. Сотрудниками МИФИ было предложено изготовление трубок из каптоновой пленки с проводящим углеродным слоем, нанесенным на пленку по технологии предприятия «Пластик» (Москва). Для прототипных исследований в ОИЯИ (1995 г.) было изготовлено два типа полиимидной пленки толщиной 40 мкм с нанесенным слоем полиуретанового термоклей на одной стороне пленок и с резистивным углеродным покрытием или металлизацией толщиной $\sim 450 \text{ \AA}$ на другой их стороне. Для этой же цели в ОИЯИ был разработан и создан станок для намотки из этих пленок строу диаметром от 4 до 15 мм.

Исследования свойств строу показали их удлинение при нагрузке с релаксацией в течение некоторого времени после ее снятия, а также возможное ухудшение их цилиндричности. Увеличение влажности также приводит к удлинению строу, релаксация которого для строу, установленных в детектор, затруднена сложностью их сушки.

Для устранения подобных эффектов и снятия нагрузки со строу при их установке в кольца субмодуля коллаборацией было предложено усиливать (армировать — в дальнейшем) строу в продольном направлении углеродными нитями. Четыре нити, состоящие из 1000 волокон диаметром 8 мкм, наклеивались эпоксидным клеем на внешнюю поверхность строу. Общий вес наклеенных стрипов составлял 0,266 г/м.

Для TRT был выбран метод изготовления строу из двух идентичных каптоновых пленок с углеродным покрытием по разработанной в Москве технологии. Производство строу проводилось в несколько этапов: в марте-июне 1997 г. около 600 кг каптоновой пленки типа 100VN толщиной 25 мкм (фирма «Дюпон») поступили в ОИЯИ и прошли процедуру нанесения алюминиевого покрытия толщиной около 0,2 мкм, а затем на предприятии «Пластик» — нанесения графитового слоя толщиной (6 ± 2) мкм. Там же на противоположную сторону пленки был нанесен слой полиуретана толщиной около 5 мкм, служащий при намотке строу термоклеем. Окончательная толщина пленки составила (36 ± 6) мкм, резистивность была около 10 Ом/квadrat. Сопровождение этих работ проводилось сотрудником МИФИ В. Н. Сосновцевым.

Намотка строу длиной $\sim 1,7$ м проводилась фирмой «Lamina Dielectrics Ltd» (Англия) (www.laminadielectrics.com). Строу с внутренним диаметром $(4,0^{+0,02}_{-0,00})$ мм наматывались на калиброванный стержень из двух лент, расположенных клеевым слоем друг к другу со смещением в $1/2$ их ширины. Проводящие графитовые покрытия находились на внутренней и наружной их поверхностях. Толщина стенки строу составляла ~ 72 мк, электрическое сопротивление поверхности — 300 Ом/м и вес — 1,36 г/м. Конструкция строу схематично показана на рис. 11.



Рис. 11. Схематичное изображение конструкции строу

Начиная с сентября 1999 г. строу поступали в ОИЯИ для их армирования и дальнейшей работы с ними.

4.3. Армированные строу. Для исключения изменения линейных размеров строу при вариациях климатических условий и повышения их жесткости коллаборацией было разработано пневмоэлектрическое автоматизированное устройство для армирования строу длиной 1,65 м, поступившее в ОИЯИ из ЦЕРН в июле 1999 г. Для оборудования требовалось чистое помещение со стабильными температурой и влажностью и с высотой потолка около 8 м. В течение 1999 г. было подготовлено помещение, разработаны и изготовлены 4 термощафа для сушки обдувом нагретым воздухом 63 вертикально подвешенных строу в каждом. Кроме того, была отработана схема транспортировки сырых строу после их армирования в сушильные шкафы, исключая их колебания, ухудшающие прямолинейность. Смонтированное за несколько месяцев и введенное в действие устройство использовалось в течение полугода для отработки режимов армирования строу с последующим тестированием, а также для обучения персонала.

Первая партия армированных строу в количестве 600 шт. была отправлена в ЦЕРН в середине сентября 2000 г. На рис. 12 показано установленное в ОИЯИ устройство, на котором с сентября 2000 г. по апрель 2002 г. в режиме массового производства было армировано 91 993 строу, что покрывало более 50 % потребности в них TRT.

Устройство управлялось персональным компьютером с программным обеспечением, загружаемым в контроллер «Siemens S-300» с собственной памятью и способностью функционировать автономно, и содержало системы, обеспечивающие:

- позиционирование четырех углеродных нитей в требуемое пространственное положение и автоматическую подачу строу для армирования;
- пропитку эпоксидной смолой четырех углеволоконных нитей и их натяжение;

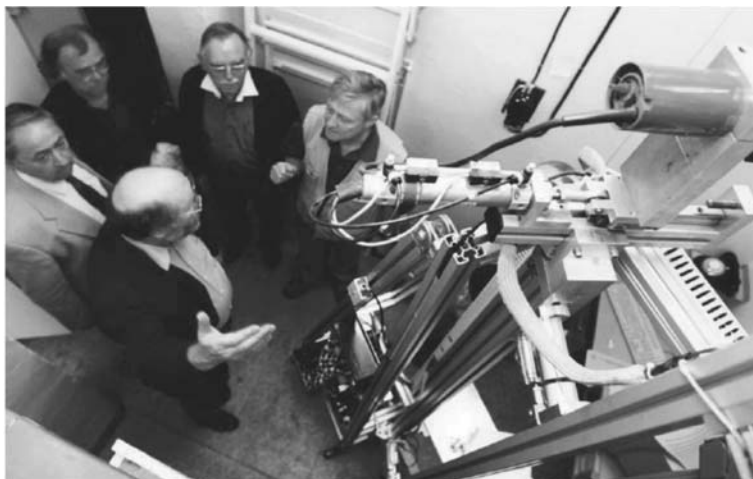


Рис. 12. Общий вид устройства армирования строу

— армирование строу с последующей обрезкой нитей, их жгутовку и быструю полимеризацию смолы в области жгута под температурным воздействием перед повторением процедуры при армировании следующей строу.

В процессе армирования строу размещалась внутри жгута из четырех пропитанных эпоксидным компаундом (Bakelite resine SL/Hardener L20) нитей и начинала вертикальное перемещение. К прошедшей армирование строу оператор подвешивал груз, извлекал из устройства и строго вертикально перемещал в сушильный шкаф. В течение 4 ч строу обдувались воздухом при температуре $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ и более 8 ч находились без обдува при практически неизменной температуре. Армирование проводилось в две смены по два оператора в каждой, и количество армированных строу определялось емкостью сушильных шкафов. После заполнения в течение ~ 135 мин одного шкафа операторы тщательно промывали все ролики кинематической системы и другие элементы устройства, контактировавшие с эпоксидным компаундом.

Армированные строу после визуального контроля проходили проверку их кривизны с помощью вращения строу на вертикально вращающемся калиброванном стержне. Измерялся радиус окружности, описываемой нижним концом строу, и по его величине строу сортировались на четыре категории: < 3 ; 3–4; 4–8 и > 8 мм. Максимальная сагитта строу для этих категорий была $< 0,75$; 0,75–1; 1–2 и > 2 мм соответственно.

Для ЕС использовались строу первых двух категорий. В сравнении с ЕС к строу барреля TRT требования по кривизне были более слабыми, что позволяло использовать строу категории 4–8 мм, но их внешний диаметр не должен был превышать 4,2 мм. Исходя из этого проверялся твердосплавным калибром максимальный диаметр всех 60 781 отправленных в США баррельных строу. Отбраковано по этому параметру было 0,01 % строу. Двухсменная работа обеспечивала армирование 252 строу в сутки, или ~ 5000 в месяц. На рис. 12 можно видеть общий вид устройства армирования, а также интерес дирекций ОИЯИ и ЦЕРН, регулярно интересующихся ходом работ по созданию TRT ATLAS.

Контроль качества продукции, сортировка строу по заданным параметрам и упаковка партий выполнялись одним техником. Инженерно-техническое сопровождение работ при массовом производстве осуществлялось А. А. Савенковым.

При армировании в режиме массового производства было наклеено на строу ~ 608 км углеволоконных нитей. Вес одного метра каждого установленного стрипа составлял 0,067 г. В технологический брак всего ушло 573 строу, что составило 0,06 % от их общего числа.

4.4. Пластиковые сборочные элементы. Поликарбонат является наиболее подходящим материалом для вакуумной отливки пластиковых элементов. В 1997 г. ОИЯИ и ЗАО «Полет-пластик» (В. М. Козлов, Москва) разработали и изготовили прецизионные литьевые формы для отливки четырех типов пластиковых элементов из поликарбоната с минимальными толщинами в них ($0,2^{+0,02}$) мм при длине этих тонкостенных участков до ~ 10 мм. В 1998 г. была разработана технология прецизионного литья тонкостенных изделий, для чего было приобретено и установлено дополнительное термостабилизирующее литьевой процесс оборудование, изменена технология литья. Было изготовлено 26 000 прецизионных элементов четырех типов для сборки в ЦЕРН кольцевого прототипа субмодуля и других прототипов, точность изделий была около 30 мкм.

Опыт изготовления этой опытной партии был использован коллаборацией для конструктивной доработки элементов при размещении заказа на европейских предприятиях с учетом требований изготовителей (была проведена корректировка размеров, увеличены толщины стенок и снижены требования к точностям до 0,05 мм). Было изготовлено $\sim 2\,000\,000$ элементов шести типов. Для примера на рис. 13 и 14 приведена конструкция наиболее сложных двух пластиковых втулок и фиксирующего пластико-металлического элемента, аналогичного разработанному ранее в ЦЕРН [19, 20].

Для фиксации анодной проволоки в пластиковых втулках с одной стороны строу используются пластико-металлические пины, а с другой — подобные им металлические.

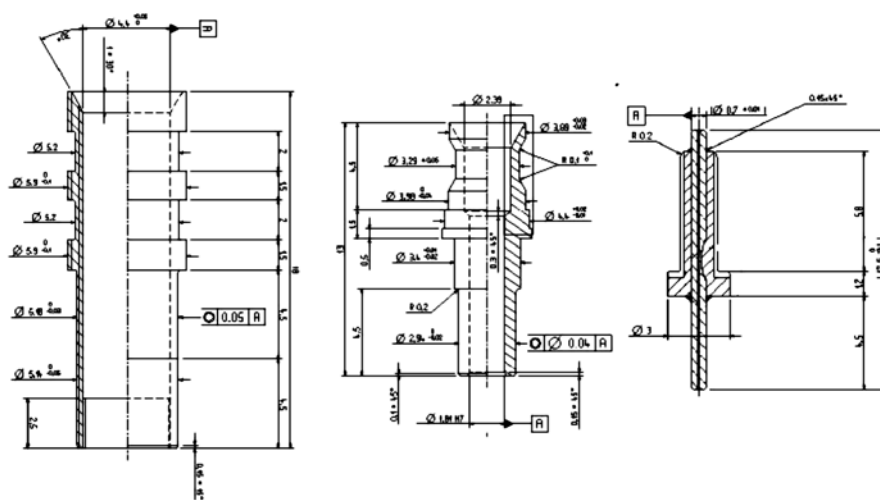


Рис. 13. Слева направо: эскизы двух пластиковых концевых втулок и пластико-металлического элемента фиксации анодной проволоки

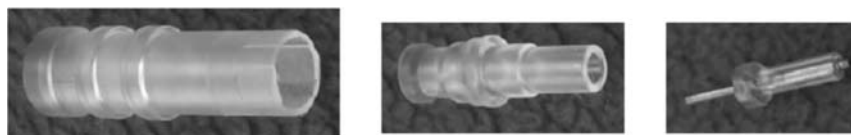


Рис. 14. Общий вид литевых элементов, эскизно представленных на рис. 13

4.5. Радиаторы переходного излучения.

С обеих сторон каждого слоя строу submodule размещались радиаторы переходного излучения, состоящие из ~ 34 слоев полипропиленовой пленки толщиной 15 мкм, с зазором между ними $\sim 0,3$ мм. Пленки имели одно отверстие диаметром 2 мм на 1 дм^2 площади для обеспечения однородного давления внутри многослойных радиаторов. Для обеспечения зазора между пленками расположены ортогональные синтетические сетки с нитями из полиамидных волокон, размер ячеек был около 8×8 мм (рис. 15). Слои радиатора сварены между собой в 96 точках, равномерно расположенных по его внешнему периметру. Там же расположены отверстия размером 3×8 мм в радиальном направлении и в направлении по окружности соответ-

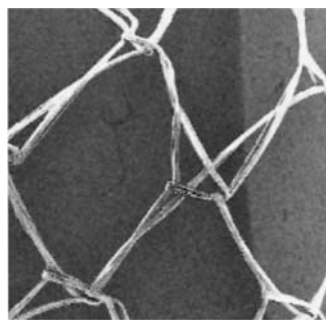


Рис. 15. Фрагмент радиатора с дистанционной сеткой из полиамидных нитей

Там же расположены отверстия размером 3×8 мм в радиальном направлении и в направлении по окружности соответ-

ственно, предназначенные для одновременного растягивания всех радиаторов субмодуля после их установки и крепления к внешнему углепластиковому кольцу пружинными фиксаторами. Наружный и внутренний диаметры радиаторов были $(1976,0_{-0,1}^{+0,1})$ и $(1284,4_{-0,1}^{+0,1})$ мм соответственно.

Радиальная точность крепежных отверстий радиатора влияет на качество сборки субмодуля. Смещение отверстий на больший радиус от номинального положения уменьшает расстояние до поверхности слоя строу, что может увеличить темновые токи (т. е. уровень собственных шумов детектора) из-за

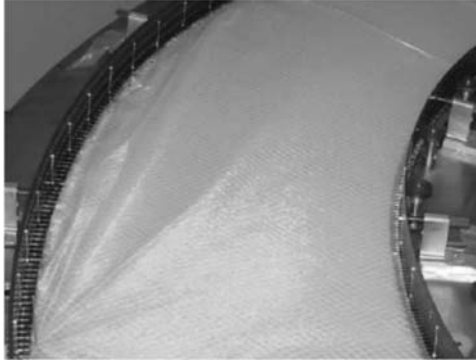


Рис. 16. Установленный в субмодуль радиатор

особенностей высоковольтного питания TRT, но несущественно влияет на фактор отбраковки. При смещении отверстий к центру от номинального положения волны на поверхности натянутых радиаторов могут изгибать строу. Опытная партия радиаторов первого субмодуля ОИЯИ имела номинальные размеры. На радиаторах следующей поставленной партии отверстия были смещены к центру, что было обнаружено после сборки кольца второго субмодуля. После одновременного растягивания всех установленных радиаторов были обнаружены локальные изгибы строу величиной до 1 мм во всех четырех слоях. Работы были остановлены до улучшения технологии изготовления радиаторов. В дальнейшем испорченный субмодуль был демонтирован и изготовлен новый на основе тех же колец. На рис. 16 показан установленный радиатор, можно видеть достаточно большие волны (радиатор с неоптимальной геометрией).

После проблемы со сборкой второго субмодуля была введена процедура проверки качества радиаторов по поступлении их в ОИЯИ. Было создано дополнительное рабочее место для тестирования, изготовлено контрольно-измерительное оборудование для измерения их толщины и сигнализации о наличии на проверяемом натянутом радиаторе волн с недопустимо большой величиной (см. рис. 16). При проверке из ~ 170 поступивших новых радиаторов шесть было забраковано.

4.6. Платы считывания. Плата считывания ЕС (ПС) обеспечивает передачу сигналов с 96 строу на электронику считывания и подачу высоковольтного напряжения на катоды, кроме того, она является механическим элементом внешнего герметичного газового объема субмодуля. ПС представляет собой сэндвич из двух каптоновых пленок толщиной по 50 мкм, расположенных между двумя стеклотекстолитовыми слоями толщиной по 0,6 мм во внешней

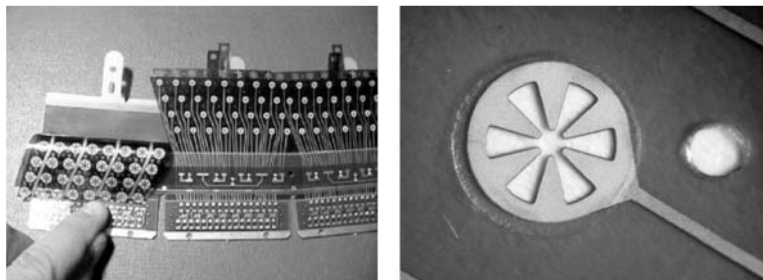


Рис. 17. Плата считывания типа В (слева); шестилепестковый контакт (справа)

ее части. Внешняя часть содержит высоковольтные разъемы, конденсаторы и предохранители. Внутренняя гибкая часть ПС состоит из трех пленочных секций, каждая из которых содержит 32 шестилепестковых контакта. Одна из пленок секций подводит высокое напряжение на катоды восьми строу четырех слоев submodule, а вторая соединена с их анодами (рис. 17).

5. ПРОЦЕДУРА СБОРКИ, СБОРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Сложность проекта TRT требовала больших усилий как при исследованиях и разработках (R&D), так и в организации массовой сборки детекторов, их тестирования и т. д. до установки их в детектор. Являясь центром ЛНС, ЦЕРН являлся и центром координации всех методических разработок, создания оборудования и инструментов, качественных компонентов, подготовки инструкций и передачи этого на участки создания детекторов. Все прошло в рамках общих работ с прямым участием представителей институтов-коллаборантов. Создание высокотехнологичного детектора требует не только необходимых экспериментальных и производственных площадей, но и подготовленного к работам такого рода персонала. Вся обработка (упаковка, армирование, сборка и тестирование) проводилась в помещениях с доступом в чистую зону в чистой спецодежде, и все манипуляции выполнялись в белых хлопчатобумажных или нейлоновых перчатках.

В соответствии с последовательным расширением объемов работ по TRT группа TRT ОИЯИ постоянно готовила дополнительные площади и персонал для этих работ.

В основу организации работ коллаборацией были заложены следующие принципы:

— поэтапная разработка всех сборочных процедур с тестированием каждой единым для всех методом;

- разработка и создание общего автоматизированного или вспомогательного сборочного оборудования практически для каждой сборочной процедуры;

- разработка и следование единым инструкциям по технологии проводимых работ, включающим последовательные операции контроля сборки и регистрации их;

- создание единой базы данных и постоянное введение полной оперативной информации;

- оперативность дискуссий, определяющих быструю реакцию на возможные по тем или иным причинам ошибки и их устранение;

- тщательное тестирование модулей как после сборки, так и после их доставки в ЦЕРН и паспортизация.

Принятие этих принципов участниками коллаборации TRT способствовало успешному выполнению работ.

Наличие разнотипных участков с большими объемами работ: армирования строу, подготовки строу и сборки submodule/модулей — предполагало не только специализацию многочисленного персонала, но и наличие различных блоков основного и вспомогательного оборудования на этих участках. К числу основного оборудования можно отнести устройство армирования на одноименном участке, устройство определения кривизны строу и проверки их герметичности на участке подготовки строу, сборочные столы нескольких типов, устройство перемещения submodule на участке сборки и др.



Рис. 18. Сборочный стол с установленными композитными кольцами

На рис. 18 показан стол для сборки submodule одновременно двумя операторами, находящимися внутри и снаружи кольцевых столов. Первые четыре железных стола были изготовлены в ОИЯИ в декабре 2000 г. и использовались в ЦЕРН, Гатчине и Дубне для разработки сборочных процедур, а затем и проведения сборки. В дальнейшем коллаборацией были изготовлены методом

литья дополнительно около 15 алюминиевых столов, четыре из которых были поставлены в ОИЯИ. Основания всех столов изготавливались в ОИЯИ.

Так как сборка субмодулей производилась последовательно на разных сборочных столах, перемещение хрупкой конструкции субмодуля и размещение его на столе в строго определенном положении являлось сложной и ответственной процедурой. Субмодуль фиксировался в восьмиугольной раме транспортного устройства (рис. 19), с возможностями поворота в любое угловое положение от вертикального до горизонтального, плавного перемещения по высоте при горизонтальном его расположении и фиксации его в любом положении при необходимости. При установке субмодуля на стол регулировалась высота и горизонтальность положения рамы над ним, после чего субмодуль плавно опускался. Устройство перемещения использовалось также для проведения на нем исследовательских или ремонтных работ на субмодуле, фиксируемом в удобном для этого положении.

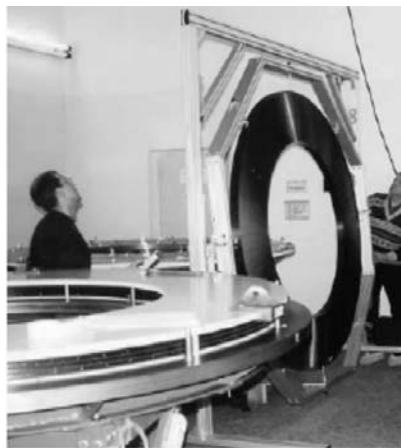


Рис. 19. Перемещение субмодуля между сборочными столами на транспортном устройстве

Контроль качества являлся основной процедурой на всех участках и при проведении всех сборочных процедур. Входной контроль осуществлялся для поступающего сборочного оборудования и сборочных элементов. При нарушении спецификации возможность использования таких элементов решалась коллаборацией, иногда по результатам оценки их качества установка проводилась по адаптированной сборочной технологии.

О большей части основного оборудования и о процедурах оперативного контроля кратко говорится при рассмотрении процессов, связанных со сборочными операциями.

6. ПРОИЗВОДСТВО ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ СУБМОДУЛЕЙ

6.1. Подготовка строу к сборке. Особенностью детекторов TRT является катодное высоковольтное напряжение и нахождение анодов под нулевым потенциалом, а особенность конструкции строу, заключающаяся в их намотке из двух идентичных лент, предполагает объединение внутреннего катода строу с их наружной проводящей поверхностью для исключения вероятности пробоев между ними. Следовательно, строу при установке их в проводящие композитные кольца должны быть электрически изолированы. Жесткие требования к

прямолинейности, газовой прочности и высокой идентичности всех детектирующих каналов определяют проведение комплекса операций по подготовке строу к установке. Для проведения этих процедур в соответствии с разработанной коллаборацией спецификацией было подготовлено помещение, изготовлена и приобретена часть требуемого оборудования и обучен персонал. С мая 2000 г. в ОИЯИ начало поступать изготовленное в ЦЕРН оборудование для этих работ, а затем и сборочные элементы.

Первая операция на этом участке заключалась в нарезке армированных строу длиной 165–170 см пневматическими ножницами в специальном кондукторе на четыре части длиной ~ 40 см. Твердосплавные ножи ножниц использовались для нарезки 10 000 строу, после чего заменялись, так как начинали заминать строу и ухудшать их цилиндричность.

Следующей операцией являлось гальваническое объединение внутренней и наружной поверхностей строу на одном ее конце токопроводящим клеем «Du Pont 4922». Для нанесения на строу однородного и минимального по толщине и высоте (~ 2 мм) слоя клей постоянно автоматически размещался. Оператор погружал строу одним концом в ванну с клеем и устанавливал ее вертикально на специальной стойке для сушки в течение 2 ч при температуре 50°C .

Для последующей изоляции проводящей поверхности строу от проводящих колец submodule на/в строу с обоих концов клеивались прецизионные поликарбонатные концевые элементы (внешняя втулка — снаружи, а внутренняя втулка с ее изоляционным внешним кольцом — внутрь и снаружи соответственно). Специализированные 4 кондуктора для 43 строу каждый позволяли оператору клеивать элементы одновременно с двух концов. Использовался эпоксидный клей TRA-BOND BB-2115, обладающий высокой текучестью. Для исключения возможного изменения внутреннего диаметра строу при полимеризации клея в них вставлялись калиброванные стальные вставки и стойка помещалась в сушильный шкаф на 2 ч при температуре 50°C . Кондукторы были откалиброваны так, что расстояние от внешней до внутренней втулки для всех строу было $(372,5^{+0,1}_{-0,2})$ мм.

Окончательная обрезка строу в требуемый размер с точностью $\pm 0,1$ мм проводилась на специальном устройстве, при этом срезалась часть внешней втулки. Вращающийся дисковый нож из высокопрочного сплава и вертикально установленная на калиброванном стержне с пазом для входа ножа строу вращались в противоположных направлениях. Нож охлаждался обдувом воздуха, автоматически отсасывались крошки с точки обрезки. Для всех процедур применялись только безмасляные компрессоры.

Каждая сборочная процедура заканчивалась проверкой качества и вводом ее результатов в базу данных. На участке проводилось тестирование на:

— соответствие резистивности катода строу величине 300 Ом после нарезки их в размер;

— соответствие электрического контакта между внутренней и внешней поверхностями строу величине ≤ 10 кОм после создания контакта и повторно после вклейки концевых втулок;

— герметичность (проверкой соответствия газовой течи готовой строу величине $\leq 0,1$ мбар/мин/бар);

— кривизну и цилиндричность строу (при этом проводилась сортировка их по категориям).

Все не прошедшие какой-либо тест строу отбраковывались, при упаковке по категориям для последующей с ними работы проводилась дополнительно визуальная проверка строу.

Всего на участок поступила 33 301 длинная строу, из которых 7,95 % было изъято для тестирования. Производственный брак составил около 10,2 %, из них вклад теста на кривизну составлял $\sim 6,6$ %, окончательного визуального контроля ~ 2 % и вклеивания концевых элементов ~ 1 %.

6.2. Предварительная сборка четырехслойного субмодуля. Сборка детектора производилась на кольцевых металлических столах четырех типов, специализированных для выполнения тех или иных сборочных операций. Неплоскостность столов и горизонтальность их установки были $\leq 0,1$ мм.

Предварительная сборка четырехслойных субмодулей заключалась в установке строу и радиаторов в углепластиковые кольца, проверке общей герметичности и передаче колец на участок дальнейшей их сборки [21].

Для определения взаимного расположения внутреннего и внешнего колец на столе предварительно была проведена его разметка и маркировка относительно фиксированного положения первой (референсной) строу. Для точного размещения колец на столе и сохранения ими цилиндричности использовались по 16 стоек для внутреннего и внешнего колец, прецизионно выставленных и жестко укрепленных на столе. Устанавливаемые кольца штифтовались к стойкам через отверстия для строу верхнего слоя и отверстия в стойках.

Для последующего «заземления» проводящих колец в имеющиеся в них отверстия токопроводящим клеем «Du Pont 4922» клеивалось 48 заземляющих элементов во внутреннее кольцо и 96 — во внешнее. Для их надежной долговременной фиксации и герметичности место вклейки покрывалось затем эпоксидным клеем TRA-BOND BB-2115. Электрическое сопротивление между двумя соседними проволочками было не более 0,2 Ом для внутреннего кольца и меньше 0,15 Ом для наружных колец. Размеры миниатюрных заземляющих элементов из проволоки с втулкой различались для колец разного типа. Качество установки заземляющих элементов контролировалось оператором. На рис. 20 показаны моменты разных операций при предварительной сборке субмодуля, а на рис. 21 представлен субмодуль после его сборки.

Началом установки строу в кольца являлась окончательная проверка правильности их установки на столе. Для этого устанавливались все строу ближайшего к столу слоя и проверялась правильность установки введением всех



Рис. 20. Слева направо: установка пинов заземления внешнего кольца, установка строу в кольца и вклейка строу пневмодозатором

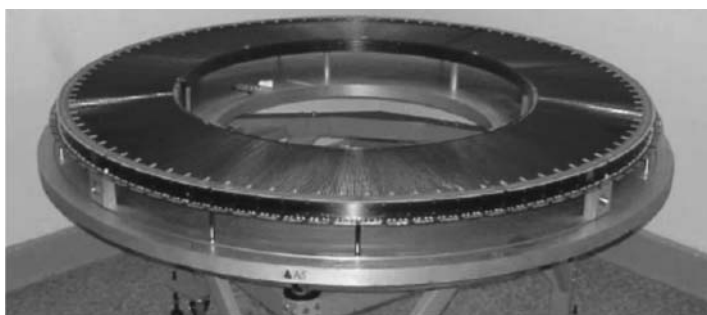


Рис. 21. Общий вид субмодуля после его сборки

штифтов нижнего слоя, затем в специальные отверстия стола устанавливались пластиковые стержни поддержки радиаторов. После визуального контроля строу два оператора пневмоэлектрическими дозаторами приклеивали их к кольцам эпоксидным клеем TRA-BOND BB-2115. Клей полностью полимеризовался за 24 ч, после чего производилось автоматизированное измерение кривизны каждого слоя строу и проверка отсутствия гальванического соединения их с соседними строу или кольцами. При кривизне любой строу более 200 мкм она заменялась.

После окончательной проверки вклеенных строу первого слоя укладывался радиатор с 96 отверстиями по его внешнему периметру, предназначенными для крепления его в субмодуле. Через каждые 8 отверстий устанавливались растягивающие штифты. Затем начиналась установка следующего слоя строу. Завершением предварительной сборки субмодуля являлся тест на его герметичность, при котором субмодуль располагался на специализированном столе и герметично закрывался крышкой. В течение 10–12 ч измерялось

изменение дифференциального давления аргона в герметичном объеме вокруг строу, которое при заполнении превышало атмосферное на 20 мбар. Давление внутри строу соответствовало атмосферному. Данные с датчиков температуры и давления записывались в ПК каждые 30 с, что позволяло затем определить величину течи с коррекцией на изменения атмосферного давления и локальные температурные изменения. При величине течи более 1 мбар/мин/бар проводился ее поиск и устранение на столе, при необходимости субмодуль вывешивался на устройство перемещения в удобном для поиска течи и последующего ее устранения положении. Практически в каждом субмодуле было необходимо устранить небольшую течь, что занимало время от нескольких суток (в основном) до недель.

6.3. Сборка четырехслойных субмодулей. Одновременно на двух идентичных столах проводилась окончательная сборка двух субмодулей со сдвигом в выполняемых операциях. Сборка заключалась в установке на субмодуль плат считывания информации, вводе анодных проволок в строу, создании общего внешнего и внутреннего газовых объемов.

Началом этого сборочного этапа был монтаж на внешнем радиусе субмодуля замкнутого кольца из тонкослойных ПС (рис. 22). Это проводилось на столах, снабженных вакуумной системой откачки. Платы выкладывались на столе, фиксировались штифтами, после включения вакуумирования равномерно прижимались к столу. Субмодуль с помощью транспортного устройства позиционировался над кольцом ПС на расстоянии (170 ± 100) мкм над ними, затем позиция фиксировалась и субмодуль убирался от стола.

На стол устанавливалась автоматическая тележка с дозатором клея, и на ПС по окружности с радиусом внешнего кольца субмодуля (В2) наносилась кольцевая дорожка клея «Araldite AY103». Одновременно на торец этого кольца также наносился тонкий слой клея вручную. Затем субмодуль переворачивался стороной склейки вниз и возвращался в зафиксированную ранее позицию над платами



Рис. 22. Начало второго этапа сборки

для полимеризации клеевого слоя между торцом внешнего кольца и ПС. Через 17–24 ч вакуумный насос выключался. Перед склеиванием поверхности очищались метиленхлоридом. После полимеризации проводился визуальный контроль склейки и удаление излишков клея.

Высоковольтное напряжение подавалось на катоды строу прижимом гибких контактов ПС (рис. 17) к внутренней токопроводящей поверхности строу вставляемыми в них пластмассовыми втулками, являющимися также элементами поддержки и центрирования анодов. После установки втулок можно было подавать на катоды высоковольтное напряжение. При подаче напряжения 2,1 кВ посекторно (сектор — по 8 строу в каждом слое) измерялась величина токов стекания и обеспечивалась их величина менее 50 нА/сектор, главным образом устранением загрязнений, избытков клея и т. д. При этом возникали проблемы при влажности воздуха $\geq 45\%$, решаемые принудительной сушкой исследуемых участков.

Установка проволок в строу проводилась на том же столе пневматическим устройством, перемещающимся вокруг субмодуля (рис. 23). Анодная проволока диаметром 30 мкм входила в строу через отверстие во втулке, фиксирующей высоковольтные контакты, и протягивалась через строу потоком азота, сматываясь с подающей катушки. Находящиеся с разных сторон строу



Рис. 23. Установка анодных проволок в строу

операторы заправляли концы проволоки в обжимные медные пины (рис. 24), пневматическим инструментом фиксировали в нем один конец, включали устройства натяжения (65 г) и фиксировали второй конец проволоки (рис. 25). Установка анодов в submodule начиналась с нижнего слоя строу и проходила при оперативном контроле величин их натяжения. По завершении установки всех анодных проволок слоя повторялась проверка их натяжения с заменой проволок в случаях натяжения более 80 или менее 55 г. Проводилось также измерение токов стекания при напряжении 1,8 кВ с целью замены проволок, плохо зажатых в пинах или дающих большие токи утечки. В среднем замене подвергалось ~ 15 проволок/слой. Максимальное число замен для одного из submodule составило 149 проволок из-за качества проволоки используемой катушки.

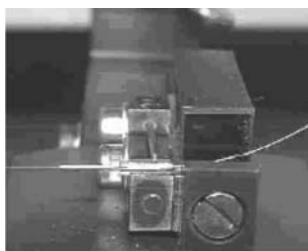


Рис. 24. Ввод проволоки в пин для ее фиксации



Рис. 25. Фиксация анодной проволоки

После установки всех анодов submodule на кольцо из ПС аналогичным образом приклеивалось третье композитное кольцо с большим радиусом (B3). Затем на торцы этих двух внешних колец наклеивались стеклотекстолитовые секторные платы, образующие герметичный внешний газовый объем submodule.

Создание герметичного газового объема на внутреннем радиусе submodule проводилось на столе, специализированном для клеивания на торцы внутреннего кольца (B1) полиимидных сегментных картеров клеем «Araldite AY103», после чего устанавливались все газовые вводы. В завершение сборки четырехслойного submodule проводилось его комплексное окончательное тестирование. На этом же столе в дальнейшем проводилось объединение четырехслойных submodule в восьмислойные модули.

7. СБОРКА ВОСЬМИСЛОЙНЫХ МОДУЛЕЙ

С целью повышения механической жесткости проводилось объединение двух submodule в восьмислойный модуль. При этом устанавливались элементы жидкостного и газового охлаждения, высоковольтной и газовой систем

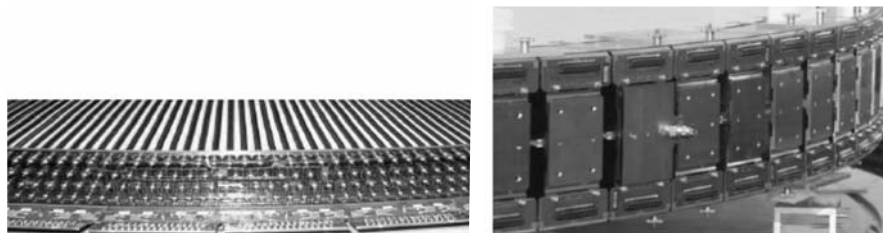


Рис. 26. Фрагменты submodule (слева) и модуля (справа)

и электромагнитного экранирования. Разработанная схема охлаждения детектора является общей для двух submodule и требует создания общего герметичного газового объема вокруг строу. Два submodule соединялись сторонами, не содержащими плат считывания, и стягивались между собой калиброванными вольфрамовыми стержнями длиной 200 мм через отверстия в ПС обоих submodule, уплотнением служил резиновый жгут диаметром 1,2 мм. Соответствующие газовые входы одного submodule и выходы второго герметично соединялись друг с другом. Между ПС submodule устанавливались прикрепляемые к ним алюминиевые планки поддержки радиатора жидкостного охлаждения. Для экранирования submodule и организации общей системы их охлаждения обдувом CO_2 на обе внешние стороны модуля устанавливались полиимидные экраны толщиной 50 мкм со слоем меди толщиной 500 Å. Внутренняя и внешняя боковые поверхности модуля также полностью покрывались экранами, объединенными с торцевыми. На металлизированную каптоновую пленку внутренней боковой поверхности припаивались 48 заземляющих проволочек первого кольца и 96 проволочек второго, 96 заземляющих проволочек третьего кольца распаивались на ПС. После объединения submodule на планки поддержки системы охлаждения устанавливались трехконтактные высоковольтные разъемы типа LEMO для подачи высокого напряжения на сектора ПС по 32 строу каждый. На рис. 26 представлены фрагменты четырехслойного submodule и восьмислойного модуля (до закрытия его экранами).

8. ТЕСТИРОВАНИЕ ВОСЬМИСЛОЙНЫХ МОДУЛЕЙ

Основными оперативно контролируемыми параметрами при сборке детектора были прямолинейность строу и их герметичность. Последнее обеспечивалось отбраковкой небольшого количества дефектных строу и устранением течей в собранных submodule, причиной которых было главным образом повреждение строу при установке радиаторов. Восстановление гер-

метичности строу в этих случаях проводилось при тесте на герметичность субмодулей.

Прямолинейность строу обеспечивалась при подготовке строу к установке их в субмодуль. В табл.1 приведены итоговые результаты тестирования; видно, что 99 % строу были пригодны для установки их в детектор.

Таблица 1. Прямолинейность 113851 строу, подготовленных к установке в ЕС TRT

Кривизна строу, мкм	< 100	100–200	200–300	> 300
Количество строу/%	66722/58,6	40340/35,4	5603/4,9	1186/1,1

Для контроля за возможным эффектом старения строу перед началом тестирования TRT-модулей было проведено тестирование газовой системы с помощью МС. Для этого две его строу в течение 580 ч локально облучались источниками γ -квантов ^{55}Fe . Частота срабатываний первой строу составляла 5,5 кГц/мм при длине облучения вдоль строу ~ 3 мм, второй — 100 Гц/мм при длине облучения ~ 8 мм. По изменению во времени отношения средних амплитуд сигналов с этих строу A/A_r определялось наличие старения строу, где A — амплитуда сигналов первой строу и A_r — второй строу. Рис.27 показывает отсутствие эффекта старения. Действительно, сравнение результатов предварительного и окончательного сканирования первой строу, приведенных на рис. 28, показало пренебрежимое ($\sim 2,2\%$) уменьшение амплитуд сигналов в зоне облучения.

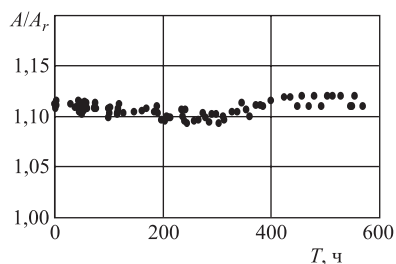


Рис. 27. Отношение амплитуд сигналов облучаемой и практически необлучаемой строу

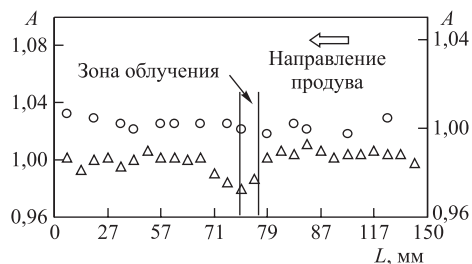


Рис. 28. Амплитуда вдоль строу до/после облучения (верхняя/нижняя кривая с правой/левой осью ординат соответственно)

В дополнение к оперативному контролю в процессе сборки субмодулей и объединения их в модули перед отправкой в ЦЕРН они проходили полную проверку на станции тестирования, а по прибытии в ЦЕРН тестирование повторялось и проводилась паспортизация модулей. Завершением работ по каждому модулю в Дубне была проверка его геометрических размеров и веса.

Таблица 2. Основные результаты тестирования субмодулей и модулей В

Параметры	Спецификация	Результаты тестов
Субмодули		
Газовые потери, мбар/мин/бар:		
без анодов	1,0	0,4
с анодами	1,0	0,2
Токи стеканий, нА:		
без анодов	50/32 строу, 2,5 кВ	< 10
аноды (воздух)	0/32 строу, 1,8 кВ	< 30
аноды (СО ₂)	50/32 строу, 1,8 кВ	< 45
Натяжение анода, г	55 < T < 80	68
Габариты, мм:		
толщина	56,5 ± 0,2	56,3
минимальный радиус	623,75	624,5
Отклонение анода, мкм	< 300	< 200
Модули В		
Газовые потери, мбар/мин/бар	1,0	< 0,2
Потери СО ₂ , мбар/мин	1 для 5 мбар избыточного давления	< 0,5
Допустимый ток при 1480 В	Ток ≤ 150 нА/192 строу, 15 сут Аг/СО ₂ (70/30 %)	+
Допустимый ток при 1550 В	Ток ≤ 150 нА/192 строу, 7 сут Аг/СО ₂ (70/30 %)	+
Натяжение анода, г	55 < T < 80	68
Ослабление натяжения анода, г	< 15	< 3
Отклонение анода, мкм	< 400	< 200
Габариты, мм:		
толщина	114,0 ± 0,4	113,8
минимальный радиус	623,35	623,9

Более тщательно геометрические размеры и окончательный вес модуля определялись в ЦЕРН. В табл. 2 приведены основные результаты тестирования.

Число неработоспособных каналов модулей В составило 0,2 % при спецификации этой величины 1 %. Причинами отключения были в разной степени следующие: неоднородность газового усиления более 9 %, обрыв анодных проволок, натяжение анодных проволок вне диапазона 55–80 г, плохая передача сигналов с анода строу к считывающей электронике по многослойным каптоновым платам и др.

Таким образом, результаты многочисленных оперативных тестов обеспечили высокое качество изготовленных в ЛФЧ ОИЯИ кольцевых модулей TRT ATLAS, что подтвердило итоговое тестирование.

9. ТРАНСПОРТИРОВКА

Для понимания проблем транспортировки готовых детекторов из Дубны в ЦЕРН в 2000 г. были созданы рабочие макеты плоскостей длиной 940 мм и шириной 185 мм из строу диаметром 6,18 мм. Вибрационные испытания на электрогидравлическом стенде PL-160N («Schenck», ФРГ) были проведены в ООО «Радуга-5» (Г. А. Вершинин, Дубна). Для съема информации использовались акселерометры типа 4371 с усилителями СА-4 («Брюль и Кьер», Дания) и специализированные компьютерные системы измерений и анализа вибраций RAND, VIEW, FRACS. Определялись динамические характеристики при испытательных режимах, соответствующих автомобильной транспортировке вертикально расположенных детекторов на базовом участке Дубна–Брест, при длительности участка до 37 000 км, при скорости 60–80 км/ч. Испытания показали, что собственная частота плоскости была 17 и 54 Гц, средняя амплитуда изгибных колебаний составляла 1,8 мм и максимальные механические напряжения $\sigma \approx 1,2$ Н/мм².

С учетом результатов испытаний была разработана транспортная тара и метод упаковки детекторов TRT (Ю. Л. Злобин), успешно использованные для автомобильной транспортировки детекторов в ЦЕРН.

10. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ TRT

Считывание данных с ATLAS TRT требует около 30 000 линий передачи цифровых данных со скоростью 40 Мбит/с. Сигналы с детектора в стандарте LVDS поступают на промежуточную панель PP2, где происходит замена кабелей одного типа на кабели другого типа для передачи данных на более длинные расстояния гигабитными волоконно-оптическими линиями. Для передачи сигналов с детектора на PP2 был выбран тонкий коаксиальный кабель на основе скрученных пар (STP) типа 36 AWG. Одним из аргументов использования коаксиального кабеля была его низкая стоимость в сравнении с оптоволоконными линиями (в ~ 3 раза ниже) [22].

Кабель представляет собой проволочную пару диаметром 0,1 мм, экранированную Al-лентой с расположенными под ней для уменьшения резистивности экрана четырем медными проволоками диаметром 0,1 мм. От барреля TRT данные передавались жгутами сразу на панель PP2. От ЕС жгуты одного типа передавали данные до промежуточной панели PP1, а жгуты другого

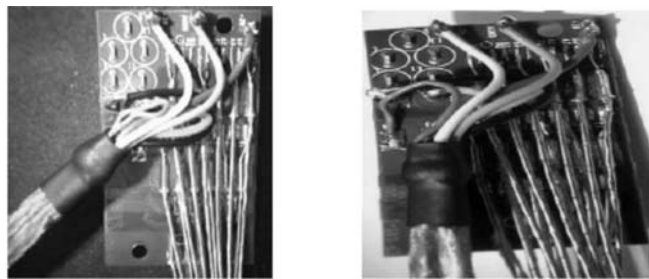


Рис. 29. Образцы распайки STP и низковольтных кабелей на переходные платы

типа — от PP1 до PP2. По конструкции жгуты подразделялись на несимметричные левые и правые, практически все жгуты содержали кабели различной длины при точности длин не хуже ± 15 мм. Витые пары паялись на разъемы или на платы, показанные на рис. 29.

Каждый STP-субжгут содержал дополнительно разъем для данных температурного контроля с STP-кабелями и с несколькими (от 3 до 20) температурными датчиками.

Низковольтное напряжение для установленной на детекторе электроники подается с промежуточной панели PP2 кабелями (НВ) длиной до 15 м с сечением провода от 0,6 до 2,5 мм².

В качестве высоковольтного (ВВ) использовался тонкий коаксиальный кабель с наружным диаметром 1,05 мм, выдерживающий напряжение 2,12 кВ, что достаточно для детектора с рабочим напряжением 1,6 кВ. Высоковольтные жгуты были изготовлены в Кракове (Польша).

По просьбе коллаборации в 2004 г. в ОИЯИ была образована группа для создания кабельной системы передачи данных и низковольтных кабелей TRT. Практически все субжгуты системы имели индивидуальные схемы их распайки. Сложность трассировки жгутов с кабелями различной длины при их высокой точности, минимальные размеры плат и проблемность крепления к ним распаиваемых STP- и НВ-кабелей, сложность паяк и большой процент замыканий жила–экран при использовании последовательно операций обжима и пайки требовали оптимизации технологии работ, что было успешно выполнено в Дубне. Были созданы столы длиной от нескольких до 17 метров, схемы трассировок, разработаны и изготовлены обжимные устройства и предложен низкотемпературный режим пайки отечественными материалами, полностью исключающий вероятность замыканий.

Разработанная технология, обученный в ОИЯИ персонал позволили изготовить всю кабельную систему TRT в требуемые сроки. Около 600 км STP-кабеля поступило в ОИЯИ в 2004–2005 гг. Первые 160 жгутов для одного

Таблица 3. Объем кабелей считывания данных, изготовленных для TRT ATLAS

Кабель	ЕС–PP1	PP1–PP2	Баррель–PP2	Итого	
				Жгут STP, шт.	1216*
Жгут STP, шт.	66	965	68	Жгут STP, шт.	1216*
Субжгут, шт.:	66 × 5	965	204	Субжгут, шт.	1499
STP, шт./субжгут	68	30	104	STP, шт.	54 654
длина, м/субжгут	0,4–2,6	7,6–11,3	7–15	длина, м	~ 580 000
платы, шт./жгут	4	—	8	платы, шт.	~ 1900
разъемы, шт./субжгут	3	2	3	разъемы, шт.	~ 3500

*С учетом 117 резервных жгутов.

полного модуля ЕС были отправлены в ЦЕРН в августе 2005 г. Весь объем работ был завершен в начале 2006 г.

Высоковольтные кабели и STP с термодатчиками производились в Кракове, первые отправлялись в ЦЕРН, а вторые — в Дубну, где перед отправкой в ЦЕРН объединялись с собранными STP/НВ-субжгутами. Все жгуты после изготовления проверялись в ОИЯИ, проходили проверку в ЦЕРН, монтировались совместно с другими сервисными элементами на поддонах (рис. 30, справа) и устанавливались в детектор. В табл. 3 показан объем работ по изготовлению кабелей считывания данных без иллюстрации их сложности и без учета низковольтных жгутов.

11. СБОРКА И УСТАНОВКА TRT ВО ВНУТРЕННИЙ ДЕТЕКТОР

По обеим сторонам точки столкновения расположены идентичные детекторы ЕС TRT, содержащие блоки из 12 восьмислойных модулей А и 8 восьмислойных модулей В. Сборка детекторов состоит из последовательных операций по сборке блоков и объединения их в детектор TRT. При сборке блока между модулями В устанавливаются теплообменники для снятия нагрева охлаждающего газа (СО₂), проходящего через весь блок. По концам блока герметично устанавливаются пластиковые мембраны с внутренним и наружным диаметрами 1246 и 2100 мм соответственно, объединенные между собой по внутреннему радиусу цилиндром из стеклотекстолита толщиной 1 мм. Так как наружная цилиндрическая поверхность блока при его сборке герметична, образуется герметичный объем для газового охлаждения блока. Модули блока соединяются между собой 92 стальными стержнями диаметром 2,5 мм, проходящими через отверстия в ПС и мембранах и натянутых пружинами с силой 22 кгс.

Блоки собираются в вертикальном положении на специальном стапеле с прецизионными сборочными отверстиями. На рис. 30 показан момент окончания объединения модулей В и поворот их в горизонтальное положение для объединения с блоком модулей А. Размещенные в специализированной тележке два разноименных блока точно позиционируются, монтируются элементы газового охлаждения и электромагнитного экрана по внутреннему радиусу блоков, монтируются также 5 поддерживающих колец для установки 32 поддонов с кабельными жгутами, трубками охлаждения и т. д. Кабельные жгуты со считывающей электроники выходят на панель РР1, туда же выводятся соединительные разъемы сервисных систем. После комплексного тестирования посекторно устанавливаются внешние панели электромагнитного экрана, выполненные из бериллиевой бронзы толщиной 1 мм. Рис. 31 показывает общий вид ЕС TRT и их фрагмент с сервисными панелями.

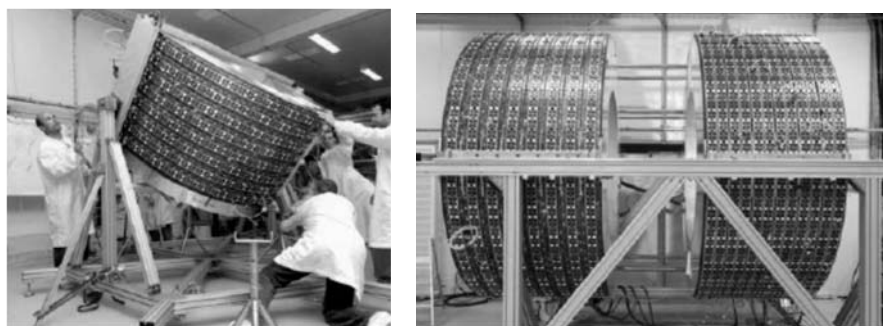


Рис. 30. Сборка блока модулей В (слева) и подготовка к объединению блоков модулей В и А (справа)



Рис. 31. Слева — собранный детектор ЕС TRT. Справа — фрагмент детектора с сервисными панелями

Внутренний детектор установки ATLAS занимает внутреннее пространство соленоидального магнита и включает в себя три детектора, расположенных слоями вокруг оси пучков. Каждый детектор имеет цилиндрическую структуру (баррель) вокруг точки столкновения пучков и дисковую (EC) по ее торцам. Первыми на пути рожденных частиц стоят пиксельные кремниевые детекторы (Pixel), затем расположены два трекера: кремниевый стриповый трекер (SCT) и TRT. В соответствии с внутренней структурой детекторов и их расположением весь внутренний детектор был разбит на четыре транспортных модуля: Pixel, Barrel, End Cap A и End Cap C. Центральный модуль (Pixel) имеет диаметр около 0,5 м и длину более 7 м, так как включает в себя центральный участок пучковой трубы. Три других модуля состоят из детекторов SCT и TRT и имеют приблизительно одинаковые транспортные габариты (чуть больше 2 м в диаметре и около 3 м длиной) и вес (около 2 т). Для монтажа их в единый детектор были спроектированы и изготовлены три транспортных тележки, используемые от начала сборки детекторов в транспортные модули до момента их установки на канал. Основными требованиями к ним были: удовлетворяющие размерам проема в шахту габариты (2,4 м в ширину и 2,8 м в длину) и минимальная деформация модулей в течение всех транспортных операций.

Конструктивно все тележки были выполнены идентично — жесткое основание на четырех поворотных колесах с пружинами и ажурная пространственная ферма, несущая опорные рельсы для транспортных модулей. Основания были выполнены из массивного профиля, но для минимизации деформации конструкции колеса располагались не по углам основания, а на осях симметрии, что позволило избежать скручивания транспортных модулей при потере одним из колес контакта с полом. Правильность выбранной схемы подтвердилась как предварительной проверкой с помощью программы ANSYS, так и при испытаниях тележек. Тележка для барреля отличалась от двух других симметричным расположением консолей под опорные рельсы (рис. 32).

Как упоминалось выше, тележки использовались для объединения трех транспортных модулей. Комплекс для объединения включал тележку, консольную опору для детектора SCT, два направляющих рельса с двух сторон от нее, три опорных катка для перемещения тележки по рельсам и измерительный шаблон. Объединение состояло из нескольких этапов. Сначала блок детектора SCT, опиравшийся на консольную опору, выставлялся параллельно направляющим рельсам с помощью измерительного шаблона с закрепленными на нем тремя цифровыми штангенциркулями. После установки транспортной тележки с TRT на направляющие рельсы юстировочными винтами обеспечивалось совпадение осей модулей TRT и SCT, после чего тележка с модулем TRT надвигалась на модуль SCT. После геодезической юстировки модулей в осевом и продольном положении они закреплялись вместе, консольная опора опускалась, тележка с транспортным модулем по рельсам

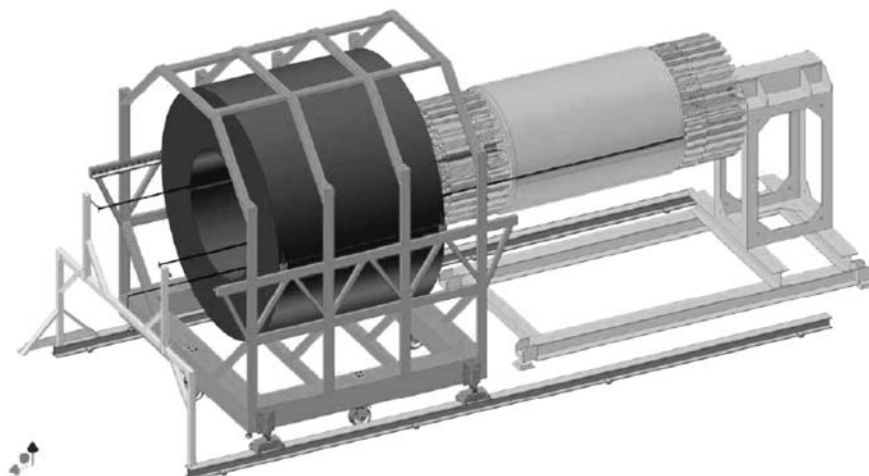


Рис. 32. Объединение детекторов SCT и TRT в транспортный модуль Bartel

отъезжала назад и опускалась на свои колеса. Рельсы с катками использовались позже для вывоза тележки из здания и в шахте перед соленоидом.

Перед перемещением транспортного модуля на место для его защиты на тележке закрепляли панели. Все транспортные операции проводились с небольшой скоростью для исключения возможных нежелательных перегрузок детекторов — вибраций и толчков. Сначала тележку выкатывали на своих колесах из сборочного помещения, ставили на рельсы и по ним выкатывали на улицу (рис. 33). Потом на тележке закреплялась специально изготовленная грузоподъемная траверса, и автомобильный кран переносил ее в здание грузовых шахт установки ATLAS (рис. 34), где мостовой кран опускал тележку в шахту на рабочий уровень (рис. 35).



Рис. 33. Установка защиты детектора перед транспортировкой



Рис. 34. Перенос детектора к входу в шахту

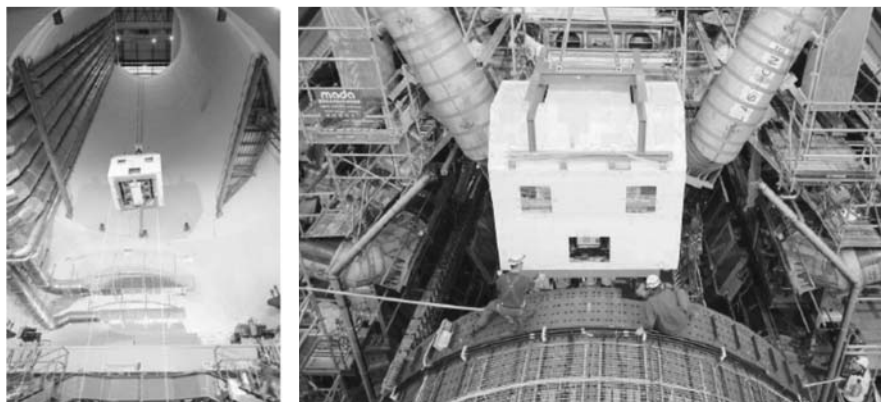


Рис. 35. Ввод ЕС в шахту

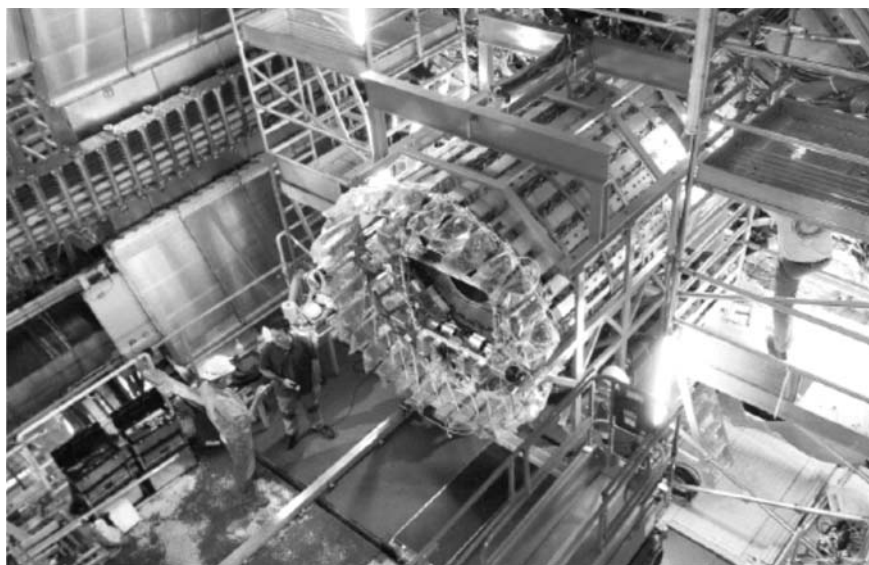


Рис. 36. Установка ЕС во внутренний детектор

Установку внутреннего детектора проводили при выдвинутых максимально наружу концевых элементах калориметра. На образовавшемся пространстве перед криостатом временно устанавливался помост с рельсами и поворотной платформой на них. На эту платформу мостовой кран ставил транспортную тележку. На платформе ее при необходимости разворачивали на 90° , подвозили к криостату и выставляли так, чтобы рельсы тележки являлись про-

должением рельсов криостата. Тележка соединялась с криостатом рельсами-перемычками, и транспортный модуль вдвигался специальным устройством на свое место в криостат (рис. 36). Установка транспортных модулей проводилась в следующей последовательности: Barrel (со стороны А по оси пучка), End Cap А и End Cap С (каждый со своей стороны) и Pixel (со стороны С).

Благодарности. Авторы считают своим долгом выразить благодарность за поддержку работ по созданию TRT-модулей типа В дирекциям ОИЯИ и ЛФЧ, коллегам из российских институтов — МИФИ, НИИЯФ МГУ, ПИЯФ, ФИАН, а также многочисленным зарубежным участникам коллаборации. Авторы глубоко благодарны всем участникам проводимых в ОИЯИ работ как при создании модулей, так и при проведении предварительных исследований и разработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Armstrong W. W. et al.* ATLAS. Technical Proposal. CERN/LHC/94-43. 1994.
2. *ATLAS Collab.* ATLAS Inner Detector Technical Design Report. V.2. CERN/CHCC/97-17. 1997.
3. *Price M. J.* CERN Technical Note TA1/96-04. 1996.
4. *Vychkov V. N. et al.* JINR Commun. E13-98-209. Dubna, 1998.
5. *Vychkov V. N. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 325. P. 158–160.
6. *Гладких С. Н. и др.* Сообщ. ОИЯИ P13-2001-275. Дубна, 2001.
7. *Hauviller C. et al.* JINR, E14-98-245. Dubna, 1998; Internal Note ATL-INDET-98-218.
8. *Голиков В. В. и др.* Сообщ. ОИЯИ P13-96-403. Дубна, 1996.
9. *Sconbacher H. et al.* CERN 96-05. Geneva, 1996.
10. *Астабатьян Р. А. и др.* ОИЯИ, P13-96-472. Дубна, 1996.
11. *Семенов Б. Ю. и др.* ОИЯИ, P13-98-264. Дубна, 1998.
12. *Астабатьян Р. А. и др.* ОИЯИ, P13-98-270. Дубна, 1998.
13. *Berntsen V., Price M. J.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 364. P. 103.
14. *Голунов А. О. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2003. № 2[117]. С. 44–51.
15. *Golunov A. O. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 524. P. 142.
16. *Гусаков Ю. В. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 3(132). С. 111–117.
17. *Ash W. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1987. V. 261. P. 399.
18. *Kindziora C. et al.* FERMILAB-Pub-02/241-E. 2002.
19. *Howell B. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1990. V. 289. P. 185.
20. *Avery R. E. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-40. 1993. P. 578.
21. *Богуславский И. В. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 3(132). С. 103–110.
22. *Blampey H. et al.* // 11th Workshop on Electronics for LHC and Future Experiments. Heidelberg, 2005.