

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-472

P13-96-472

Р.А.Астабатьян, В.Н.Бычков, Р.Гебарт¹, Ю.Л.Злобин,
Г.Д.Кекелидзе, С.П.Лобастов, В.М.Лысан, К.Мено¹,
Е.А.Новиков, В.Д.Пешехонов, А.В.Рябов, Л.М.Смирнов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ
ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ —
ТРЕКЕРА ПРЯМОГО НАПРАВЛЕНИЯ
УСТАНОВКИ ATLAS

¹ЦЕРН, Женева

1996

1. ВВЕДЕНИЕ

Регистрация частиц детектором переходного излучения - трекером (TRT) установки ATLAS LHC будет сопровождаться тепловыделением в рабочем газе тонкопленочных проволочных счетчиков (строу), являющихся дискретными элементами модулей детектора.

В кольцевых модулях прямого направления тепловыделение в каждой строу будет достигать величины 9 мВт [1]. При этом в модулях с наиболее плотным размещением строу (модули типа С) общее тепловыделение будет около 100 Вт. Распределение нагрева строу по их длине неравномерно, тепловыделение уменьшается по мере удаления от оси пучков. Требования постоянства величины скорости дрейфа и коэффициента газового усиления как по всей длине каждой строу, так и по всему объему TRT накладывают ограничения на максимальный температурный разброс по единичному модулю детектора в пределах 10°C [2].

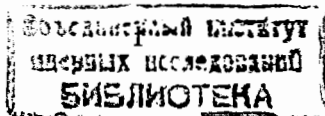
Особенностью температурного режима внутри TRT является, с одной стороны, низкая величина скорости продува строу рабочей газовой смесью на основе ксенона, с другой стороны, крайне низкая теплопроводность собственного вещества детектора, представляющего собой разделенные пленочными радиаторами плоскости строу.

Целью представленной работы являлась проверка принципа газового охлаждения TRT с помощью полномасштабного прототипа 42° сектора модуля детектора. Для этого был изготовлен секторный прототип модуля типа С, разработаны элементы для имитации радиационного нагрева детектора, создано необходимое оборудование и программное обеспечение.

2. СЕКТОРНЫЙ ПРОТОТИП

2.1. Конструкция прототипа

Для проведения термометрических измерений был создан полномасштабный прототип кольцевого модуля детектора в виде 42° сектора. Сектор содержал 16 плоскостей строу, разделенных радиаторами переходного излучения, каждый из которых представлял собой набор из 10 удаленных на расстояние 0,2 мм пленок толщиной 0,02 мм. Полная толщина каждого радиатора — 2 мм. Каждое строу полной длиной 575 мм было герметично



установлено в радиальном направлении между двумя кольцевыми с радиусами 480 и 1030 мм сегментами (внутренним и наружным, соответственно). Расстояние между плоскостями строу было 8 мм, всего сектор содержал 1100 строу. В отличие от модуля детектора кольцевые сегменты шириной 134 мм были выполнены из стеклотекстолита, а точность позиционирования каждой строу была на порядок хуже и доходила до 0,2 мм.

Для обеспечения жесткости конструкции и герметичности установки радиаторов по их боковым краям кольцевые сегменты были склеены между собой текстолитовыми планками толщиной 2 мм (рис. 1а). Введение вещества по краям сектора привело в дальнейшем к краевым эффектам по теплопередаче и потребовало их компенсации.

Установленный в стеклотекстолитовом корпусе сектор спереди и сзади был герметично закрыт крышками из пенополиуретана, "имитирующими" соседние модули. Зазоры между крышками и внешними для плоскостей строу пленочными радиаторами использовались для входа и выхода охлаждающего газа.

2.2. Схема газового охлаждения

Предполагается использовать последовательно-параллельную схему газового охлаждения TRT переднего направления. Охлаждающий газ с внешней стороны детектора подается к первому из последовательно охлаждаемых модулей детектора. Через систему отверстий, равномерно распределенных по внешнему периметру, газ поступает в зазор между внешним для этого модуля радиатором и экраном из эквивалентного радиаторам по плотности и теплопередаче вещества, установленному между соседними модулями. Через этот зазор охлаждающий газ передается для охлаждения модуля со стороны его внутреннего радиуса, где происходит максимальное тепловыделение. Через канал переменного сечения в Z-направлении (направление пучка), формируемого установкой радиаторов разной ширины, газ равномерно распределяется на все межрадиаторные зазоры и охлаждает строу с их наружной стороны, протекая радиально в направлении с внутреннего радиуса детектора к внешнему. Нагретый газ передается в следующий, внешний для этого модуля зазор, где охлаждается и по которому передается для охлаждения следующего модуля детектора. Для охлаждения газа используется

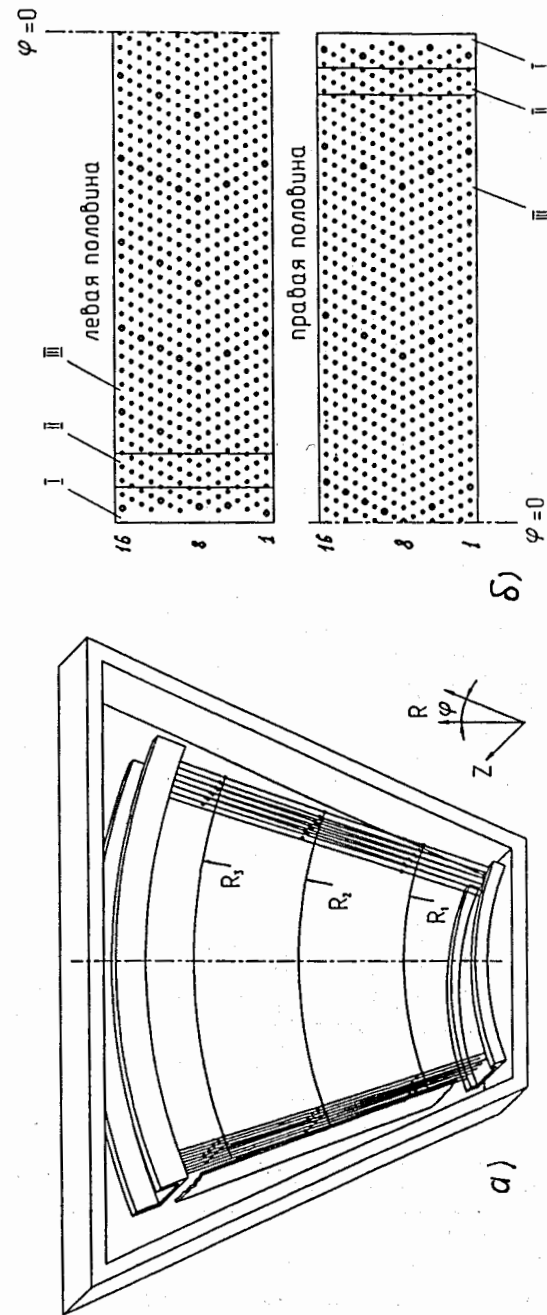


Рис.1.

а) Схематическое изображение секторного прототипа детектора. Радиальными линиями показаны строу для краевых областей. Пленочные радиаторы переходного излучения не показаны. Установленные в строу датчики температур, показанные точками, расположены по радиусам R1, R2, R3.

б) Схематическое расположение (вид сверху) 16-ти рядов строу (○) и датчиков температур (●) в них. I, II и III - зоны с различными мощностями нагрева.

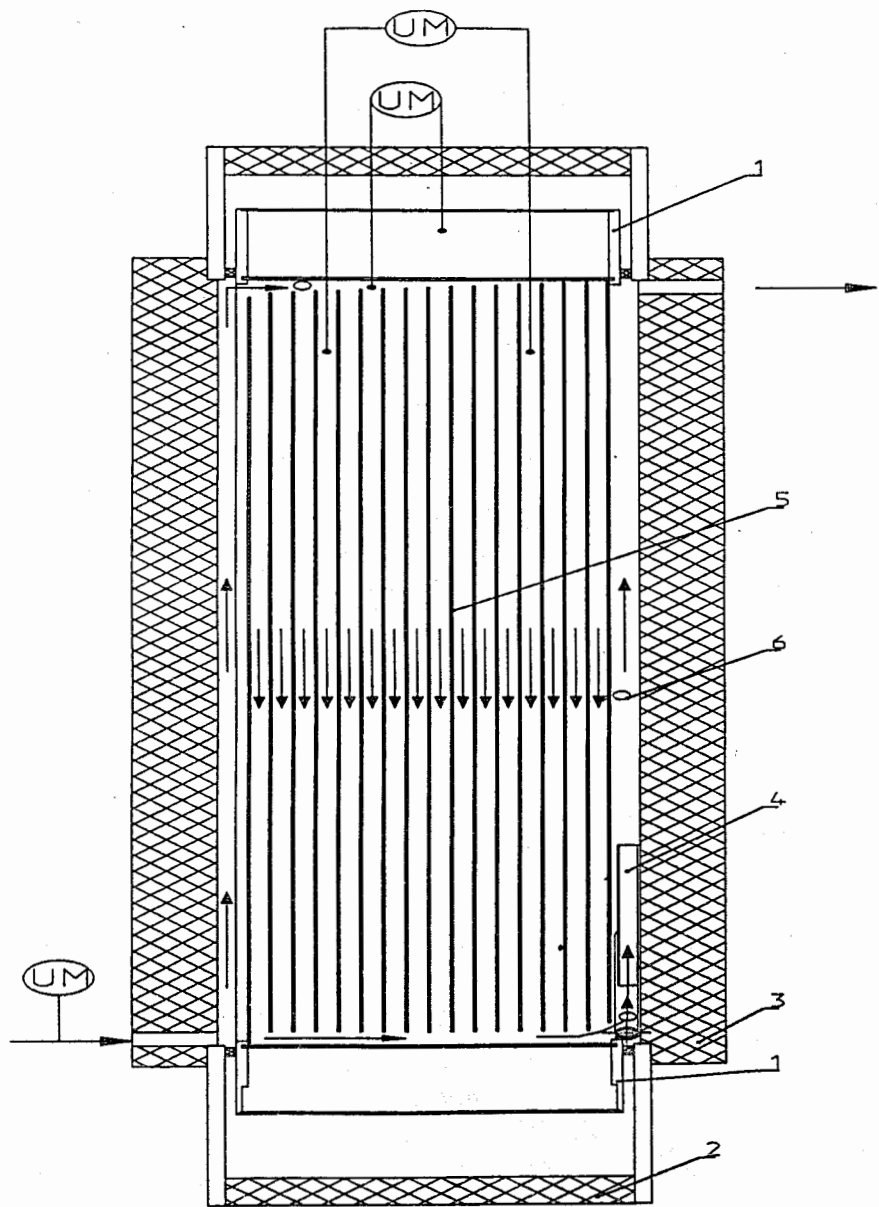


Рис. 2. Схема газового охлаждения.

1 - кольцевой сегмент, 2 - стеклотестолитовый корпус, 3 - пенополиуретановая крышка, 4 - теплообменник, 5 - радиаторы переходного излучения, 6 - места установки термодатчиков, UM - U-образные манометры. Стрелками показано направление протока газа.

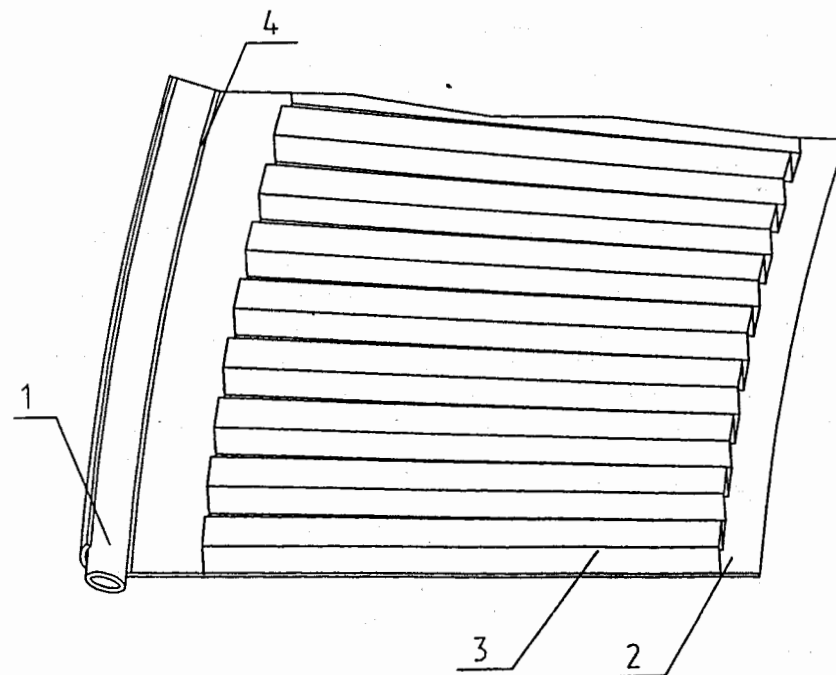


Рис.3. Общий вид теплообменника.

1 - трубка для водяного охлаждения, 2 - алюминиевая подложка, 3 - гофрированная структура, 4 - пайка для термоконтакта.

теплосъемник, размещенный в этом зазоре. Схема газового охлаждения представлена на рис. 2.

2.3. Теплосъемник

Теплосъемное устройство для охлаждения нагретого газа должно удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать необходимую и постоянную по входу температуру охлаждающего газа для всех охлаждаемых модулей в цепи их последовательного охлаждения;
- размещаться внутри модуля, удовлетворяя заданным геометрическим размерам детектора и его радиационной длине.

Изготовленный для прототипа теплосъемник не удовлетворял полностью этим требованиям и нуждается в оптимизации его параметров. Конструктивно он представлял собой гофрированный из алюминия толщиной 0,5 мм плоский радиатор с каналами для прохода газа длиной 103 мм и сечением 8 x 8 мм². По наружному периметру он был припаян к алюминиевой трубке диаметром 8 мм, по которой протекала охлаждающая вода.

Схематично теплосъемник показан на рис. 3.

3. ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЕ ВНУТРЕННИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОТОТИПА

3.1. Нагревательные элементы

При регистрации излучения внутри строу в единицу времени происходит тепловыделение, величина которого оценивается следующим выражением:

$$Q = I \cdot E \cdot \omega^{-1} \cdot G \cdot U, \quad (1)$$

где I - интенсивность пересекающих строу частиц, E - выделяемая ими в рабочем газе энергия, ω - энергия образования пар в газовой смеси, G - коэффициент газового усиления, U - напряжение на высоковольтном элементе строу. Так как интенсивность проходящих через строу частиц обратно пропорциональна квадрату расстояния до точки столкновения пучков, тепловыделение вдоль строу уменьшается в радиальном направлении.

Для имитации радиационного нагрева детектора было необходимо разработать и изготовить более 1100 нагревательных элементов для размещения их внутри каждой строу.

Устанавливались они в строу вместо анодной проволоки. Величины теплопередач вдоль нагревательных элементов должны были иметь близкие значения с величинами теплопередач вдоль анодных проволок.

Нагревательные элементы изготавливались из резистивной нихромовой проволоки диаметром 14 мкм, расположенной в зигзагообразной форме между двумя бумажными лентами. Плотность зигзагов была переменной вдоль нагревательного элемента по R , что обеспечивало изменение тепловыделения по закону:

$$Q \sim [(60 + R)^2 + (100 + Z)^2]^{-1}, \quad (2)$$

где Z - расстояние среднего модуля TRT (типа С) от точки столкновения пучков. Резистивный проволочный элемент длиной 500 мм располагался по центру нагревателя длиной 560 мм и шириной 3,9 мм. Концы нихромовой проволоки токопроводящим клеем соединялись с выходными медными проволоками диаметром 0,1 мм. Каждый нагревательный элемент вводился внутрь строу и размещался симметрично относительно ее центра. Тепловыделение каждого установленного нагревателя уменьшалось по мере удаления от внутреннего радиуса сектора. Конструкция нагревателя показана на рис. 4.

Разработанные нагревательные элементы обеспечивали широкий диапазон по мощности тепловыделения в зависимости от подаваемого на них напряжения, обладали собственной низкой теплопроводностью (Приложение), кроме того распределение тепловыделения вдоль элементов соответствовало требуемому закону.

3.2. Датчики температуры

Для измерения распределения температуры внутри прототипа использовались 123 датчика, представляющих собой медь-константановые термопары (рис. 5).

Так как вещество датчиков из-за его большой теплопроводности может вносить искажения в реальное распределение температур в прототипе, при изготовлении термопар были применены термопарный константан диаметром 0,1 мм и электротехническая медная проволока диаметром 0,06 мм. Это позволило обеспечить относительно малую величину теплового потока по термодатчикам, что можно видеть по приведенной в

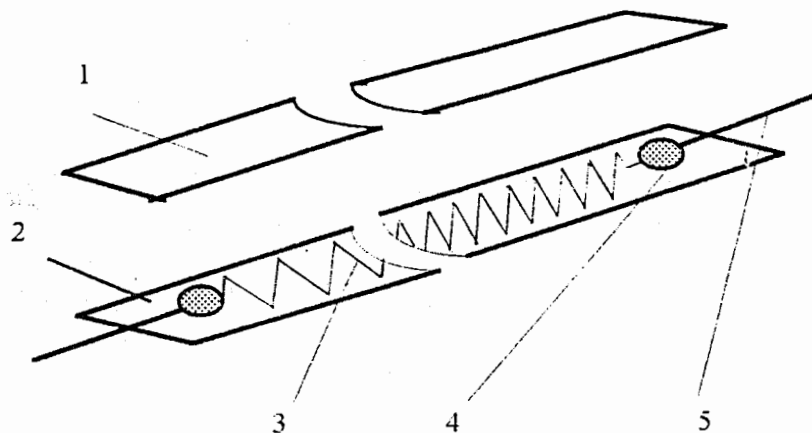


Рис.4. Конструкция нагревательного элемента.

1 - клейкая бумажная лента (скотч), 2 - бумажная лента, 3 - нихромовая проволока \varnothing 14 мкм, 4 - токопроводящий клей, 5 - медные выводы \varnothing 100 мкм.

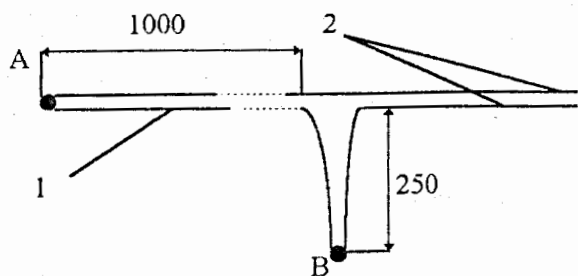


Рис.5. Конструкция датчика температуры.

1 - константановая проволока \varnothing 100 мкм, 2 - медная проволока \varnothing 60 мкм, А - измерительный спай, В - реперный спай ($t = 0^\circ \text{C}$).

Приложении таблице, где приведены величины теплоточков вдоль различных элементов прототипа. Термопары крепились на поверхность нагревательных элементов (рис. 6) и вместе с ними вводились внутрь строу. При этом во избежание теплового контакта, создавался воздушный зазор не менее 0,5 мм между измерительным спаем и плоскостью нагревателя.

С целью получения максимальной информации о термораспределении в секторе термодатчики были установлены в 7 из 16 рядов (плоскостей) строу на трех уровнях с различными радиусами (рис. 1 и рис. 2). Это позволяло определять распределение температур по φ -, R-, Z-направлениям.

3.3. Датчики давления

В качестве датчиков абсолютного и дифференциального давления использовались U - образные манометры. Схема их расположения представлена на рис. 2.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Термометрия прототипа проводилась при следующих условиях:

- скорость потока охлаждающего газа изменялась от 0 до 90 л / мин;
- положение сектора по углу φ можно было устанавливать в диапазоне от 0 до 180° ;

Схема расположения термодатчиков позволяла определять распределения температур внутри прототипа по φ -, R-, Z-координатам.

Блок-схема измерительной аппаратуры приведена на рис. 7. Выходы 123 установленных в прототипе термопар были выведены на выходные разъемы, с которых группами по 16 их можно было подключать к 16-канальному коммутатору. Далее через дифференциальные усилители сигналы с термопар поступали на АЦП, информация с которого передавалась в персональный компьютер. Нулевые измерительные точки всех термопар находились при температуре 0°C .

Калибровка всех термопар проводилась в диапазоне температур $12^\circ \text{C} - 100^\circ \text{C}$.

Созданное программное обеспечение позволяло управлять процессом считывания и проводить в реальном времени обработку информации с представлением на дисплей температурных

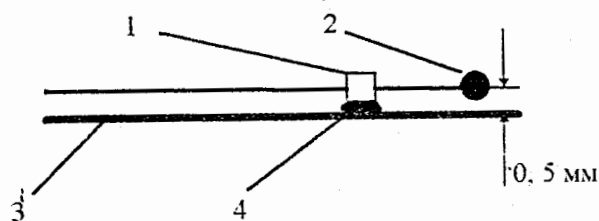


Рис.6. Установка термодатчиков на нагревательных элементах
1 -бумажная втулка, 2 - измерительный спай, 3 -нагревательный элемент, 4 - клей.

зависимостей во времени по подключенным 16 термодатчикам, с последующей записью данных для всех групп термопар.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. Процедура термоизмерений

Перед началом измерений была проверена герметичность внутреннего объема прототипа, через которую проходил охлаждающий газ. При избыточном давлении в 0,1 атм уровень течи между этим объемом и внутренним объемом всех строу, соединенным с воздухом в окружающем сектор боксе, был менее $5 \text{ см}^3 / \text{мин}$.

После сборки прототипа была снята температурная карта по всем 123 установленным термопарам. Приведенная на рис. 8 гистограмма демонстрирует идентичность всех измерительных каналов и достаточную для испытаний прототипа измерительную точность; так, величина σ , m , s распределения температуры внутри прототипа составляла $0,25^\circ \text{C}$.

При измерениях температура окружающего прототип воздуха была около 16°C , температура охлаждающей воды - около 12°C . С целью ускорения измерительного процесса и уменьшения расхода охлаждающего газа использовалась следующая измерительная процедура. На нагревательные элементы прототипа с выключенными водой и газовым продувом подавалось требуемое напряжение. После нагрева прототипа включался продув его охлаждающим газом, а также, при необходимости, охлаждение теплоемника водой, и изучалась динамика процессов в различных точках внутри прототипа. По установлению стационарного температурного состояния строилась карта распределения температур, после чего, при необходимости, увеличивалась скорость продува охлаждающего газа, и процедура измерений повторялась. Основные измерения были проведены в положении прототипа при угле φ , равном 0° , что соответствовало положению сектора с нижним внутренним радиусом и наружным верхним (рис. 1). Для изучения влияния внутренней конвекции газа на термораспределения проводились измерения с изменением положения сектора от 0° до 180° .

На рис. 9 представлены типичные динамические зависимости изменения температур во времени для 8 термодатчиков при

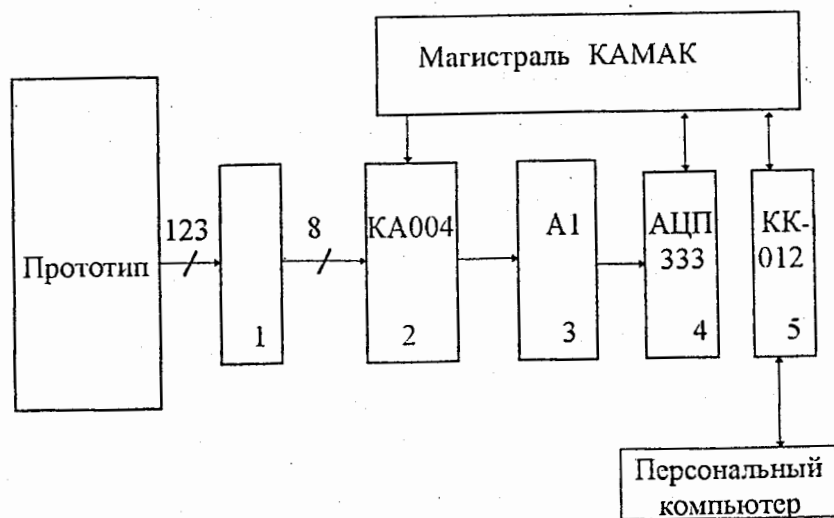


Рис.7. Блок -схема измерительной аппаратуры.
1 - блок коммутации, 2 - аналоговый мультиплексор, 3 - усилитель,
4 -АЦП; 5 - контроллер крейта КАМАК.

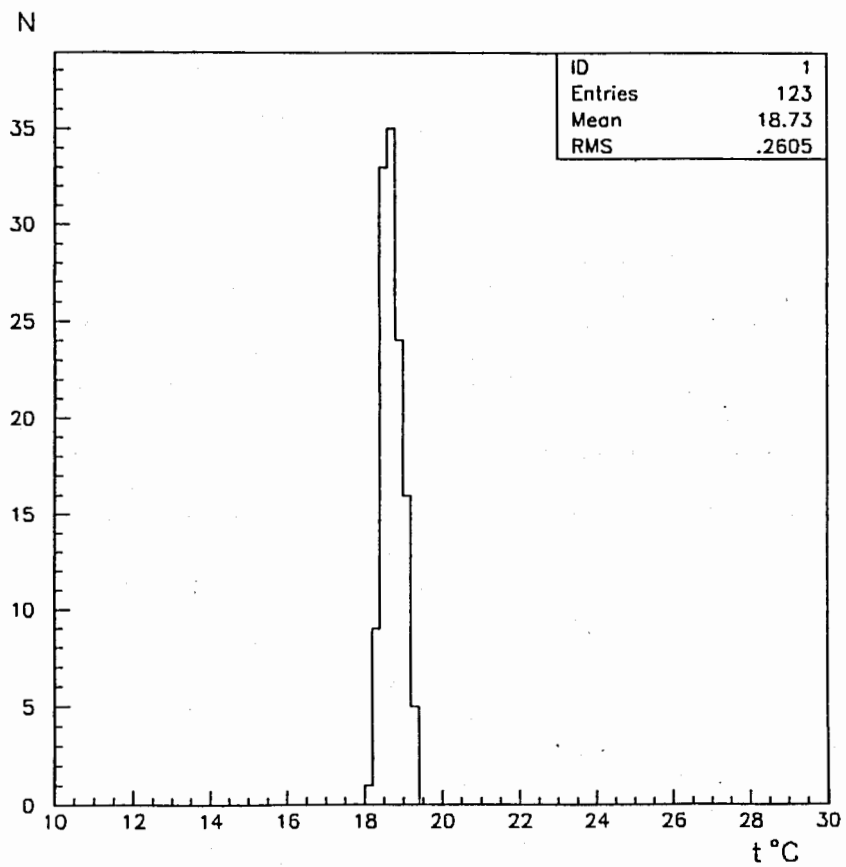


Рис.8. Первичное распределение температур в прототипе.

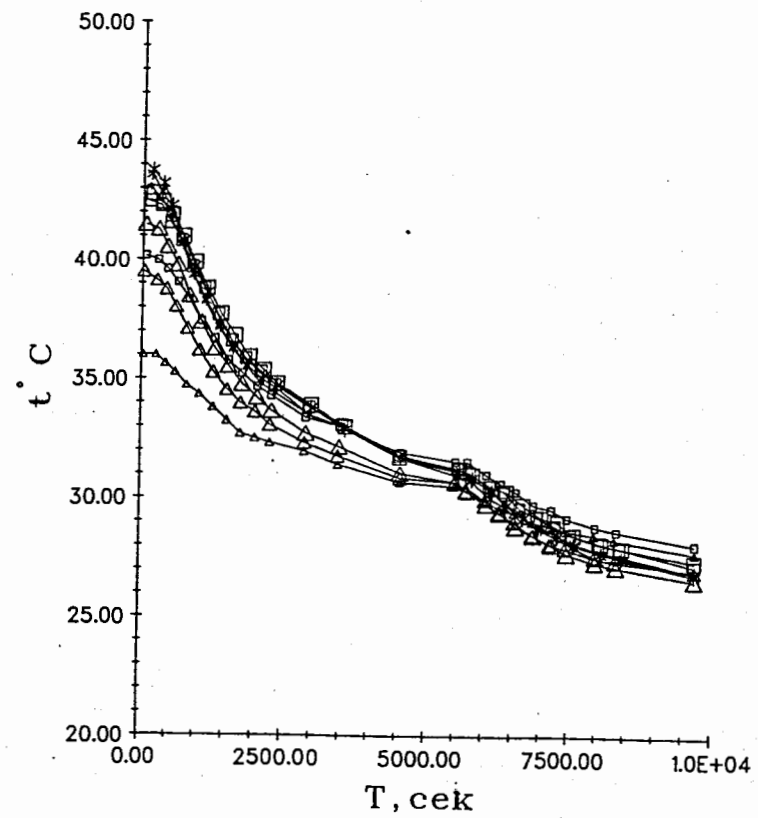


Рис.9. Типичные динамические зависимости изменения температур во времени для 8 термодатчиков при охлаждении нагретого сектора.

охлаждении " радиационно" нагретого сектора азотом со скоростью продува 44 л / мин, а затем 91 л / мин.

5.2. Имитация " радиационного" нагрева

Из-за наличия боковых стенок сектора, установленных при угле $\varphi = \pm 21^\circ$, имеют место краевые эффекты, выраженные в увеличенном теплотокоте по φ - направлению. С целью их компенсации нагревательные элементы по питанию были разделены на три группы (рис. 16).

Нагревательные элементы центральной группы (III), содержащей 968 строу, находились под напряжением, обеспечивающим тепловыделение в каждом строу мощностью 10,8 мВт.

Группы строу, ориентированных под углом φ , близким к $\pm 21^\circ$ и состоящие из 29 и 27 штук соответственно, содержали нагреватели с большей мощностью тепловыделения (группа I).

Промежуточная группа нагревателей (группа II) размещалась в соответствующих 40 и 36 строу.

На рис. 10 приведено распределение температур по φ для термодатчиков, установленных в центральном слое с радиусом $R_2 = 275$ мм для 5, 8 и 12 рядов строу по Z. Видно, что компенсация краевых эффектов обеспечивает постоянную температуру в достаточно большом промежутке по этому направлению. В то же время видно, что имеют место теплотери по Z-направлению. При этих измерениях охлаждение отсутствовало. Сектор был в положении $\varphi = 0^\circ$. При всех дальнейших измерениях мощность нагревателей составляла 60 мВт, 25 мВт и 10,8 мВт для I, II и III групп соответственно. В последующем представлении данных области прототипа, соответствующие группам I и II, исключались из рассмотрения.

5.3. Термораспределение в секторе, расположенном при $\varphi = 0^\circ$

Изучение термораспределения в секторе, расположенном при угле φ , равном 0° , показало достаточно хорошее совпадение температур по термодатчикам, установленным в симметричных относительно его центра точках. Это позволило в дальнейшем определять среднюю температуру сектора, приравнивая температуры в точках без термодатчиков значениям температур в симметрично им расположенных, имеющих термодатчики, точках.

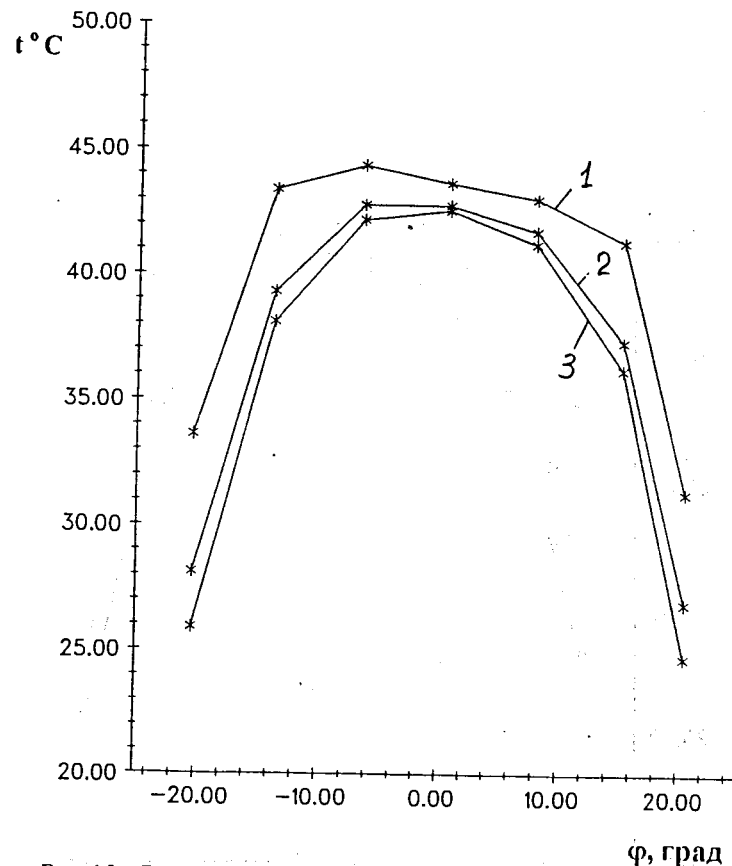


Рис.10. Распределение температур по φ для термодатчиков, установленных в центральном слое $R_2 = 275$ мм в отсутствие охлаждения.

Кривые 1 отвечают мощности нагрева строу в 78, 60 и 10,8 мВт для I, II и III зон соответственно. Кривые 2 отвечают мощности нагрева строу в 40, 25 и 10,8 мВт для I, II и III зон соответственно. Кривые 3 отвечают мощности нагрева строу по 10,8 мВт для всех зон.

а) - для 5-го ряда строу; б) - для 8-го ряда строу; в) - для 12 ряда строу.

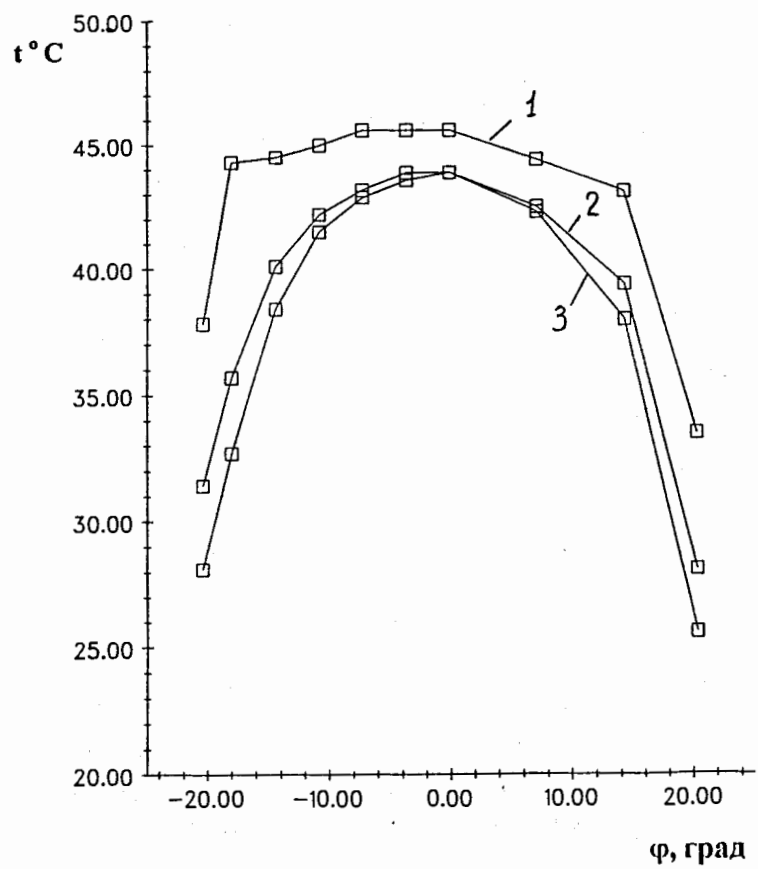


Рис. 10 (б)

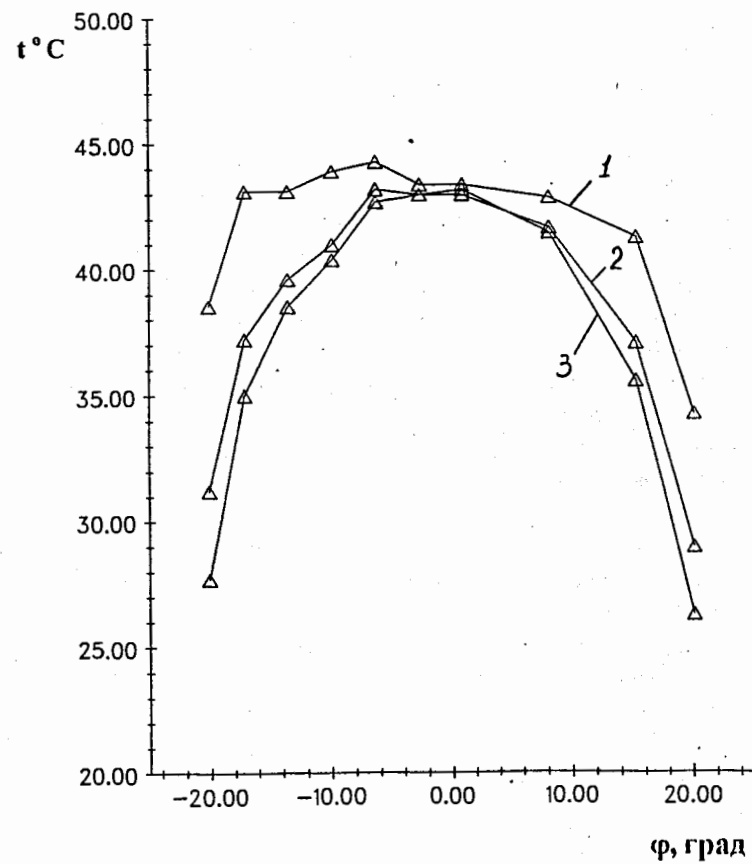


Рис. 10 (в)

Изучалось влияние теплосъемника, установленного вблизи 16-го ряда строу со стороны наружного радиуса, на термораспределение в близких к нему точках.

Приведенные на рис. 11 зависимости показывают распределение температур по Z-направлению, без включения газового охлаждения для термопар, установленных на разных уровнях по R, но при $\varphi = 0^\circ$. Рис. 11-в соответствует центральному слою датчиков, 11-а и 11-б - датчикам, расположенным соответственно со стороны наружного и внутреннего радиусов сектора. Кривые 1 получены без охлаждающей теплосъемник воды, кривые 2 - при ее включении. Сравнение этих кривых показывает сильное влияние охлаждающей теплосъемник трубки на участки строу, близкие к наружному радиусу, для нескольких расположенных у теплосъемника рядов. Включение газового охлаждения уменьшает этот эффект. Так, на рис. 12 и рис. 13 показаны гистограммы температур при охлаждении сектора N_2 со скоростью продува 22 и 91 л / мин соответственно. На фрагментах (а) рисунков приведены термораспределения в секторе с исключением его областей с сильными краевыми эффектами вблизи углов $\varphi = \pm 21^\circ$, а также 16-го ряда строу. Фрагменты (в) и (с) показывают распределение температуры для 16-го ряда строу с включением и без водяного охлаждения теплосъемника, соответственно. Видно, что при продуве азотом со скоростью 91 л / мин искажение термораспределения в близких к теплосъемнику областях практически отсутствует.

Таким образом, диапазон температур в секторе, ориентированном в положении $\varphi = 0^\circ$, при продуве его N_2 при скорости 91 л / мин составляет $10^\circ C$.

Исследовалось влияние скорости продува охлаждающего газа на температурное распределение внутри сектора. Кривая 2 и кривая 1 на рис. 14 показывают зависимость максимальной величины нагрева центральной области прототипа и его средней температуры, соответственно, достигаемых при существующем в прототипе уровне тепловых потерь. Максимальная температура в прототипе в отсутствие охлаждения составила $28^\circ C$ относительно температуры окружающей среды. Видно, что эта величина уменьшается с увеличением скорости потока охлаждающего прототип азота, достигая $9^\circ C$ при скорости, равной 90 л / мин. Расчет тепловых потерь по Z-, R- и φ -направлениям в прототипе достаточно трудоемок. Для экспериментальной оценки суммарных величин этих потерь были измерены температуры охлаждающего азота на выходе его из прототипа без теплосъемника. Измерения были проведены

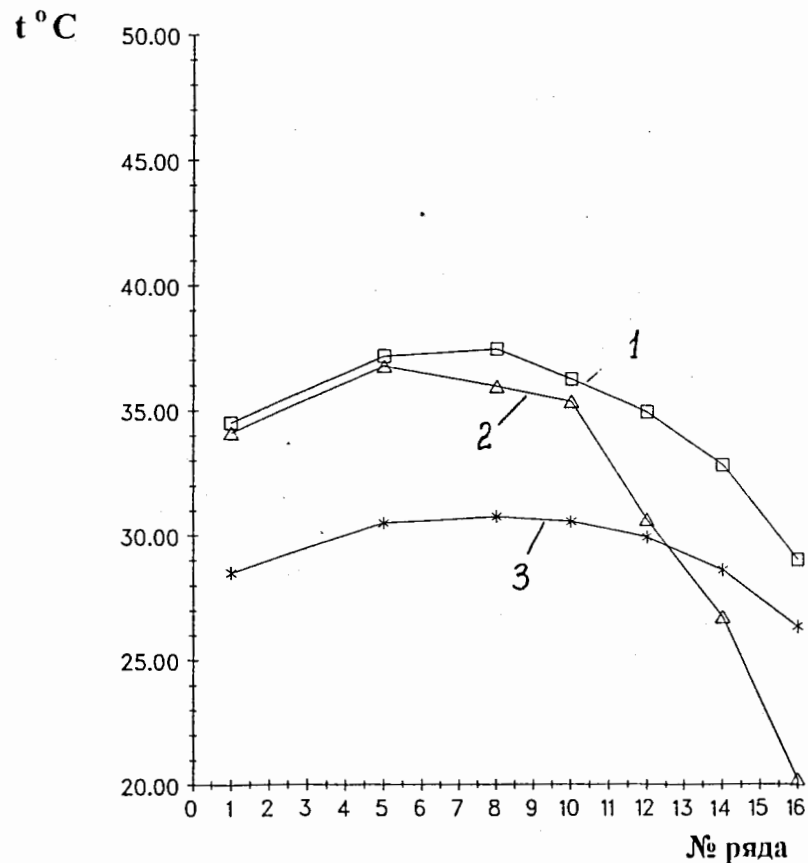


Рис.11. Распределение температур по Z в плоскости $\varphi = 0^\circ$ в отсутствие газового охлаждения.

□ - без охлаждающей теплосъемник воды; Δ - с охлаждающей водой; * - без охлаждающей теплосъемник воды при развороте прототипа на $\varphi = 180^\circ$.
а) в слоях с радиусом R₃; б) в слоях с радиусом R₂; в) в слоях с радиусом R₁.

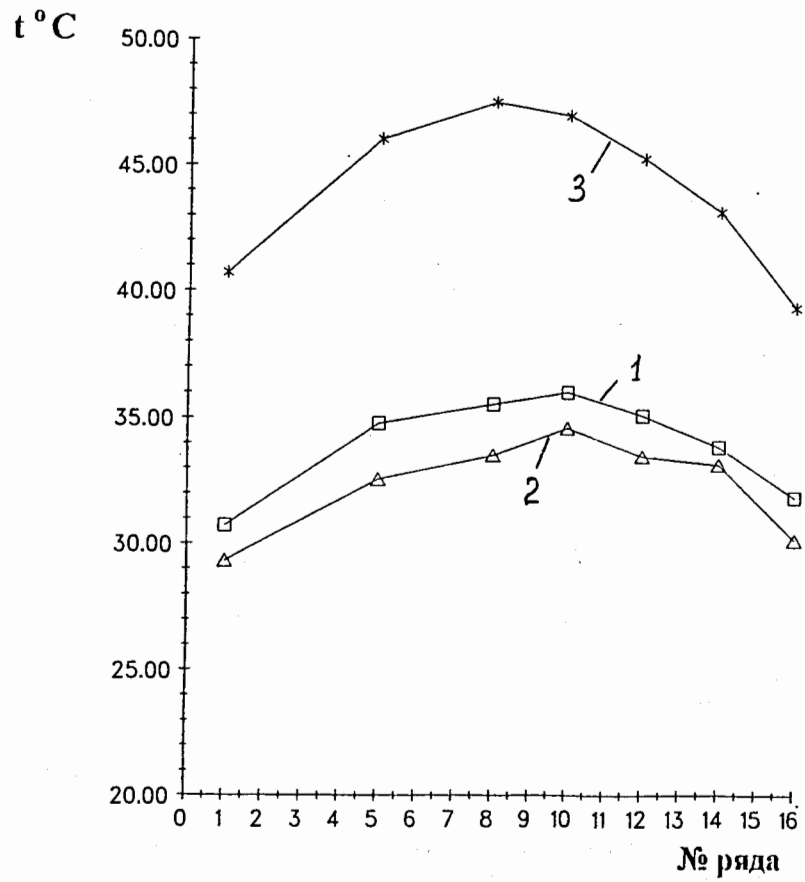


Рис. 11 (б)

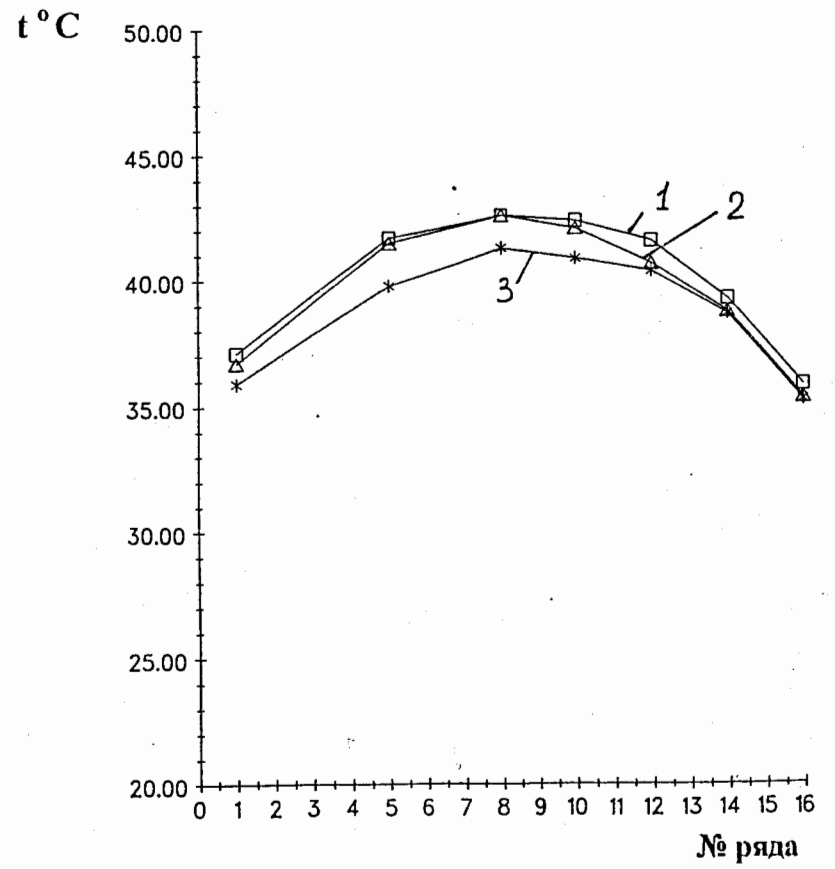


Рис. 11 (в)

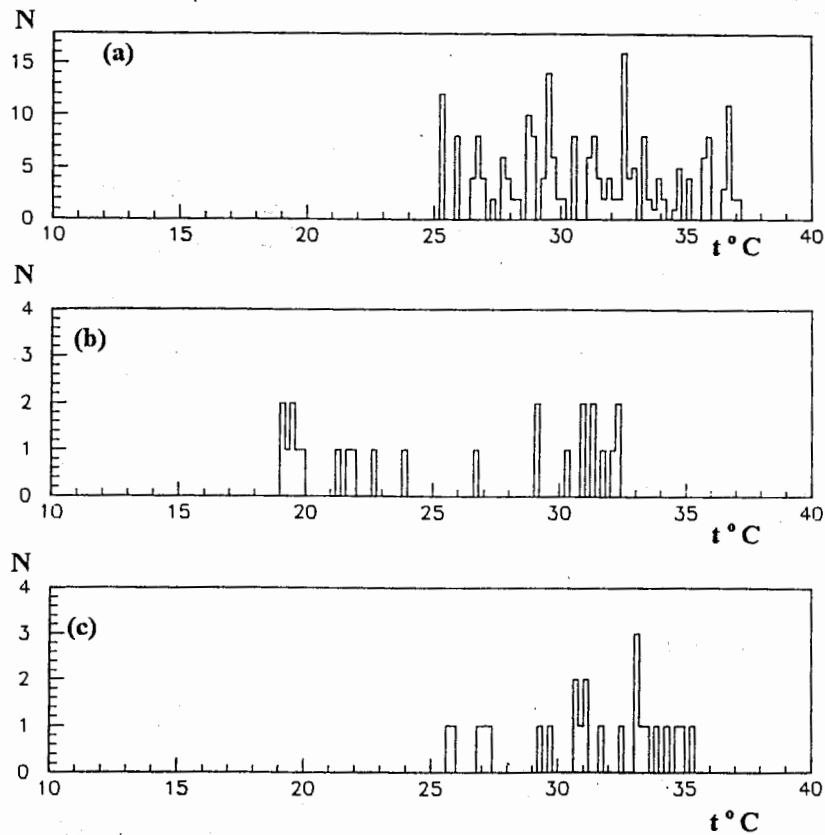


Рис.12. Распределение температур в прототипе при охлаждении азотом со скоростью продува 22 л / мин:
 а) с исключением областей вблизи углов $\varphi = \pm 21^\circ$ и 16 ряда строу;.
 в) для 16-го ряда строу с включением водяного охлаждения теплоъемника; с) для 16-го ряда строу без водяного охлаждения.

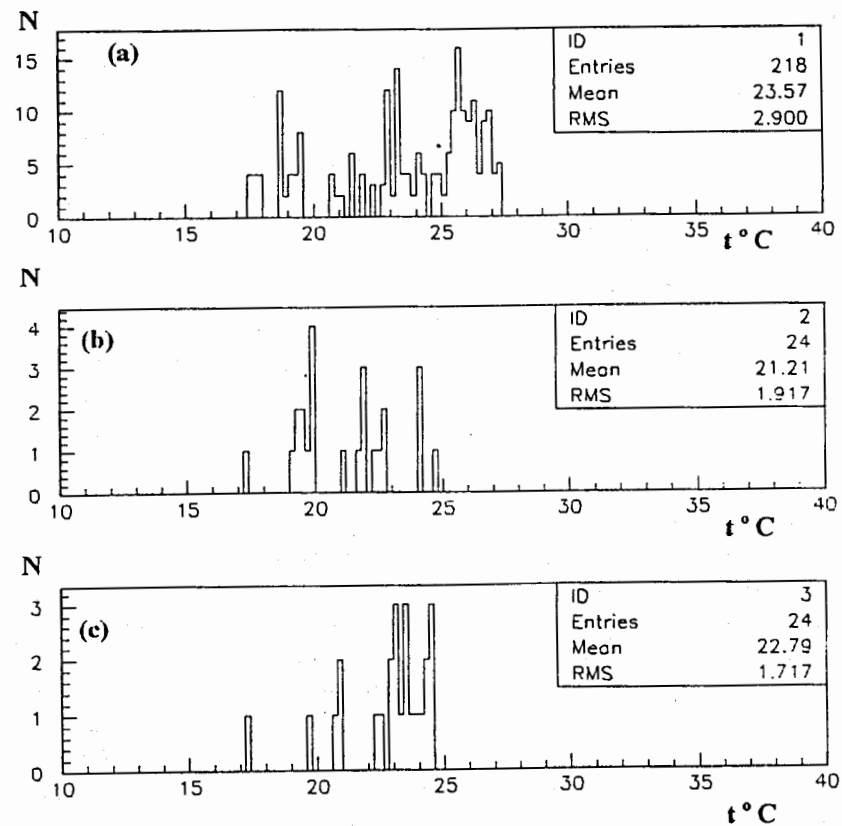


Рис.13. Распределение температур в прототипе при охлаждении азотом со скоростью продува 91 л / мин.
 а) с исключением областей вблизи углов $\varphi = \pm 21^\circ$ и 16 ряда строу;.
 в) для 16-го ряда строу с включением водяного охлаждения теплоъемника; с) для 16-го ряда строу без водяного охлаждения.

для различных скоростей газового потока. Совокупность всех измерений позволила получить зависимость средней температуры «идеального» по теплоизоляции сектора от скорости потока азота (кривая 3 на рис. 14). При замене азота углекислым газом эффект охлаждения при той же скорости продува увеличивался на 19 %, что согласуется с величинами молярных теплоемкостей этих газов. На рис. 15 представлены зависимости среднеквадратичного отклонения температур в прототипе от скорости продува его азотом. Очевидно, что с уменьшением собственных потерь следует ожидать уменьшения тепловых флуктуаций.

Выполненные измерения хорошо совпадают с предварительными оценками и подтверждают необходимость принудительного охлаждения модулей TRT переднего направления.

5.4. Термораспределения в секторе при $\varphi = 180^\circ$

Влияние конвекции на ожидаемое термораспределение в кольцевых модулях TRT изучалось при охлаждении прототипа сектора, установленного под углом φ от 0° до 180° .

Сравнение кривых 1 и 3 на рис. 11, показывающих распределение по направлению Z для сектора при $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$, соответственно, говорит о сильном влиянии конвекции внутри сектора на термораспределение. Измерения были проведены без включения охлаждающих газов и воды. Так, например, рис. 16 показывает, что по центральной оси сектора в радиальном направлении максимальная температура достигается в центре, ближе к наружному радиусу температура понижается, что может быть объяснено уменьшением там тепловыделения нагревателем.

Уменьшение температуры вблизи к внутреннему радиусу в области максимального тепловыделения нагревателями говорит об эффекте конвекции (кривая 1). Кривая 2 этого рисунка для случая $\varphi = 180^\circ$ подчеркивает эффект конвекции, придающей зависимости $t(R)$ практически линейный характер.

На рис. 17 приведены гистограммы распределения температур в секторе без охлаждения и для $\varphi = 0^\circ$ (17-a), без охлаждения и для $\varphi = 180^\circ$ (17б), с охлаждением азотом при продуве 44 л/мин и $\varphi = 180^\circ$ (17с) и при продуве 91 л/мин (17г). Видно, что средняя температура сектора составляет в этих случаях $38,5^\circ\text{C}$; $38,3^\circ\text{C}$; $31,7^\circ\text{C}$; $28,2^\circ\text{C}$, соответственно, в то время как г. м. s. распределений - $3,7^\circ\text{C}$; $6,0^\circ\text{C}$; $4,1^\circ\text{C}$; $4,1^\circ\text{C}$; $4,0^\circ\text{C}$,

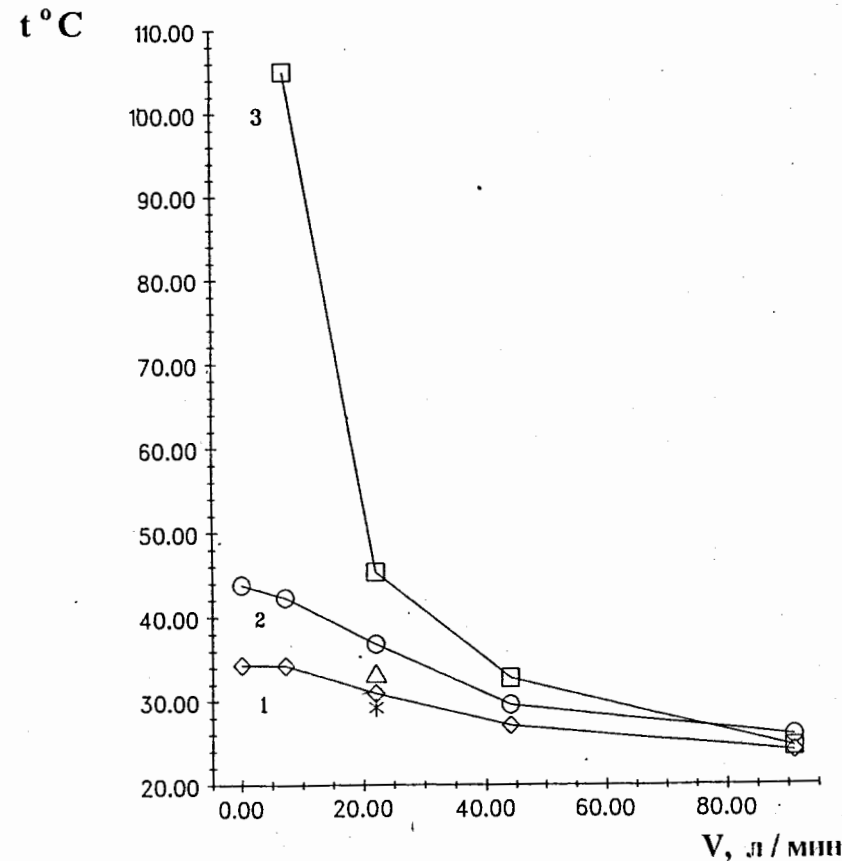


Рис. 14. Влияние скорости продува охлаждающего газа на температурное распределение внутри прототипа:

1 - зависимость средней температуры прототипа при охлаждении азотом; 2 - зависимость максимальной величины нагрева центральной области при охлаждении азотом; 3 - зависимость средней температуры прототипа в случае "идеальной" теплоизоляции при охлаждении азотом. Точки (Δ) и ($*$) получены при продуве охлаждающим углекислым газом для случаев 1 и 2 соответственно.

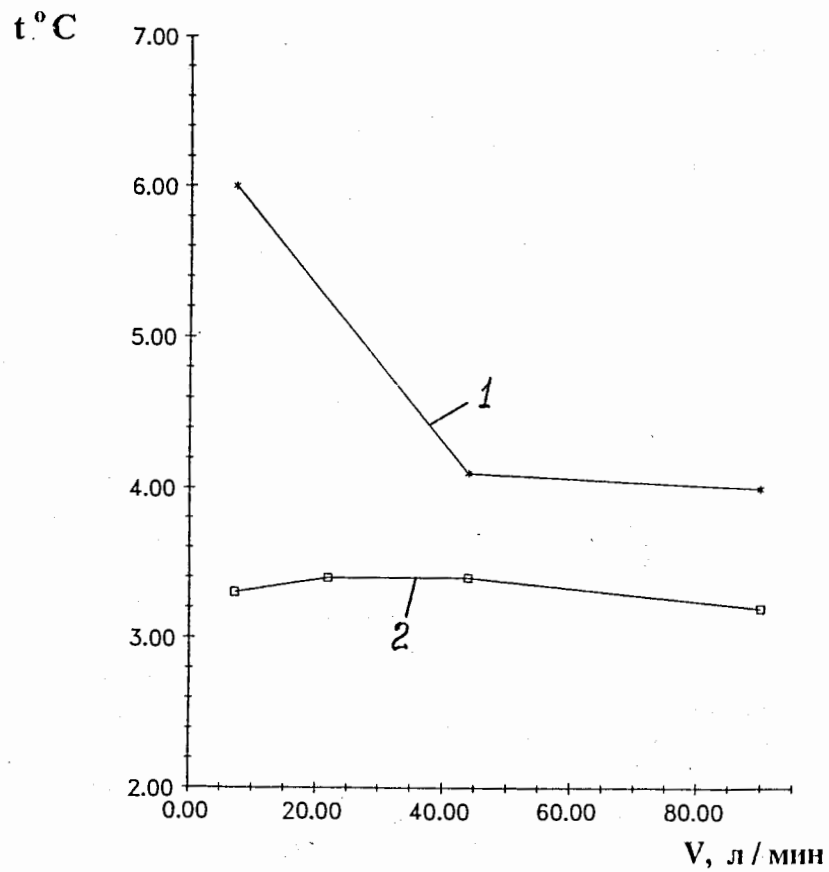


Рис.15. Зависимость среднеквадратичного отклонения температур в прототипе от скорости продува азотом:
1 - прототип повернут на 180° ; 2 - прототип повернут на 0° .

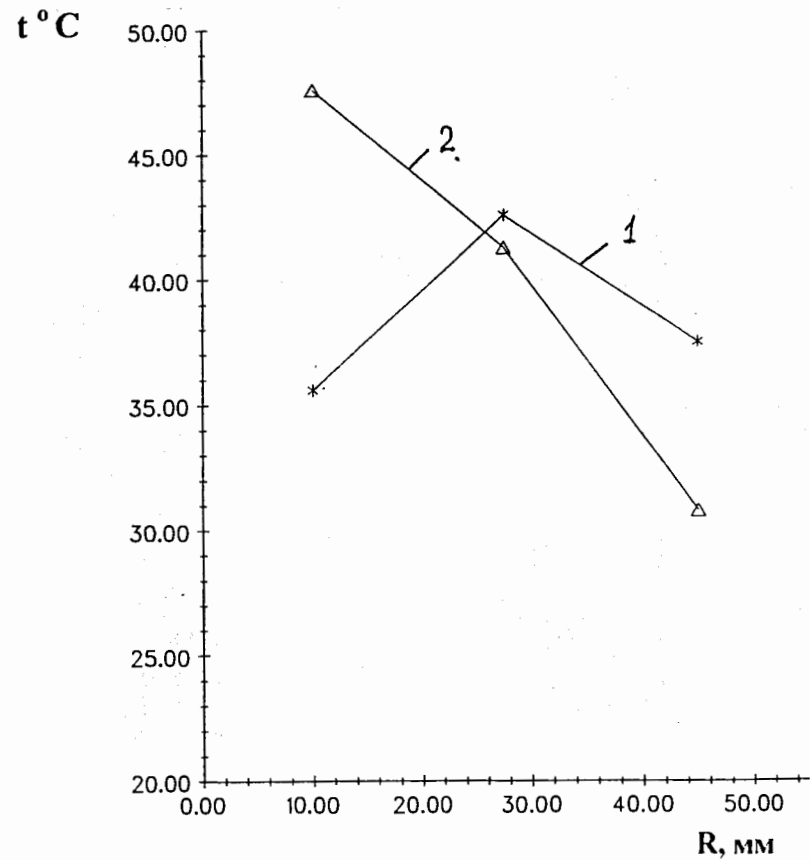


Рис.16. Влияние конвекции внутри строу на распределение температур в прототипе. Графики получены для центральной строу.
1 - прототип в положении $\varphi = 0^\circ$; 2 - прототип в положении $\varphi = 180^\circ$.

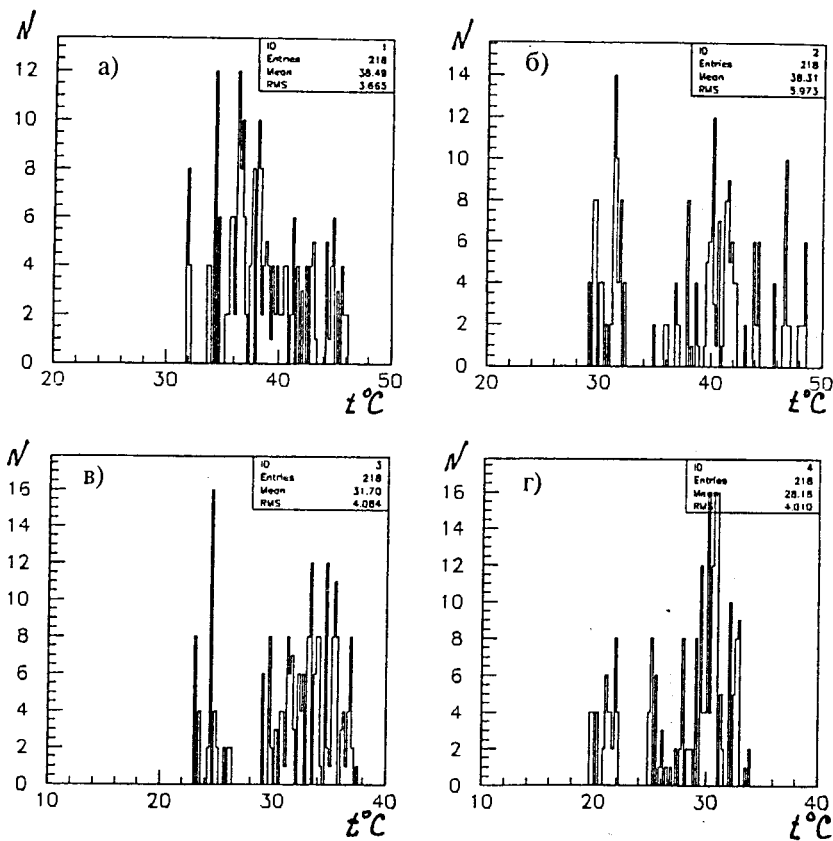


Рис.17. Распределение температур в прототипе:
 а) в отсутствие охлаждения и для $\varphi = 0^\circ$; б) в отсутствие охлаждения и для $\varphi = 180^\circ$; в) с охлаждением азотом при продуве 44 л / мин и для $\varphi = 180^\circ$; г) с охлаждением азотом при продуве 91 л / мин и для $\varphi = 180^\circ$.

соответственно. Видно, что при продуве азотом 91 л / мин диапазон температурного распределения составляет 15°C (17г).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термометрия полномасштабного прототипа 42°C сектора TRT прямого направления установки ATLAS LHC подтвердила необходимость принудительного охлаждения модулей детектора. При имитации с 20 % превышением максимального радиационного нагрева сектора, охлаждение его азотом, входящим в прототип при температуре 19°C и со скоростью 90 л / мин обеспечивается температурный разброс в диапазоне до 15°C .

Применение углекислого газа позволяет уменьшить величину продува на 19 %. Следует ожидать, что при температуре окружающей среды, более приближенной к средней температуре детектора, температурный разброс внутри модулей будет иметь меньшую величину.

Предполагаемая оптимизация теплосъемника заключается в существенном увеличении его площади, что должно уменьшить в том же отношении его длину, снижая соответственно полную радиационную длину модуля.

Недостатком предлагаемой схемы охлаждения является некоторый нагрев охлажденного газа на его пути от теплосъемника до входа в следующий модуль детектора. Это может быть компенсировано понижением уровня температуры охлаждения газа на выходе теплосъемника.

Приложение

Величины теплопередач по отдельным элементам сектора
для $\Delta t = 10^\circ \text{C}$ на длине 50 см.

| элемент | материал | Q, Вт |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| анодная проволока | медь \varnothing 50 мкм бронза \varnothing 50 мкм вольфрам \varnothing 50 мкм | $1.6 * 10^{-5}$ $(0.8 \div 5.1) * 10^{-6}$ $6.9 * 10^{-6}$ |
| He, газ в строу | | $1.3 * 10^{-6}$ |
| N ₂ , газ в строу | | $6.0 * 10^{-6}$ |
| нагреватель | | $2.8 * 10^{-6}$ |
| термопара | | $(5.5 \div 10.8) * 10^{-6}$ |

Литература

1. Price M. J. "Cooling of the forward TRT wheels", CERN TA1 1 Technical Note TA1 / 96 - 04, 1996.
2. Semenov S., Sosnovtcev V. "Temperature Dependence of the Straw Operating Properties", CERN RD - 6 Note № 63, 1995

Рукопись поступила в издательский отдел
31 декабря 1996 года.