

P13-2010-81

В. Ю. Батусов, М. В. Ляблин, Н. Д. Топилин

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ
АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КОНТРОЛИРУЕМОЙ СБОРКИ АДРОННОГО
ТАЙЛ-КАЛОРИМЕТРА УСТАНОВКИ АТЛАС**

Направлено в журнал «ЭЧАЯ»

Батусов В. Ю., Ляблин М. В., Топилин Н. Д. P13-2010-81
Разработка и применение аппаратно-программного обеспечения контролируемой сборки адронного тайл-калориметра установки АТЛАС

В работе описан разработанный авторами комплекс аппаратно-программного обеспечения и методов геометрического контроля как основных составных элементов, так и окончательной сборки адронного калориметра установки АТЛАС. Их использование на всех этапах создания калориметра обеспечило достижение высоких проектных точностей при сооружении крупнейшей в мире экспериментальной установки физики высоких энергий.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Batusov V. Yu., Lyablin M. V., Topilin N. D. P13-2010-81
The Development and Application of Hardware-Software for the Controlled Assembly of ATLAS Hadron Tile Calorimeter

The article contains developed by the authors hardware-software complex and geometry control methods of the main constituent elements and final assembly of the hadron tile calorimeter. The developed complex was used at all stages of the calorimeter creation and allowed one to reach high-design precision when creating the world largest research ATLAS spectrometer.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Самой крупной экспериментальной установкой введенного в эксплуатацию в конце 2009 г. большого адронного коллайдера является спектрометрический комплекс АТЛАС [1]. Принципиально важной его частью является система калориметров (адронных и электромагнитных). Данные, полученные с калориметров, используются в исследованиях по физике тяжелых кварков, поиске бозона Хиггса и других опытах, направленных на обнаружение новых явлений и частиц за пределами стандартной модели. Информация с калориметров используется для определения энергии, направления и идентификации типа частиц и струй, рожденных в pp -взаимодействиях. Эти данные в дальнейшем необходимы для детальной реконструкции процесса столкновения частиц.

Адронный калориметр установки АТЛАС состоит из центральной (barrel) и двух дополнительных (extended barrels) секций (рис. 1); общий вес кон-

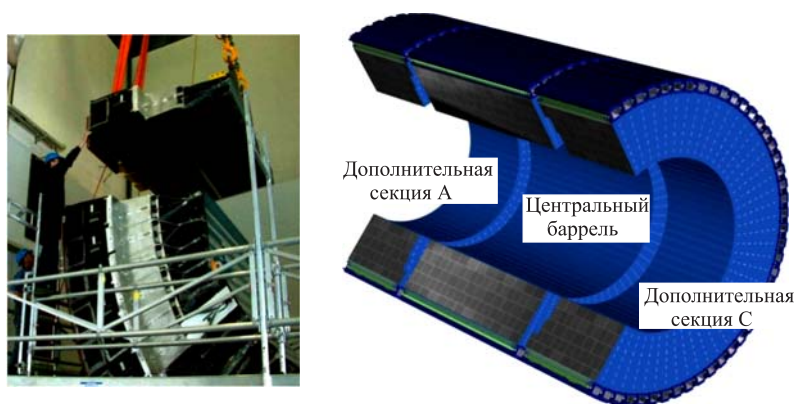


Рис. 1. Схема расположения калориметрической системы АТЛАС; монтаж модуля дополнительной части адронного калориметра

струкции более 2500 т. Каждая секция собрана из 64 модулей клиновидной формы: длина модуля в центральной (баррельной) части калориметра равна 5,6 м, а в дополнительных частях — 2,8 м. Внешний/внутренний диаметр сборки — 8,47/4,66 м.

Калориметр имеет так называемую сотовую структуру: сцинтиллирующие пластины (тайлы) вставлены в стальной поглотитель (рис. 2). Тайлы расположены перпендикулярно к направлению сталкивающихся пучков, и считывание сигнала осуществляется спектросмещающими оптическими волокнами.

Модуль (см. приложение 1) состоит из субмодулей, установленных с требуемой относительной линейной и угловой точностью на общем основании — прямой балке (girder). Внутри балки располагается подвижная «корзина» (driver) с ФЭУ и электронными блоками.

В Дубне с 1999 по 2002 г. производилась серийная сборка крупнобаритных элементов — модулей адронного калориметра весом около 20 т.

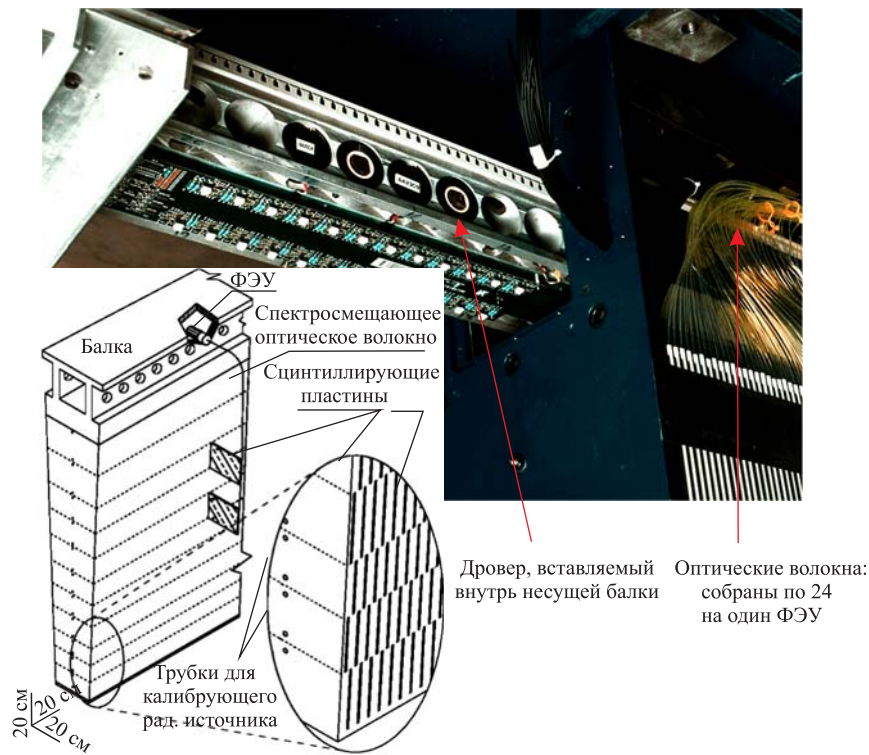


Рис. 2. Схематичное изображение конструкции модуля и иллюстрация части модуля с вставляемым электронным блоком

Поставленные в техническом задании допуски предъявляли серьезные требования к точности изготовления составных элементов и ко всей собираемой конструкции. Для решения задач высокоточной сборки модулей был разработан и создан прецизионный измерительный аппаратно-программный комплекс.

1. СБОРКА МОДУЛЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО БАРРЕЛЯ В ДУБНЕ

Коллаборацией АТЛАС разделена ответственность по изготовлению составных частей модулей, а также по сборке самих модулей.

Изначально в 1994 г. в ОИЯИ были изготовлены 120 мастерных и 500 спейсерных пластин 18 типоразмеров для прототипа субмодуля. В 1996 г. были изготовлены первые четыре субмодуля и собран модуль-0, который являлся полномасштабным прототипом серийных модулей центральной части адронного калориметра.

В дальнейшем ОИЯИ была осуществлена сборка 308 субмодулей и 65 модулей центральной — самой большой (5,6 м) — секции адронного калориметра.

Модули дополнительных (2,8 м) частей калориметра собирались в Барселоне в ИФА (Испания) и в АНЛ (США).

1.1. Основные требования к составным частям модулей. Промышленный масштаб производства компонентов модуля, состоящего в своей основе из чередующихся стальных пластин-мастеров и спейсеров (ядерных поглотителей) общим количеством несколько сот тысяч, требовал непрерывного контроля качества выпускаемой продукции. Учитывая, что допуск по контуру мастерной пластины составил $\sigma_k = 100$ и по толщине $\sigma_t \pm 30$ мкм, в процесс производства стальных пластин штамповкой ввели контрольные операции. Каждая 30-я отштампованная пластина устанавливалась на калибр, а каждая 600-я подвергалась 100%-му геометрическому контролю по разработанным нами схемам измерений на трехкоординатном измерительном центре с характерной точностью $\sigma_{\Pi} \pm 30$ мкм. Такой же контроль применялся и при аттестации изготовленных на заводе штампов после проведения коррекции или доработки штампа, а также после их перезаточки. Производство мастерных пластин и их геометрический контроль происходил на заводе TATRA (Чехия).

На рис. 3 представлена схема измерения типового спейсера. Цифровым штангенциркулем контролировались габаритные размеры спейсера A и B . Затем по данным измерений вычислялись размеры $a_1, a_2, b_1, b_2, d_1, d_2$.

На рис. 4 показаны распределения отклонений от номинальных размеров A и B для всех изготовленных спейсеров 12 типоразмеров.

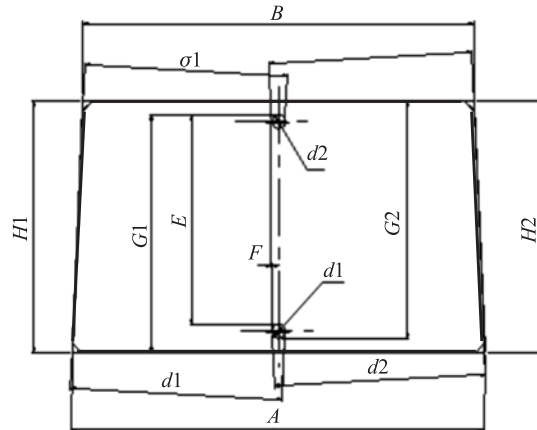


Рис. 3. Схема измерения типового спейсера

Из распределений видно, что габаритные размеры A и B изготовленных спейсерных пластин находятся в рамках номинальных значений и положительные отклонения габаритных размеров не превысили 0,1 мм, что соответствует техническому заданию [2,3],

1.2. Основные требования к сборке модулей. Адронный калориметр имеет проектное энергетическое разрешение струи $\sigma/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$ с энергетической линейностью $\pm 2\%$. Достижение таких характеристик невозможно без выполнения ряда жестких требований по точностям к механической сборке модулей и представляет собой сложную инженерно-техническую задачу. Допуск на неплоскостность боковой поверхности модуля ($1,9 \times 5,6$ м) определяется точностью ее сборки. Он составил $D_{пл} = +0,6$ мм при номинальном расстоянии между боковыми поверхностями собранных в барреле модулей 1,5 мм.

Точность сборки модулей в основном определяется:

1) точностью изготовления составных элементов модуля — балки ($\sigma_b = \pm 0,2$ мм), submodule ($\sigma_c = \pm 0,2$ мм) и точностью их взаимного расположения ($\sigma_v = \pm 0,2$ мм);

2) точностью измерительной аппаратуры, используемой в процессе производства модулей (ОИЯИ, Дубна; АНЛ, Аргонн; ИФА, Барселона).

Для успешного выполнения задач по изготовлению модулей:

— измерены габаритные размеры всех составных элементов модуля и установлено их соответствие проектным допускам;

— разработана и создана прецизионная лазерная измерительная система (ЛИС) [2], позволившая контролировать неплоскостность боковых поверх-

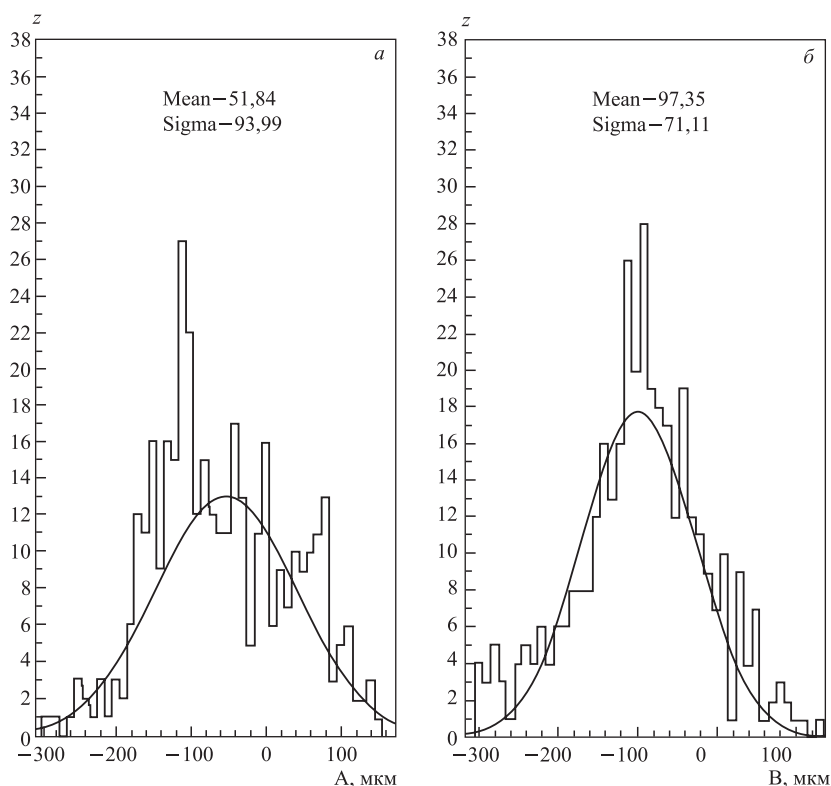


Рис. 4. Распределение отклонений от номинального значения габаритных размеров A (a) и B (b) для всех спейсеров 12 типоразмеров

ностей баррельных модулей с точностью $\sigma_{\text{лис}} = \pm 50$ мкм и обеспечившая высокий темп сборки модулей;

— создана компьютерная программа КП1 для расчета геометрических размеров модуля (на основании данных измерений ЛИС), позволившая оперативно подготовить базу данных геометрических размеров модулей.

1.3. Компьютерная программа КП1 для расчета геометрических размеров модуля. В ходе сборочных операций submodule в их широкой части крепятся к общей балке болтами. После окончания юстировки для обеспечения жесткости конструкции по всей длине узкой части модуля вваривается передняя пластина.

На рис. 5 показан модуль в процессе его сборки.

На рис. 6 представлена схема измерений на боковой поверхности модуля при помощи ЛИС. Она применялась как в процессе сборки модулей, так и в ходе финального контроля его геометрии. Лазерный луч в процессе измерения является реперной линией, относительно которой осуществляется «выстраи-

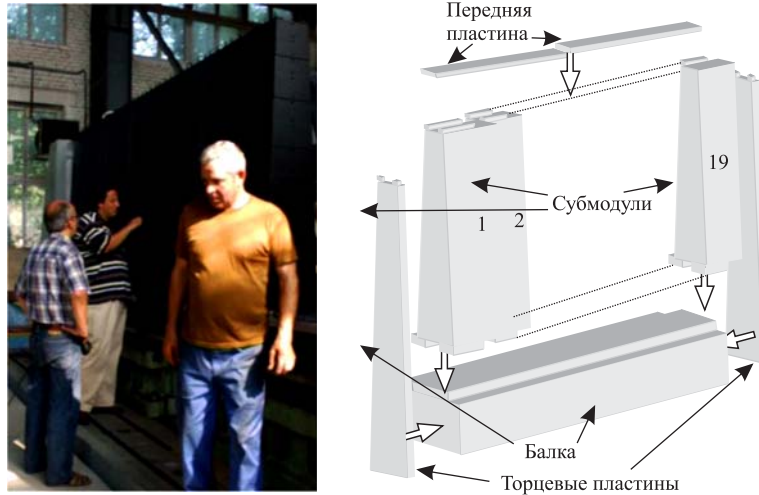


Рис. 5. Модуль в сборочном цехе ОИЯИ и схема его сборки

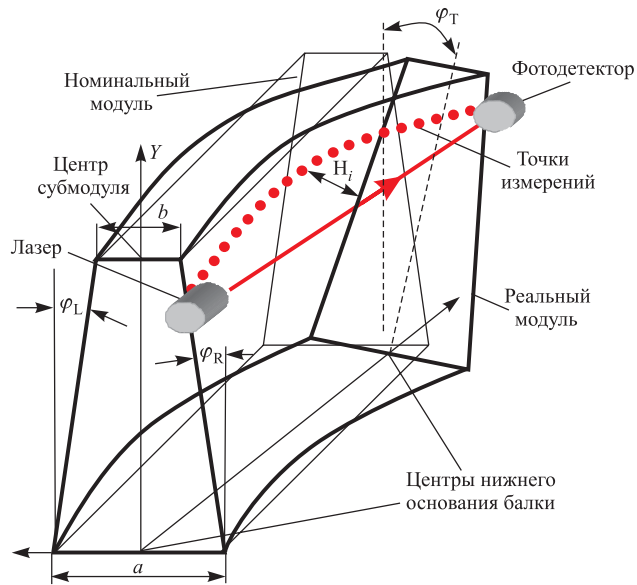


Рис. 6. Схема лазерного контроля геометрических параметров реального модуля

вание» отдельных субмодулей. При этом последовательность измеренных расстояний вдоль выбранной линии от лазерного луча до измеряемой точки на модуле представляет собой «профильную» линию (ПЛ) исследуемой поверх-

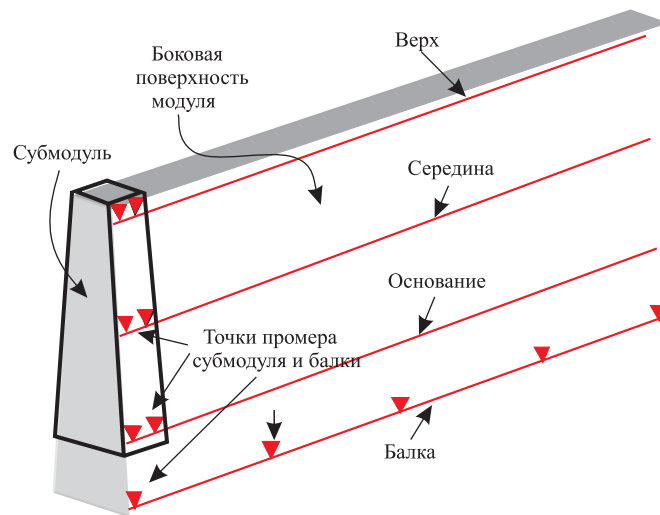


Рис. 7. Схема контрольных измерений модуля

ности. Процесс измерения расстояний состоит в установке при помощи микрометрического позиционера ($\sigma_{мп} = \pm 3$ мкм) позиционно-чувствительного фотоприемника на центр лазерного луча в точке измерения. С использованием показания микрометрического позиционера вычисляется расстояние H_i от центра лазерного луча до поверхности модуля.

Для обработки и анализа данных лазерной измерительной системы в период создания модулей в Дубне был разработан алгоритм программы КП1, используемой как в процессе сборки модулей, так и в контрольных измерениях готового модуля [4]. Программа позволила оперативно обрабатывать данные измерений (~ 250), что в значительной мере способствовало проведению ритмичной сборки модулей.

На рис. 7 показано расположение ПЛ на модуле, вдоль которых производились измерения. Три ПЛ расположены на боковой поверхности модуля и одна на его основании. Для определения абсолютных величин габаритных размеров модуля при помощи штангенциркуля ($\sigma_{ш} = \pm 20$ мкм, диапазон — 0–450 мм) производится измерение ширины (b) крайних пластин модуля и несущей балки (a) (рис. 6).

Совокупность измеренных величин составляет входные данные программы КП1. Входные данные трансформируются для обеспечения привязки всех измерений к единой базе, а также для перевода относительных показаний микрометрического винта позиционера в величины реальных габаритов модуля в точках промера. После проведения вычислений выходные данные сравниваются с заданными номинальными значениями.

В результате получается таблица значений отклонений положения поверхности модуля от номинала в точках измерения. На рис.8 показано топографическое «рельефное» изображение боковой поверхности модуля, построенное по данным, вычисленным при помощи программы КП1.

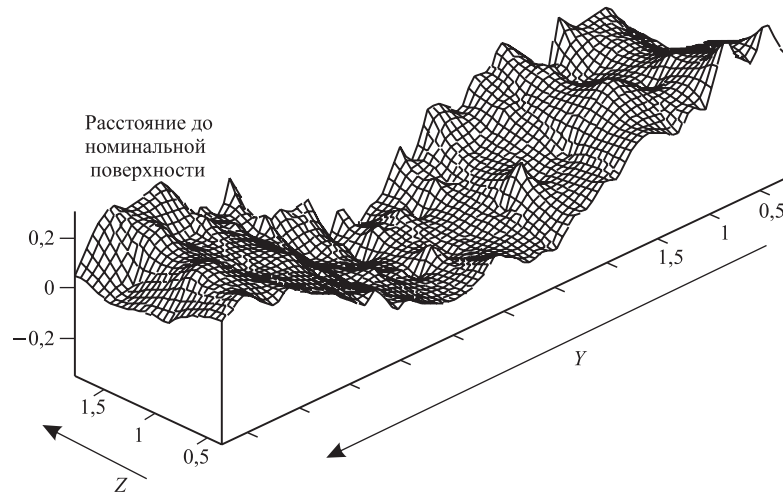


Рис. 8. Отклонения от номинальной поверхности (рельеф) одного из собранных модулей

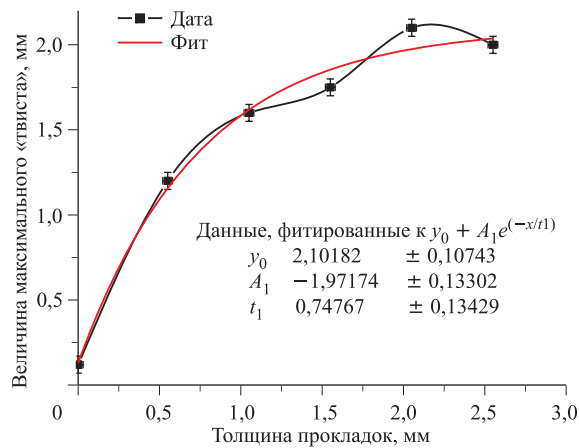


Рис. 9. Зависимость величины амплитуды «твиста» модуля от толщины прокладки под основанием балки

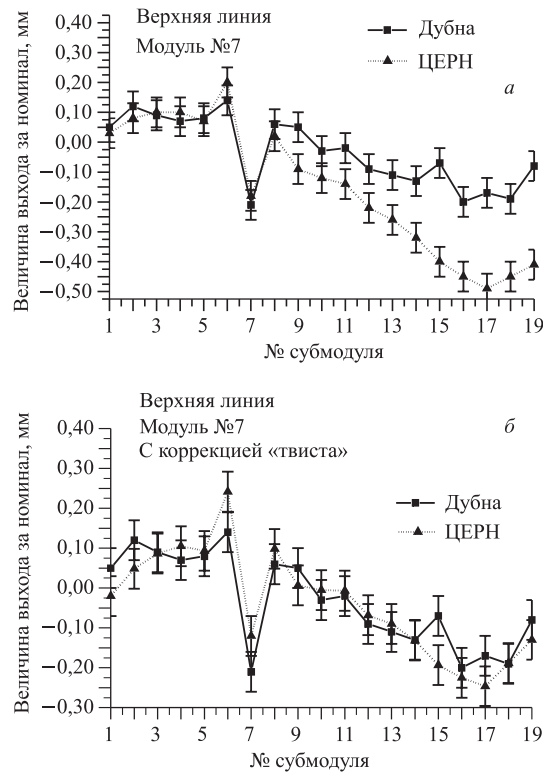


Рис. 10. Выходы боковой поверхности модуля № 7 за номинальные габариты по верхней линии измерений модуля в Дубне и ЦЕРН до (а) и после (б) коррекции «твиста»

Программа КП1 позволяет определить геометрию модуля с учетом его искривления (твист) вдоль его продольной оси [5]. Твистовая деформация модуля вдоль его продольной оси происходит при установке его на неплоскую поверхность (рис. 6). На практике «амплитуда твиста» может достигать величин 2–3 мм.

Была проведена серия контрольных измерений по определению величины наведенного твиста при контролируемом изменении величины неплоскостности основания. Анализ результатов выявил зависимость амплитуды твиста модуля вдоль его продольной оси от величины неплоскостности поверхности, на которой установлен модуль. При этом модуль находился на сборочном стапеле в свободном (незакрепленном) состоянии и прокладки устанавливались под один край нижнего основания модуля. Толщина прокладок изменялась в пределах 0–2,5 мм с шагом 0,5 мм. На рис. 9 представлена экспериментальная

зависимость величины твиста модуля от толщины прокладок. Зависимость носит нелинейный характер с эффектом насыщения величины твиста. Как видно из рис. 9, величина наведенного твиста стремится к некоторой постоянной величине ($\sim 2-3$ мм) при увеличении величины неплоскостности основания. Эта величина твиста находится в диапазоне измерений ЛИС, что в дальнейшем, после транспортировки модулей в ЦЕРН, позволило осуществлять их обмер вне зависимости от неплоскостности основания, на которое они были установлены.

В качестве иллюстрации на рис. 10 представлены графики величин отклонения габаритных размеров верхней части модуля №7 от номинального значения, полученные в Дубне после окончания строительства этого модуля и после транспортировки его в ЦЕРН. На рис. *a* — измерения ПЛ без учета твиста модуля, *b* — после коррекции на выявленную в ЦЕРН величину твиста модуля (0,33 мм). Величина совпадения пересчитанного положения ПЛ и измеренного составила $\sigma_{\text{сов}} = \pm 60$ мкм [4].

Применение программы КП1 позволило:

- 1) в процессе создания модулей исключить неизбежные при ручном об-счете ошибки и минимизировать временные затраты на паспортизацию готовых модулей;
- 2) реализовать выборочный контроль модулей после транспортировки в ЦЕРН с коррекцией данных измерений в зависимости от неизбежной неплоскостности поверхности, на которой устанавливался модуль;
- 3) создать базу данных, включающую контролируемые геометрические размеры как всех модулей центрального барреля, сделанных в Дубне, так и всех модулей Аргоннской национальной лаборатории.

База данных по геометрии модулей в дальнейшем использовалась для подготовки к сборке баррелей в расчетах величин межмодульных прокладок.

2. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПЕРЕД СБОРКОЙ БАРРЕЛЕЙ В ЦЕРН

Несмотря на то, что все модули были собраны по единой технологической схеме и удовлетворяли проектным требованиям, каждый модуль индивидуален (с точки зрения своих геометрических размеров) и в последующей сборной конструкции (барреле) будет занимать определенное место. Для контроля установки модуля в требуемое положение предварительно на торцевой его поверхности была произведена установка специальных метрологических реперных меток (РМ).

2.1. Обеспечение метрологического контроля модулей. Базовыми для трехмерной метрологии крупногабаритных объектов в ЦЕРН являются теодолитные измерения. При помощи цифровых тахеометров (теодолитов с интегрированным измерителем расстояний) определяются координаты РМ. Это осуществляется при помощи специальных метрологических приспособлений, устанавливаемых в высокоточное отверстие, расположенное в РМ. Точность определения координат РМ цифровым тахеометром составляет $\pm 0,2$ мм.

Для обеспечения трехмерного метрологического контроля баррелей адронного калориметра необходимо выставить РМ в номинальную позицию. Для этого основание РМ было конструктивно выполнено в виде юстируемой опоры с отверстием диаметром 8Н7 мм (рис. 11).

Было разработано и изготовлено в Словакии и в Дубне специальное оборудование, позволяющее устанавливать РМ на поверхности модулей с торцевых сторон с точностью ± 50 мкм. На рис. 12 представлена схема, по которой определялось положение РМ на торцах модуля в его узкой части (так называемые РМ внутреннего радиуса).

На основании базы данных геометрических размеров, полученных при помощи программы КП1, для каждого модуля определялись максимально выступающие с каждой стороны submodule. Установка РМ осуществлялась на оси, равноудаленной от максимального габарита с каждой стороны.

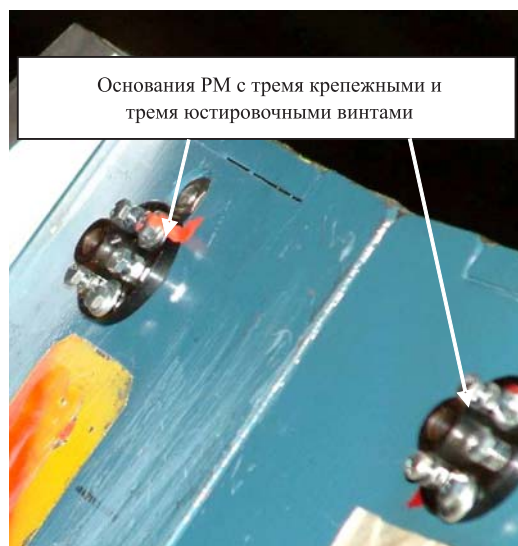


Рис. 11. Основания РМ на соседних модулях

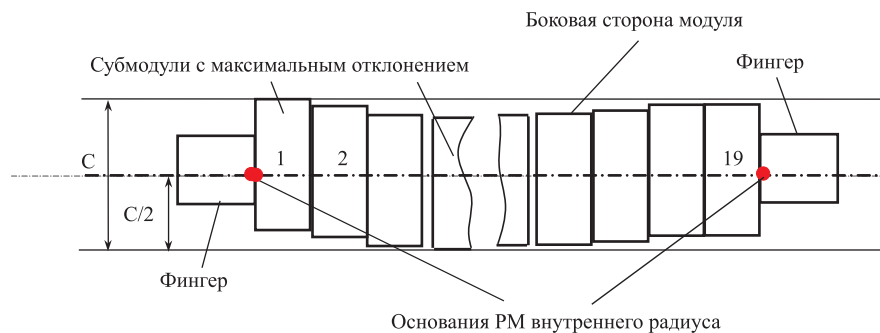


Рис. 12. Схема установки оснований РМ внутреннего радиуса (вид на модуль сверху)

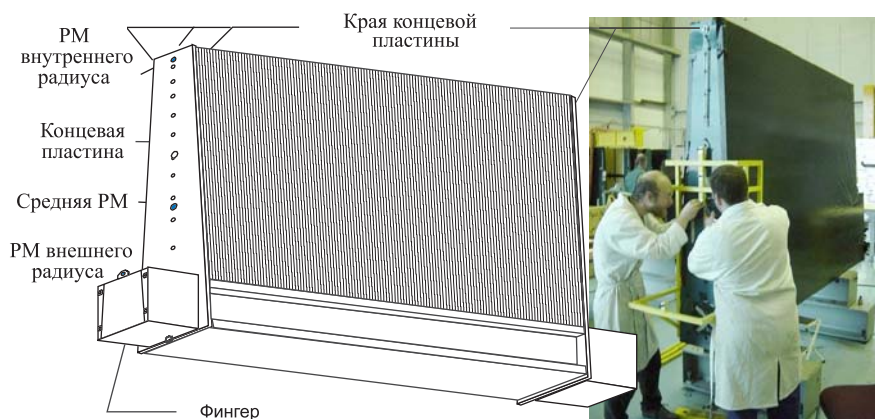


Рис. 13. Схема расположения оснований РМ на торце модуля

На рис. 13 показано устройство, обеспечившее установку РМ на фингере и в центре модуля. Центровка этих РМ происходила относительно нижнего основания несущей балки.

На рис. 14 представлены распределения отклонений δ_X , δ_Y , δ_Z координат РМ от номинальных значений. Координаты РМ были измерены теодолитным методом на каждом десятом модуле [5].

Из данных, представленных на рис. 14, видно, что величина среднеквадратичного отклонения отклонений координат РМ от номинального значения находится в пределах $\sigma_M = 0,2$ мм. Величина σ_M соответствует точности тео-

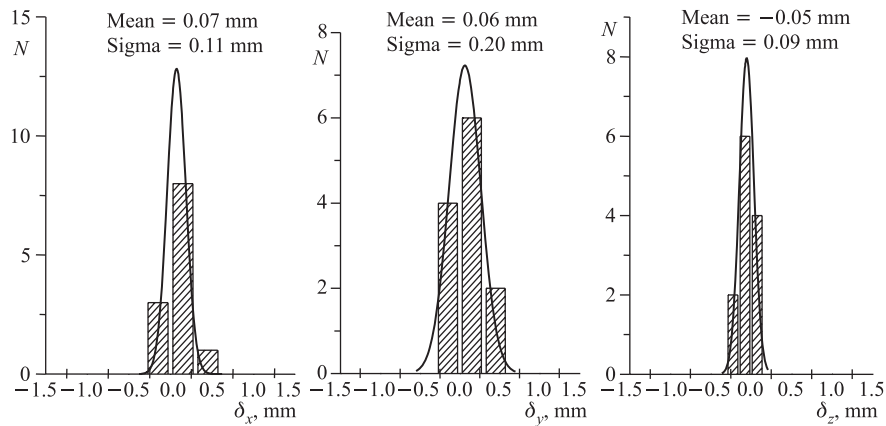


Рис. 14. Распределения отклонений δ_x , δ_y , δ_z координат РМ, установленных на модулях

долитных измерений, что говорит о возможности проведения контролируемой сборки барреля.

Были установлены 992 основания для РМ (шесть на каждом баррельном модуле и пять на каждом дополнительном баррельном модуле).

2.2. Расчет межмодульных зазоров. 64 модуля в собранном виде представляют собой «бочку» — так называемый баррель. Для сборки барреля были определены минимально допустимые конструкторские зазоры между модулями. Их появление мотивировалось недопустимостью повреждения световых волокон, находящихся вблизи боковых поверхностей модулей. Таким образом, неплоскостность боковой поверхности модуля явилась одним из определяющих факторов для расчета величины межмодульных зазоров и, соответственно, для расчета толщин металлических прокладок (шимм).

На величину неплоскостности боковой поверхности модуля влияют точность изготовления компонентов модуля и их взаимное расположение друг относительно друга. А именно:

- 1) Непрямолинейность несущей балки модуля (рис. 15).

Были проконтролированы (с помощью Minilevel — прибора, позволяющего измерять наклон поверхности относительно горизонтальной плоскости с точностью 10^{-5} рад) все балки центрального барреля и выявлены искривления, схематично показанные на рис. 15. Угол φ_G достигал 10^{-4} рад, что приводит к неплоскостности боковой поверхности модуля $D_{\text{нп}} = \pm 0,2$ мм.

- 2) Неточное (в поперечном направлении) положение субмодуля на балке $D_{\text{нс}} \pm 0,2$ мм.

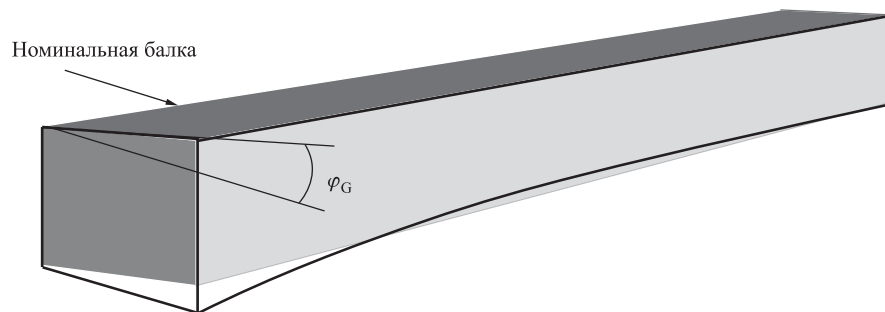


Рис. 15. Искривление формы несущей балки

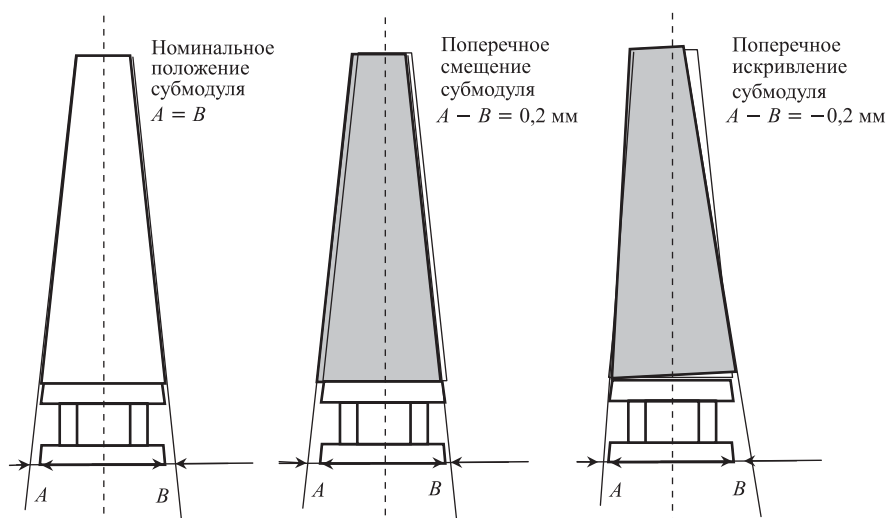


Рис. 16. Неопределенность положения субмодуля на балке

3) Искривление (в поперечном направлении) субмодуля $D_{тс} = \pm 0,2$ мм (рис. 16).

Таким образом, несмотря на высокую точность изготовления отдельных компонентов модуля (балка, субмодули), общая неплоскостность боковой поверхности модуля может составить величину $D_{он} = \pm 0,6$ мм.

Конструкторский зазор между модулями для внутреннего радиуса был назначен 1,5 мм (рис. 17). Этот размер определялся из величин максимальной

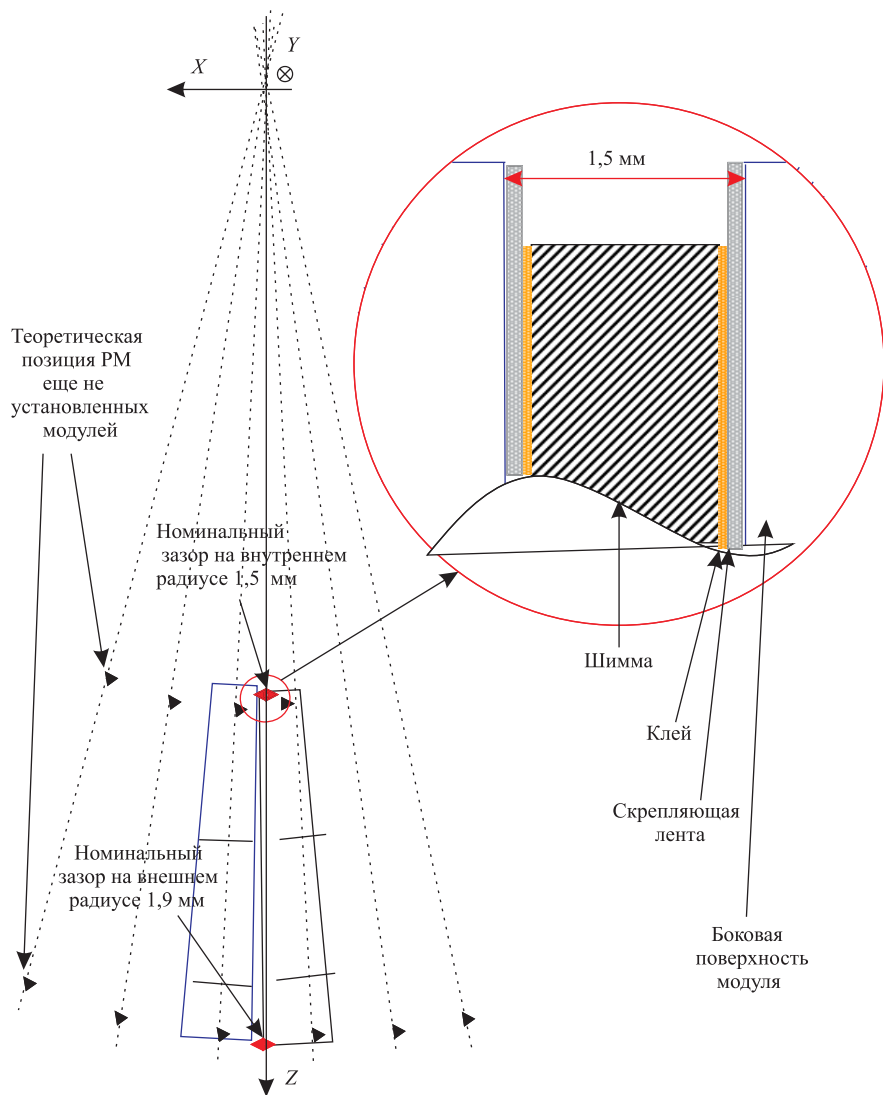


Рис. 17. Схемы установки двух модулей в координатной системе барреля и межмодульного зазора на внутреннем радиусе

неплоскостности двух боковых поверхностей соседних модулей ($2 \times 0,6$ мм), толщины скрепляющей ленты ($2 \times 0,1$ мм) величины неточности измерения ($0,1$ мм).

На внешнем радиусе номинальный зазор между модулями был определен по технологическим соображениям и составил величину 1,9 мм.

2.3. Компьютерная программа для расчета толщины шимм. В качестве прокладок между модулями были использованы калиброванные стальные пластины (шиммы).

Боковая поверхность модуля представляет собой «квазиплоскую поверхность», образованную боковыми поверхностями субмодулей.

Таким образом, величины зазоров при реальной сборке зависят от формы боковых поверхностей соседних модулей в тех местах, где будут установлены соединительные шиммы.

Для расчета толщины необходимых шимм на внутреннем и внешнем радиусах была разработана компьютерная программа КП2. На рис. 18. представлен ее алгоритм.

Входными блоками программы КП2 являются:

1. *Габариты* — величины габаритных размеров модулей, полученные из базы данных контролируемых геометрических размеров;

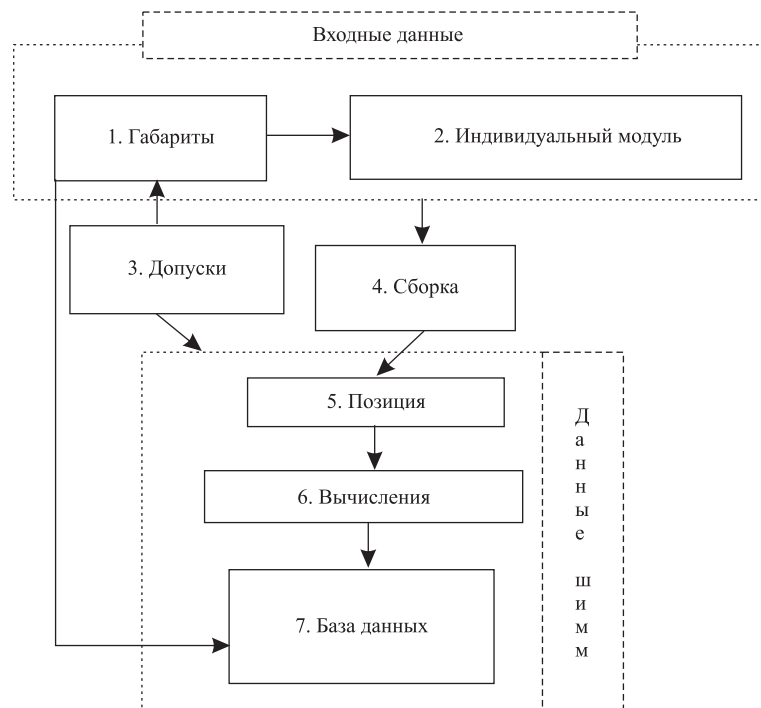


Рис. 18. Блок-схема алгоритма программы КП2

2. *Индивидуальных модуль* — величины выходов за номинальные габаритные значения каждого субмодуля (неплоскостность боковых поверхностей модуля);
3. *Допуски* — величины максимально возможных с конструктивной точки зрения выходов за номинальные значения межмодульных расстояний;
4. *Сборка* — предполагаемая последовательность установки модулей в ходе сборки барреля. Выбор был обусловлен технологией сборки баррелей;
5. *Позиция* — заранее установленное взаимное расположение модулей в барреле.

После введения данных по пунктам 1–5 производились вычисления и формировалась база данных величин толщин шимм внутреннего и внешнего радиусов для каждого модуля.

В качестве примера в рис. 19 представлена та часть базы данных, в которую занесены рассчитанные толщины шимм модуля IFA049 — 13-го по счету в процессе предварительной сборки испанского барреля. Реальные размеры шимм, устанавливаемых на модулях, округлялись до десятых долей миллиметра.

На рис. 20 представлены распределения рассчитанных толщин шимм внешнего и внутреннего радиусов для первого собранного на поверхности дополнительного барреля — Extended Barrel C. Вычисленные средние значения распределений позволили оценить толщины наиболее востребованных шимм, необходимых при сборке барреля.

| EBC MODULES CALCULATED SHIMS | Number | Label | Position | Side |
|---------------------------------|-----------------|--------|----------------|------|
| | 12 | IFA049 | 42 | R |
| | SPXO | STXO | SPXI | STXI |
| Shim position (SPXY) | P42IFA049_SP1O | 2.25 | P42IFA049_SP1I | 1.64 |
| Shim thickness (STXY) | P42IFA049_SP2O | 2.23 | P42IFA049_SP2I | 1.62 |
| Y = 0 for outed radius (GIRDER) | P42IFA049_SP3O | 2.24 | P42IFA049_SP3I | 1.63 |
| Y = 1 for inner radius (INNER) | P42IFA049_SP4O | 2.25 | P42IFA049_SP4I | 1.59 |
| X = from 1 to 10 for GIRDER | P42IFA049_SP5O | 2.25 | P42IFA049_SP5I | 1.49 |
| X = from 1 to 9 for INNER | P42IFA049_SP6O | 2.25 | P42IFA049_SP6I | 1.64 |
| | P42IFA049_SP7O | 2.25 | P42IFA049_SP7I | 1.64 |
| L/R MODULE side defined as | P42IFA049_SP8O | 2.27 | P42IFA049_SP8I | 1.71 |
| LEFT/RIGHT hand view from ITC | P42IFA049_SP9O | 2.34 | P42IFA049_SP8I | 1.63 |
| | P42IFA049_SP10O | 2.23 | | |

Рис. 19. Пример из базы данных с величинами рассчитанных толщин шимм для внешнего и внутреннего радиусов барселонского модуля IFA04

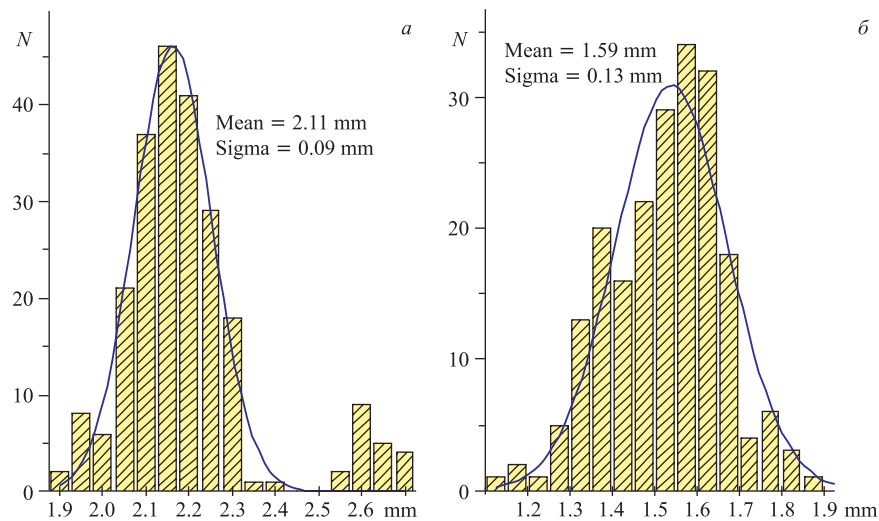


Рис. 20. Распределения толщин шимм для внешнего и внутреннего радиусов: рассчитанные толщины прокладок а) внешнего радиуса, б) внутреннего радиуса

Применение программы КП2 дало возможность рассчитать толщину всех шимм до начала предварительной сборки баррелей. По этим данным был определен количественный типоразмер шимм и осуществлен соответствующий заказ (вес заказанных шимм составил ~ 500 кг). По данным расчета произведена наклейка шимм на все модули.

3. СБОРКА МОДУЛЕЙ В БАРРЕЛИ

Сборка центрального и двух дополнительных баррелей калориметра первоначально произведена на поверхности земли (т.н. pre-assembly). Это было сделано для выявления трудностей в сборочных операциях и получения необходимого опыта, что в дальнейшем гарантировало успешную полномасштабную сборку калориметра под землей.

Для контроля геометрических размеров собираемого барреля измерялись координаты РМ установленных модулей. Измерение координат РМ осуществляется теодолитным методом. Этот метод, успешно развитый в ЦЕРН, дает высокую точность ($\sigma_T = \pm 0,2$ мм) в измерении координат РМ, но непосредственные измерения плюс обработка результатов теодолитных измерений и, следовательно, определение геометрии собранной части барреля, — достаточно трудоемкий и длительный процесс. Его производственный цикл в зависимости от количества собранных модулей занимает от одного до пяти

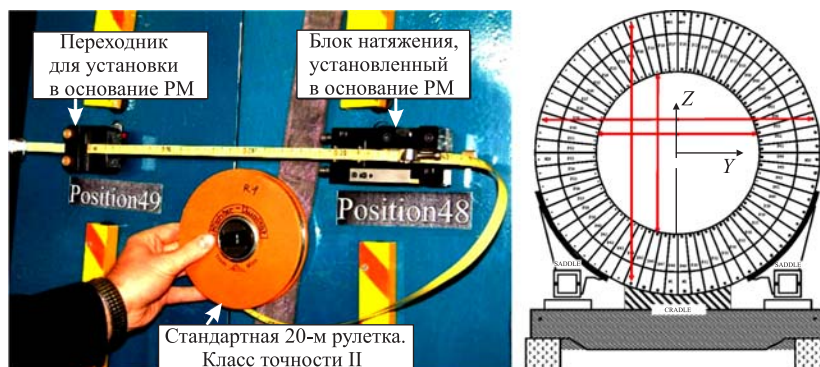


Рис. 21. Схема измерений прецизионной рулеткой

дней. Сборка барреля осуществлялась с темпом два модуля в день, а положение собранных и установленных модулей необходимо знать в день установки, чтобы скорректировать толщину прокладок для последующих модулей.

Возникла необходимость в разработке оперативного метода контроля за геометрией собираемого барреля.

Для определения положения РМ на модулях, собираемых в баррель, и оценки формы собранной части барреля, помимо использования данных измерений, полученных с помощью теодолита, был разработан и применен оперативный метрологический контроль, основанный на использовании прецизионной рулетки.

Предложенный метод подробно описан в работе [4]. Суть метода: после установки каждой новой пары модулей проводятся контрольные измерения прецизионной рулеткой горизонтальных и вертикальных расстояний между РМ (рис. 20). Точность 0,5 мм для расстояний до 10 м была обеспечена постоянной силой натяжения измерительного полотна и калибровкой данного устройства в метрологической лаборатории ЦЕРН с помощью интерферометра. Данные измерений сравнивались с номинальными значениями и затем производилась оперативная оценка формы собранной части барреля.

На рис. 22, 23 представлены результаты сравнения разностей измерений $D_{\text{изм}}$ (проведенных двумя способами — теодолитным и с помощью прецизионной рулетки) и номинальных горизонтальных расстояний $D_{\text{ном}}$ между РМ внутреннего радиуса первых 12 модулей в барреле. Данные измерений, полученные с помощью рулетки и теодолита, совпали с точностью $\approx 0,7$ мм, что явилось вполне достаточным для оперативного отслеживания изменения формы собираемого барреля. Анализ результатов измерений горизонтальных расстояний, проводимых с помощью прецизионной рулетки после установки каждых двух новых модулей, позволил непрерывно контролировать и в по-

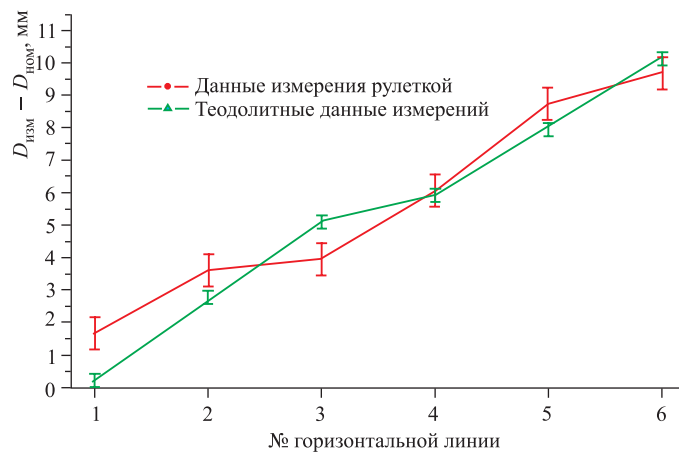


Рис. 22. Сравнение измерений прецизионной рулеткой и теодолитным методом

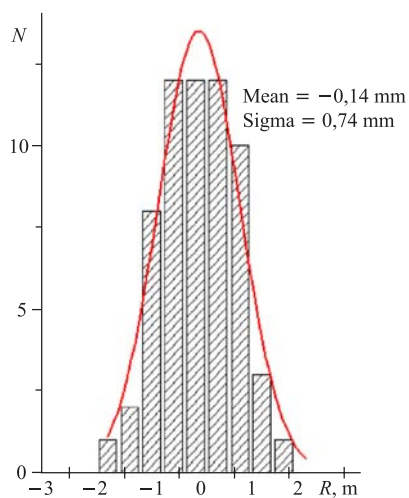


Рис. 23. Гистограмма величин разности измерений R прецизионной рулеткой и теодолитным методом

следующем корректировать с помощью шимм положение следующих устанавливаемых модулей.

Благодаря непрерывному контролю горизонтальных расстояний между собранными модулями с помощью прецизионной рулетки было обнаружено искажение формы барреля — «схлопывание». При установке дополнитель-



Рис. 24. Зависимость величин деформаций шимм от их расположения в собранном барреле

ных секций в ходе предварительной сборки на поверхности земли происходило уменьшение горизонтальных расстояний относительно номинальных размеров. На этапе, когда было собрано 44 модуля, разница между измеренными горизонтальными расстояниями и номинальными значениями достигла $D_{изм} - D_{ном} = 17$ мм. Было принято решение приостановить сборку барреля.

Причиной такого катастрофического «схлопывания» оказались неожиданные значительные пластические деформации стальных прокладок внутреннего радиуса между модулями [7]. Под нагрузкой новых установленных модулей межмодульные прокладки внутреннего радиуса деформировались неровностями боковых поверхностей мастерных пластин, прилегающих к прокладке с обеих сторон. При этом расстояние между ранее установленными модулями постоянно уменьшалось, что, в конечном итоге, привело к «схлопыванию» собранной части барреля.

На рис. 24 представлена зависимость величины деформации шимм от номера установленного модуля.

Как видно из графика, повсеместно наблюдаются деформации шимм в пределах 0,2–0,4 мм с пиком в области половинной сборки 1 мм. Эти деформации обнаруживаются после установки 5, 6 модулей над данным модулем с исследуемой прокладкой. После предварительной сборки первого барреля были измерены расстояния между РМ внутреннего радиуса всех модулей и получены величины деформаций установленных шимм.

Возникла крайняя необходимость проведения предсказательного расчета эволюции геометрии барреля (изменения его формы) вследствие деформации шимм внутреннего радиуса.

Для этих целей был разработан специальный метод определения геометрии баррельной сборки. Его суть состоит в вычислении при помощи специальной программы геометрического положения меток на барреле исходя из измеренных при помощи цифрового штангенциркуля расстояний (точность 30 мкм для расстояний до 450 мм) (рис. 24) между РМ двух соседних модулями и ожидаемой деформации шимм на устанавливаемых модулях.

3.1. КПЗа — компьютерная программа определения положения модулей в барреле. Расстояния между РМ соседних модулей на одном радиусе, измеренные штангенциркулем, обрабатывались «программой реконструкции» — КПЗ. Ее выходные данные представляют собой координаты РМ.

Описание используемой системы координат и пояснения с расчетными формулами представлено в приложении 3.

Были проведены контрольные сравнения отличия горизонтальных расстояний (рис. 21) от номинальных значений, рассчитанных при помощи программы КПЗа и измеренных прецизионной рулеткой. Результаты сравнения представлены на рис. 25.

Расхождение измеренных и рассчитанных величин не превосходит 0,5 мм. Это позволяет оценить точность метода с использованием программы реконструкции не хуже $\pm 0,5$ мм.

Таким образом, главный результат, достигнутый благодаря разработке и применению программы КПЗа, заключается в определении координат РМ тех модулей, которые уже установлены в баррель и, соответственно, в возможности на основании полученных данных оперативно оценивать эволюцию формы собираемого барреля.

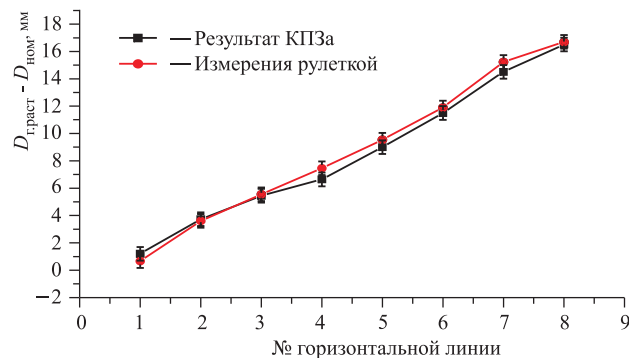


Рис. 25. Зависимость величин $D_{гор.раст.} - D_{ном.}$, вычисленных при помощи программы КПЗа и измеренных прецизионной рулеткой, от номера горизонтальной линии

3.2. КПЗ6 — компьютерная программа расчета предполагаемой геометрии барреля в зависимости от толщины шпимм и величин их деформации. Для сборки последующих баррелей, а также для коррекции формы первого барреля при его финальной сборке в подземном экспериментальном зале UX15 (Underground eXperiment) потребовалось разработать модифицированную программу для расчета геометрии барреля. Программа должна предсказывать форму собранного барреля с использованием полученной в ходе предсборки информации о величинах деформаций межмодульных прокладок. Эта задача была решена при помощи программы КПЗ6.

Входными данными программы КПЗ6 являются:

- величины зазоров между собранными модулями, полученные из сравнения измеренных величин расстояний между РМ соседних модулей с их номинальными значениями;

- толщина прокладок и величина их деформации, которые *предположительно* будут иметь место для той части барреля, которую еще предстоит собрать (рис. 24);

- на основе данных (рис. 23) предполагаемое уменьшение толщины прокладок на уже собранной части барреля за счет увеличения на них нагрузки в процессе увеличения количества модулей на собираемом барреле.

В итоге программа КПЗ6:

- вычисляет координаты всех РМ на собранной части барреля;

- определяет различия между проектными и рассчитанными значениями горизонтальных и вертикальных расстояний между РМ модулей на собранной части барреля;

- определяет (прогнозирует) координаты РМ для будущей, еще не собранной, части барреля; при этом заново определяются координаты РМ на собранной части барреля.

Для демонстрации работы программы КПЗ6 приведем данные, полученные с ее помощью в период финальной части предсборки барреля [7].

На рис. 26 представлены графики разности между номинальными горизонтальными расстояниями РМ внутреннего радиуса и

a — горизонтальными расстояниями собранных 56 модулей,

b — горизонтальными расстояниями собранных 60 модулей,

c — горизонтальными расстояниями собранных 62 модулей,

d — предсказанными горизонтальными расстояниями в тот момент, когда было собрано 56 модулей, с учетом уже существующих и предполагаемых дополнительных пластических деформаций межмодульных прокладок,

e — предсказанными горизонтальными расстояниями в тот момент, когда было собрано 60 модулей, с учетом уже существующих и предполагаемых дополнительных пластических деформаций межмодульных прокладок.

Как видно из рис. 26, по мере установки последних модулей горизонтальные расстояния между РМ приближаются к своим номинальным значениям, и

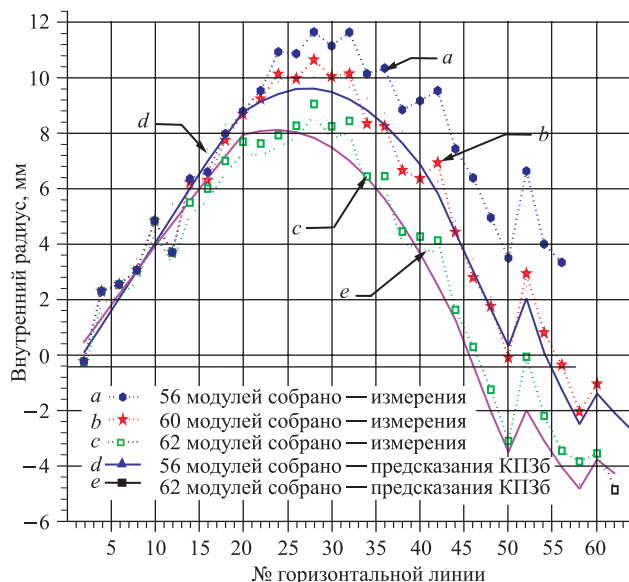


Рис. 26. Предсказания программы КПЗ6 на этапе установки 56 и 62 модулей

окончательная фаза сборки барреля при установке 62-го модуля имеет отклонение от номинальных размеров ± 5 мм. Соответствие формы графиков *b* и *d*, а также *c* и *e* подтверждает правильность предсказаний изменения формы барреля, полученных с помощью программы КПЗ6.

Результаты, полученные программой, представляются в системе координат, отличной от метрологической системы координат, используемой в теодолитном методе. Описание обеих координатных систем приведено в приложении 2.

Фактически сборка баррелей производилась при помощи:

- 1) оперативного метода (измерение межмодульных и горизонтальных расстояний и использование программ КПЗа-б.). Он позволил контролировать форму собираемой части барреля в промежутках между установкой очередной пары модулей и проводить сборку в предсказательном режиме;
- 2) теодолитного метода, который применялся на пяти контрольных этапах сборки барреля и подтверждал правильность выбранной стратегии. С помощью теодолитного метода был проведен финальный контроль геометрии всех собранных баррелей.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КООРДИНАТ РМ ПОСЛЕ СБОРКИ БАРРЕЛЕЙ

Финальные контрольные измерения всех собранных в подземном экспериментальном зале UX15 баррелей показали соответствие измеренной формы баррелей с номинальной не хуже ± 10 мм, что соответствует принятым допускам.

На рис. 27 представлены результаты финальных контрольных измерений одного из внешних баррелей. Черные точки — положение РМ, соответствующее номинальным координатам на одном из торцов; векторы, исходящие из точек, указывают направление и величину смещения РМ от проектного положения. Масштабная шкала величины указанного смещения расположена в верхнем левом углу рисунка.

Используя координаты РМ, расположенных на одном радиусе, при помощи метода best fit transformation (трансформация с наилучшим результатом соответствия) определяли окружность и положение ее центра. В табл. 1 представлены координаты центров Extended Barrel C (EBC) — дополнительного барреля с двух сторон — в локальной системе координат, связанной с внутренним детектором.

Представленные в табл. 2 результаты вычислений координат центров симметрии EBC показывают соответствие его оси в пределах 1 мм относительного проектного значения, что соответствует допускам, установленным в техническом задании.

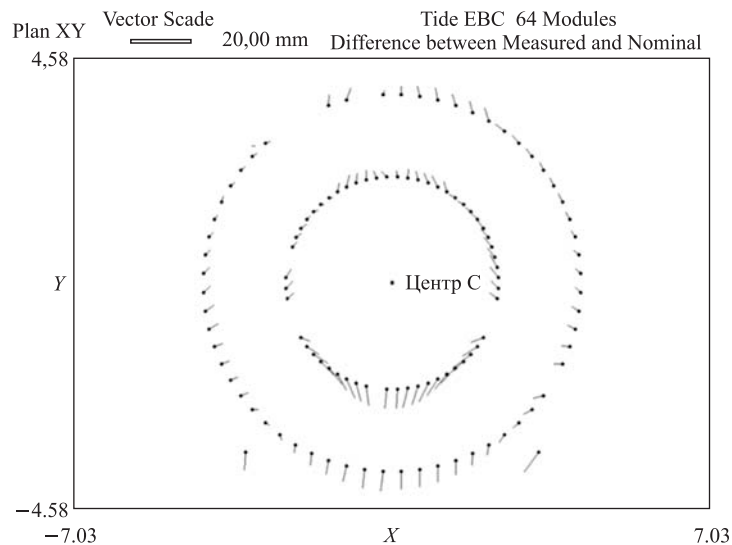


Рис. 27. Результаты финальных контрольных измерений дополнительного барреля С

Таблица 1. Координаты центров А и С торцевых поверхностей ЕВС

| Центр | Измеренные величины | | | Номинальные значения | | | Измерение — номинал | | |
|-------|---------------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-------|-------|
| | $X_{phys},$ м | $Y_{phys},$ м | $Z_{phys},$ м | $X_{nom},$ м | $Y_{nom},$ м | $Z_{nom},$ м | $DX,$ | $DY,$ | $DZ,$ |
| А | -0,0006 | -0,0012 | 2,8087 | 0,0000 | 0,0000 | 2,8080 | -0,6 | -1,2 | 0,7 |
| С | 0,0008 | -0,0005 | -2,8095 | 0,0000 | 0,0000 | -2,8102 | 0,8 | -0,5 | 0,7 |

Таблица 2. Координаты центров симметрии торцевых поверхностей барреля после юстировки

| Центр | Измеренные величины | | | Номинальные значения | | | Измерение — номинал | | |
|-------|---------------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-------|-------|
| | $X_{phys},$ м | $Y_{phys},$ м | $Z_{phys},$ м | $X_{nom},$ м | $Y_{nom},$ м | $Z_{nom},$ м | $DX,$ | $DY,$ | $DZ,$ |
| А | -0,0006 | -0,0012 | 2,8087 | 0,0001 | 0,0017 | 2,8080 | -0,7 | 0,5 | 0,7 |
| С | 0,0008 | -0,0005 | -2,8095 | 0,0005 | 0,0007 | -2,8102 | 0,3 | 0,2 | 0,7 |

При дальнейшей эксплуатации будут проводиться регулярные измерения положения центрального барреля. Обнаруженные изменения будут использованы в расчетах по переопределению реального положения детекторов относительно пучка ЛНС.

Одной из основных целей измерения координат РМ собранных баррелей является расчет координат центров их торцевых поверхностей и последующая юстировка осей симметрии баррелей относительно будущего пучка ЛНС.

Полномасштабные измерения координат РМ баррелей производились после завершения финальной сборки. В связи с большой трудоемкостью процесса измерений в центральной области установки АТЛАС измерения проводились только один раз. В дальнейшем на основании контрольных измерений координат нескольких РМ производился перерасчет расположения всех РМ и рассчитанных ранее центров симметрии торцевых поверхностей, определяющих оси симметрии баррелей. Для юстировки баррелей относительно будущего пучка ЛНС необходима «привязка» к системе координат (приложение 2), связанной с будущим пучком ЛНС. Определение положения баррелей возможно при од-



Рис. 28. Базовая реперная точка

новременном измерении координат РМ и координат фиксированных геодезических точек, закрепленных на стенах и на полу UX15, которые связаны с координатами будущего пучка LHC. Процедура привязки геометрического положения баррелей к пучку LHC осуществляется периодически (примерно два раза в год). Все измерения производятся относительно базовой реперной метки (БРМ). БРМ установлена на 15-метровом основании, которое закреплено в скальном грунте и расположено вне экспериментального подземного зала (рис. 29).

В табл. 2 представлены координаты центров барреля с двух сторон — А и С подземного экспериментального зала UX15 после юстировки в системе координат, связанной с будущим пучком LHC. Также в последней колонке показаны данные сравнения с номинальными величинами, рассчитанными с учетом ожидаемых деформаций всей установки АТЛАС в процессе дальнейшей инсталляции других элементов (внутренний детектор, внешние мюонные камеры). Точность определения координат центров барреля составила $\pm 0,7$ мм, что находится в соответствии с принятыми проектными допусками.

5. ВЫВОДЫ

В процессе создания адронного калориметра АТЛАС последовательно возникали задачи метрологического обеспечения контроля качества как составных элементов установки, так и в последующем ее предсборки и окончательной сборки. На всех этапах разрабатывались и применялись различные метрологические технологии, которые позволили осуществлять выпуск продукции ритмично и с необходимыми высокими точностными характеристиками.

Были разработаны метрологические методы контроля:

— сборки составных частей модуля адронного калориметра АТЛАС — спейсеров, мастерных плит, субмодулей. Их применение обеспечило выпуск продукции с необходимыми точностными характеристиками;

— сборки баррельных модулей адронного калориметра АТЛАС с применением новой лазерной методики — лазерной измерительной системы. В результате использования ЛИС и вычислительной программы КП1 удалось в сжатые сроки, отведенные на изготовление модулей, произвести их сборку со средней точностью, в два раза превышавшую принятые допуски на изготовление модулей;

— сборки барреля адронного калориметра АТЛАС. Применение программы расчета межмодульных зазоров КП2 позволило заранее установить на модули шиммы с вычисленными толщинами, что обеспечило возможность проведения контролируемой сборки.

Кульминационным моментом стало проведение сборки самого адронного калориметра АТЛАС. Вследствие явления деформации прокладок между модулями сборку необходимо было производить в режиме непрерывно изменяющейся геометрической формы. В сжатые сроки были разработаны необходимые методы on-line геометрического контроля, созданы необходимые алгоритмы и написаны программы предсказательной сборки калориметра. Применение вычислительных программ КПЗа и КПЗб позволило не только провести предсказательную сборку баррелей в условиях деформации межмодульных шимм, но и, в случае окончательной сборки баррелей на пучке ЛНС, исправить ошибки, допущенные в ходе предварительныхборок.

В конечном итоге, представленные в статье разработанные аппаратно-программные методы контролируемой сборки адронного тайл-калориметра установки АТЛАС решающим образом способствовали окончательной успешной сборке комплекса адронного калориметра АТЛАС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты получены в ходе работ, осуществленных за десятилетие 1999–2009 г. в рамках исследований, выполняемых ОИЯИ в соответствии с соглашением о сотрудничестве ОИЯИ–ЦЕРН в эксперименте ЛНС на установке АТЛАС.

Авторы благодарят проф. Ю. А. Будагова за повседневное научное руководство, а также руководителя метрологической группы ЦЕРН К. Лассера и его сотрудников за техническую поддержку и помощь в исследованиях.

Приложение 1

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Балка несущая (girder) — основной силовой элемент модуля. Балка служит основанием (опорой) для установки *субмодулей* и их соединения в единое целое.

Баррель (barrel) — центральная часть адронного калориметра. Баррель состоит из 64 дубненских модулей длиной 6,4 м. При сборке барреля модули крепятся друг с другом на внешнем радиусе *соединительными плитами*.

ЕВА — см. *дополнительный американский баррель*.

ЕВС — см. *дополнительный испанский баррель*.

Дополнительный баррель (эндкап) — extended barrel (end cup) — короткий баррель, примыкающий к центральному баррелю с двух сторон по оси пучка; различают дополнительный баррель А (ЕВА, собранный из американских модулей) и дополнительный баррель С (ЕВС, собранный из испанских модулей).

Драйвер (driver) — металлическая стойка (крейт), несущая ФЭУ и считывающую электронику. Располагается внутри несущей балки модуля (girder).

КП1, КП2, КП3а, КП3б — компьютерные программы, созданные для расчета геометрии модулей и толщин приклеиваемых шимм, а также для предсказательного расчета положения модулей в барреле.

Модуль (module) — основная сборочная единица для сборки баррелей. Модуль центрального барреля имеет длину 6,4 м и состоит из 19 *субмодулей*, установленных на *несущую балку*. Торцы модулей закрывают *концевые плиты*, а по верху модуля ко всем *субмодулям* приварена *передняя плита*. Модули *экстендид-баррелей* вдвое короче и содержат 10 *субмодулей*. К *концевым плитам* у основания модулей крепятся *фингеры*.

Плита концевая или конечная (end plate) — элемент конструкции модуля. Концевые плиты, изготовленные из стали, толщиной 20 мм устанавливаются по торцам модуля и служат для защиты сцинтилляционных пластин в модуле от внешнего магнитного поля.

Плита мастерная (master plate) — 5-мм стальные плиты трапециевидной формы длиной 1602 мм. Мастерные и *спейсерные плиты* являются основными элементами конструкции *субмодулей*. Для всего адронного калориметра установки АТЛАС было изготовлено 81 600 штук мастерных плит.

Плита передняя (front plate) — элемент конструкции модуля. Передние плиты, изготовленные из стали, толщиной 10 мм и шириной 125 мм привариваются по верху модуля по всей его длине и служат для соединения *субмодулей* в единое целое.

Плита спейсерная (spacer plate) — 4-мм стальные плиты трапециевидной формы 12 типоразмеров. Спейсерные плиты (как и *мастерные*) являются основными элементами конструкции *субмодулей*. Для всего адронного калориметра установки АТЛАС было изготовлено 40 800 штук наборов спейсерных плит (12 типоразмеров) или около 500 000 отдельных единиц.

Седло (saddle) — специальные опоры, служащие для установки барреля на рельсы детектора АТЛАС.

Субмодуль (submodule) — составной элемент модуля трапециевидной формы, толщиной около 300 мм и длиной 1602 мм. Субмодуль состоит из фиксированного набора *мастерных плит*, разделенных между собой *спейсерными плитами*, установленных послойно с зазорами в шахматном порядке.

Трансформация с наилучшим результатом соответствия (best fit transformation) — пересчет координат измеренных точек объекта в случае, когда по каким либо причинам повторные измерения содержат лишь часть первоначальных измерений. Повторные измерения принимаются за основу — базу, а первоначальные трансформируются в новую базу с наилучшим результатом соответствия.

Фидуализирующая (реперная) метка (RM) — это реперная точка для теодолитных или иных измерений, конструктивно выполненная в виде неко-

торой опоры с отверстием диаметром 8Н6 мм для установки измерительных приспособлений.

Фингер (finger) — элемент модуля, служит для установки в нем источника питания, а также является магнитопроводом между баррелем и *экс-тендид-баррелями*.

Шимма — пластина (или набор пластин) нужной толщины и с размерами 30×200 мм. Шиммы устанавливаются на внешнем и внутреннем радиусах барреля для создания необходимого технологического воздушного зазора между модулями.

Шимма радиальная — 3-мм пластина 205×700 мм, устанавливаемая между внешней плоскостью *несущей балки модуля* и *соединительной плитой*. Радиальные шиммы служат для технологического увеличения радиуса барреля и, в итоге, увеличивают зазор для установки последнего модуля.

Приложение 2

КООРДИНАТНЫЕ СИСТЕМЫ

Метрологическая система координат [8]. Введем метрологическую (survey) координатную систему, используемую в теодолитных измерениях в процессе сборки баррелей. Выбор такой системы координат был обусловлен тем, что для теодолитных измерений реперными (базовыми) точками являлись РМ (CRADJB, CRADJG, CRADSG, CRADSB), зафиксированные на углах несущего основания (см рис. 29).

- *Начало координат O*: определяется теоретическим положением пересечения внешнего радиуса барреля с центром симметрии несущего основания (Cradle), на котром закрепляются первые 10 модулей.
- *Ось Y_{su}* : горизонтальна и совпадает с продольной осью симметрии несущего основания.
- *Ось X_{su}* : расположена в горизонтальной плоскости, перпендикулярна оси Y и проходит через начало координат.
- *Ось Z_{su}* вертикальна, перпендикулярна к плоскости XU , направлена вверх. (Более подробно метрологическая система координат описана в <https://edms.cern.ch/document/367157/1> EDMS number: ATL-LE-UR-0031.

Координатная система, используемая программой КПЗ. Система координат двумерна и имеет две координаты Y_P и Z_P , которые располагаются в плоскости P , параллельной плоскости расположения координат Y_{SU} , Y_{SU} **Survey** координатной системы. Плоскость P включает в себя ось X_{SU} на номинальном расстоянии расположения РМ радиусов Inner и Middle.

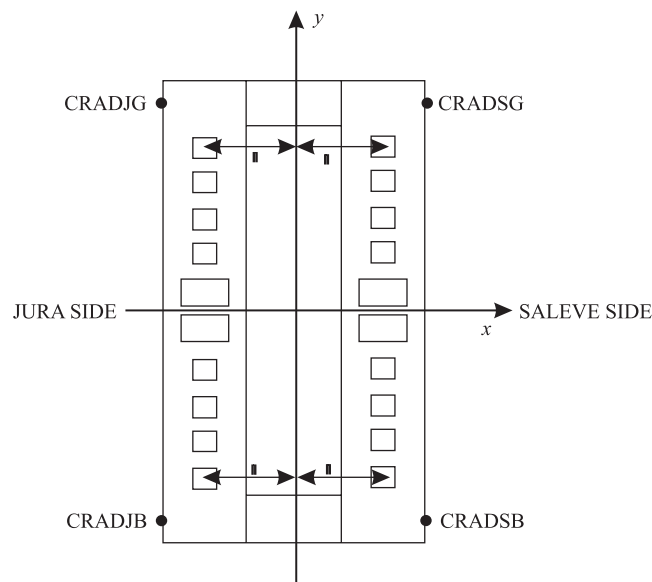


Рис. 29. Метрологическая (survey) система координат (вид сверху)

Определим координатные оси Y_P и Z_P :

Вертикальная ось Z_P — линия, проходящая через середины расстояний между РМ-радиусами Inner и Middle первых двух модулей, установленных на Cradle.

Ось Y_P — линия, перпендикулярная оси Z_P и проходящая через центр координат.

Центр координат располагается на расстоянии $R = 8320$ мм по оси Z_P от точки С — центра соединения оснований первых двух модулей.

На рис. 30 показана плоскость P с расположением в ней торцевых частей первых двух модулей.

На фингере РМ располагается на другом расстоянии по оси X_{SU} , нежели РМ Inner- и Middle-радиусы. РМ на фингере переносится в плоскость P . Для каждой торцевой стороны барреля по вышеприведенной схеме вводится своя координатная система, используемая программой.

Существуют различия между системой координат, используемой программой, и *Survey*:

1. В силу того, что вертикальные оси первых двух модулей могут быть установлены не симметрично относительно направления силы тяжести, вертикальная ось *Survey* не всегда проходит через середину верхнего и

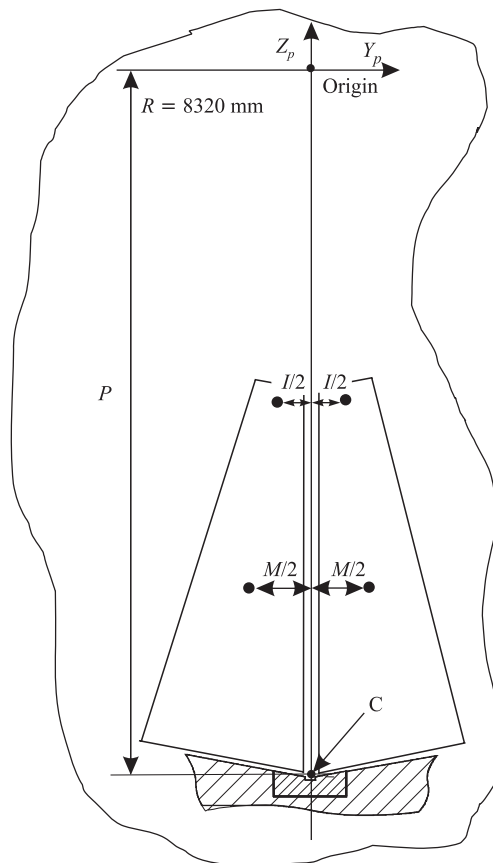


Рис. 30. Координатная система КПЗ

нижнего межмодульных зазоров. Т.е. существует угловое рассогласование систем координат в вертикальной плоскости.

2. При установке первых двух модулей со сдвижкой вдоль горизонтальной оси существует дополнительное к рис. 30) линейное смещение начал систем координат.

Метрологическая система координат в подземном экспериментальном зале UX15:

- *Origin*: IP (interaction point) точка пересечения пучков LHC;

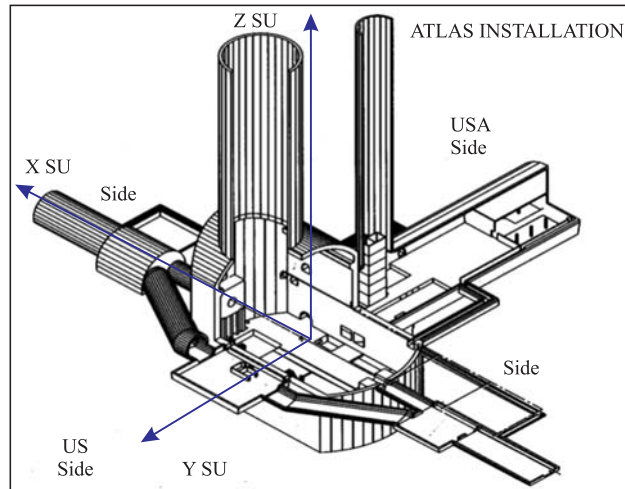


Рис. 31. Метрологическая система координат в подземном экспериментальном зале UX15

- X_{SU} : горизонтальна, расположена вдоль пучка, положительна в направлении стороны A;
- Y_{SU} : горизонтальна, перпендикулярна плоскости XZ (Survey), положительна в направлении центра LHC;
- Z_{SU} : вертикальна, перпендикулярна плоскости XY (Survey), положительна в направлении вверх.

Приложение 3

РАСЧЕТ КООРДИНАТ РМ ПРОГРАММОЙ КПЗ

Входные данные программы рис. 31:

$D^{inn}(i; i + 2)$ — расстояния, измеренные между РМ в узкой части (внутренний радиус барреля) соседних модулей, где i — порядковый номер модуля в сборке.

$D_{nom(t)}^{inn}$ — номинальные горизонтальные расстояния между РМ в узкой части (внутренний радиус барреля) двух модулей в сборке. $t = 2$ для двух первых модулей, $t = 4$ для третьего и четвертого модуля и т. д.

$R^{inn}; R^{out}$ — номинальные расстояния от центра координат до РМ внутреннего и внешнего радиусов.

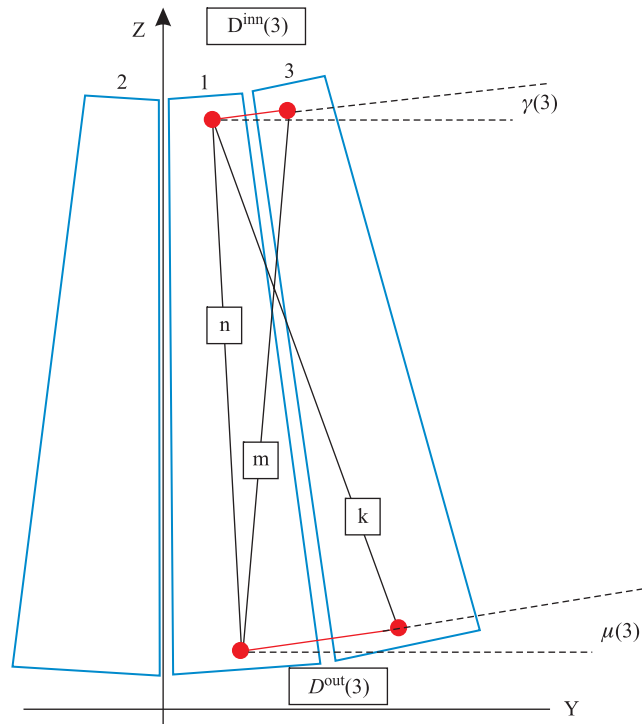


Рис. 32. Схема расчета расстояний программой КПЗ

Расчет координат РМ двух первых модулей:

$$\begin{aligned}
 Y^{\text{inn}}(1) &= D^{\text{inn}}(1;2)/2 & Y^{\text{out}}(1) &= D^{\text{out}}(1;2)/2, \\
 Z^{\text{inn}}(1) &= -R^{\text{inn}} \times \cos(\alpha) & Z^{\text{out}}(1) &= -R^{\text{out}} \times \cos(\beta), \\
 \alpha &= \text{tg}(Y^{\text{inn}}(1)/R^{\text{inn}}) & \beta &= \text{tg}(Y^{\text{out}}(1)/R^{\text{out}}), \\
 Y^{\text{inn}}(2) &= -D^{\text{inn}}(1;2)/2 & Y^{\text{out}}(1) &= -D^{\text{out}}(1;2)/2, \\
 Z^{\text{inn}}(2) &= -R^{\text{inn}} \times \cos(\alpha) & Z^{\text{out}}(2) &= -R^{\text{out}} \times \cos(\beta), \\
 \alpha &= \text{tg}(Y^{\text{inn}}(1)/R^{\text{inn}}) & \beta &= \text{tg}(Y^{\text{out}}(1)/R^{\text{out}}).
 \end{aligned}$$

Расчет координат РМ следующих модулей ($t = 3,63$ шаг 2):

$$\begin{aligned}
 Y^{\text{inn}}(t) &= Y^{\text{inn}}(t-2) + D^{\text{inn}}(t; t-2) \times \cos(\gamma(t)), \\
 Z^{\text{inn}}(t) &= Z^{\text{inn}}(t-2) + D^{\text{inn}}(t; t-2) \times \sin(\gamma(t)), \\
 \gamma(t) &= \text{tg}(Y^{\text{out}}(t-2) - Y^{\text{inn}}(t-2) / (Z^{\text{out}}(t-2) - Z^{\text{inn}}(t-2)) + \delta(t) - 90^\circ, \\
 \delta(t) &= \text{acos}((D^{\text{inn}}(t; t-2)^2 + n^2 - m^2) / (2 \times D^{\text{inn}}(t; t-2) \times n), \\
 n &= \text{sqrt}((Y^{\text{out}}(t-2) - Y^{\text{inn}}(t-2))^2 + (Z^{\text{out}}(t-2) - Z^{\text{inn}}(t-2))^2), \\
 m &= \text{sqrt}((Y^{\text{inn}}(3)_{\text{nom}} - Y^{\text{inn}}(1))^2 + (Z^{\text{out}}(1) - Z^{\text{inn}}(3))^2), \\
 Y^{\text{out}}(t) &= Y^{\text{out}}(t-2) + D^{\text{out}}(t; t-2) \times \cos(\mu(t)),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z^{\text{out}}(t) &= Z^{\text{out}}(t-2) + D^{\text{out}}(t; t-2) \times \sin(\mu(t)), \\
\mu(t) &= 180^\circ - \varepsilon(t), \\
\varepsilon(t) &= \arccos((D^{\text{out}}(t; t-2)^2 + n^2 - k^2)/2 \times D^{\text{out}}(t; t-2) \times n), \\
n &= \sqrt{((Y^{\text{out}}(t-2) - Y^{\text{inn}}(t-2))^2 + (Z^{\text{out}}(t-2) - Z^{\text{inn}}(t-2))^2)}, \\
k &= \sqrt{((Y^{\text{out}}(3)_{\text{nom}} - Y^{\text{inn}}(1))^2 + (Z^{\text{out}}(3) - Z^{\text{inn}}(1))^2)}.
\end{aligned}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. *Armstrong W. W. et al.* Atlas. Technical Proposal. CERN/LHC/94-43, 1994.
2. *Alikov B. A. et al.* ATLAS Barrel Hadron Calorimeter: General Manufacturing Concepts for 300000 Absorber Plates Mass Production. JINR, E13-98-135, 1998.
3. *Artikov A. M. et al.* ATLAS Barrel Hadron Tile Calorimeter: Spacers Plates Mass Production. JINR, E1-99-79, 1999.
4. *Batusov V. et al.* High Precision Laser Control of the ATLAS Tile-Calorimeter Module Mass Production at JINR // Part. Nucl. Lett. 2001. No. 2. P. 33–40.
5. *Batusov V. et al.* Development of the Laser Measurements at the ATLAS Tile Calorimeter Module Production. JINR Commun. E13-2001-257. Dubna, 2001.
6. *Batusov V. et al.* Comparison of ATLAS Tilecal Module No. 8 High Precision Metrology Measurement Results Obtained by Laser (JINR) and Photogrammetric (CERN) Methods. Nov. 2002. // Part. Nucl. Lett. 2002. No. 113. P. 36–50.
7. *Batusov V. et al.* Development and Application of High-Precision Metrology for the ATLAS Tile-Calorimeter Construction (Pre-Assembly Experience and Lessons) // JINR, E13-2005-42. Dubna, 2005.

Получено 5 июля 2010 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 22.10.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,37. Уч.-изд. л. 2,86. Тираж 305 экз. Заказ № 57132.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/