

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.1.07

ТОПИЛИН

Николай Дмитриевич

**Разработка конструкции и создание модульного ядерного
абсорбера адронного тайл-калориметра установки АТЛАС**

Специальность 01.04.01. - Приборы и методы экспериментальной физики.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 2009

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

Научные руководители:

академик РАН, доктор физико-математических наук,
профессор Алексей Норайрович Сисакян
доктор физико-математических наук,
профессор Юлиан Арамович Будагов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Леонид Владимирович Кравчук, ИЯИ РАН, Москва,
доктор технических наук Анатолий Иванович Филиппов, ОИЯИ, Дубна.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
НИИЯФ МГУ, Москва

Защита состоится « » апреля 2009 г. в часов на заседании
диссертационного совета Д720.001.02 в Объединенном институте
ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Лаборатории физики высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан « » февраля 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:

кандидат физико-математических наук Валентин Александрович Арефьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современной физике элементарных частиц первостепенное внимание отводится экспериментам нового поколения в ТэВ-ном диапазоне энергий. Коллаборация АТЛАС разработала многоцелевую программу исследований рр-взаимодействий при 14 ТэВ на Большом Адронном Коллайдере (LHC) в ЦЕРНе.

Как известно, принципиально важную часть экспериментальных установок при высоких энергиях неизменно составляют калориметры. В уникальном новом спектрометрическом комплексе АТЛАС предусмотрена система адронных и электромагнитных калориметров (рис.1). Проектные требования к адронному тайл-калориметру определены исследовательской программой на коллайдере, предусматривающей решение наиболее актуальных проблем современной теории элементарных частиц в опытах по физике тяжелых кварков, поиску бозонов Хиггса и в других опытах с целью обнаружения новых явлений за пределами Стандартной модели. С помощью калориметров измеряют величину энергии и определяют направление частиц и струй, рожденных в первичном акте взаимодействия. Эти данные необходимы для восстановления процесса столкновения, идентификации вторичных частиц и определения кинематических параметров продуктов взаимодействия.

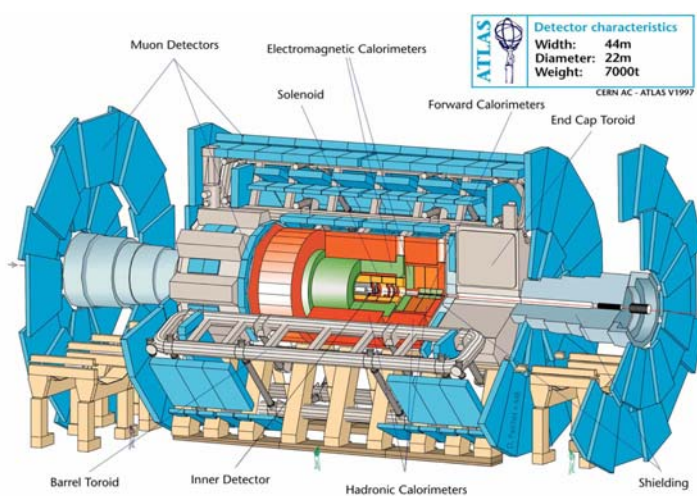


Рис.1. Схематическое изображение установки АТЛАС.

Проектное разрешение адронного калориметра

$\sigma / E = 50\% / \sqrt{E} \oplus 3\%$ и его линейность $\pm 2\%$ определены энергетическим диапазоном струй, частиц и величиной «потерянной энергии», обычно ассоциируемой с нейтрино.

Создание подобного калориметра отвечает актуальным

требованиям экспериментов на LHC, - крупнейшем адронном коллайдере нашего времени.

Диссертация отражает вклад автора в разработку и создание существенной части установки ATLAS: модульного ядерного абсорбера адронного тайл-калориметра, ныне полностью подготовленного к работе в пучках LHC.

Адронный тайл-калориметр состоит из трех секций (баррелей) цилиндрической формы: центральной – длиной 5.6м и двух дополнительных длиной по 2.8м. Каждая секция состоит из 64 клиновидных модулей соответствующей длины. Модули состоят из несущей балки и установленных на ней субмодулей. Последние содержат слои длинных стальных пластин («мастеров») и коротких пластин («спейсеров»), разделяющих сцинтилляционные пластины. Все пластины расположены перпендикулярно оси пучков сталкивающихся протонов. Конструкция калориметра обеспечивает его высокую герметичность.

Цель работы:

- Разработка конструкции абсорбера адронного тайл-калориметра на основе определенной задачи физики принципиальной схемы.
- Разработка технологии контролируемого массового промышленного производства базовых элементов тайл-калориметра.
- Разработка и создание специальных производственных участков для контролируемой сборки основных структурных единиц тайл-калориметра – его субмодулей и модулей.
- Создание технологического обеспечения, методов метрологического контроля и сборки адронного калориметра установки ATLAS в наземном и в экспериментальном подземном павильонах.

Научная новизна:

- Для установки ATLAS создан модульный абсорбер адронного тайл-калориметра, имеющий вид «замкнутой арки» в которой стальные и сцинтилляционные пластины расположены перпендикулярно к пучкам. Для

инженерно-технической реализации этой новой схемы разработаны производственные технологии, оснастка и методы метрологического контроля.

▪ Тайл-калориметр по достигнутым параметрам удовлетворяет критериям, предъявляемым к установкам для опытов в пучках частиц с энергией взаимодействия 14 ТэВ. Это ставит весь калориметрический комплекс АТЛАС в число исследовательских устройств нового поколения, адекватных современным проблемам экспериментальной физики высоких энергий.

Практическая ценность:

✓ Созданный абсорбер адронного тайл-калориметра составляет существенную часть калориметрического комплекса, который играет ключевую роль в получении важной новой информации принципиального научного значения в исследовательской программе установки АТЛАС на LHC.

✓ Предложены и реализованы решения, представляющие существенный практический интерес при планировании новых экспериментов и сооружении адекватных крупномасштабных исследовательских установок.

✓ Разрешение калориметра, измеренное при облучении модулей в пучках заряженных пионов при 10-350 ГэВ и полученное при анализе данных, составляет $\sigma / E = (52.7 \pm 0.9)\% / \sqrt{E} \oplus (5.7 \pm 0.2)\%$, что очень близко к техническому заданию.

Автор защищает:

• Результаты конструкторско-технологических разработок, изготовления и тестирования:

- submodule, модулей ядерного абсорбера адронного тайл-калориметра установки АТЛАС и их компонент с метрологически контролируемой точностью;

- комплекса технологического, такелажного и транспортного оборудования для операций с модулями и submodule.

- Методики контролируемого сооружения калориметра на поверхности и в подземном экспериментальном зале с достижением жестких ($\text{Ø}8470 \pm 10$, мм) допусков на диаметры баррелей, ставшим возможным благодаря совместному применению «принципа шиммирования» модулей, метрологического сопровождения, программно-предсказательного расчета эволюции формы баррелей в процессе их сборки и реализованного способа установки последнего модуля в баррель при недостаточной ширине конечного зазора.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались на научно-методических семинарах Лаборатории Ядерных Проблем им. В.П.Джелепова Объединенного Института Ядерных Исследований, регулярных международных рабочих совещаниях сотрудничества АТЛАС в ЦЕРНе, Международном Рабочем Совещании по Ускорителям (Октябрь, 2004, Женева, Швейцария); они опубликованы в виде статей в журналах «Письма в ЭЧАЯ», «ЭЧАЯ» и «Nuclear Instruments and Methods», а также в изданиях ОИЯИ и ЦЕРН.

Присуждена премия ОИЯИ (2003г.) за работу «Разработка и создание модулей адронного тайл-калориметра АТЛАС, новой методики лазерного контроля их сборки и исследование их характеристик с использованием новых методов».

В диссертации обобщены результаты работ, выполненных автором в 1994-2006 гг. в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) и в Европейском центре ядерных исследований (Женева).

Структура диссертации. Диссертация объемом 108 страниц состоит из введения, трех глав и заключения, в котором приводятся основные результаты. Содержит 2 таблицы, 63 рисунка и список цитируемой литературы из 25 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цели работы, подчеркнуты ее новизна, практическая ценность, важность и актуальность.

В первой главе описаны существенные этапы проектирования и изготовления основных структурных элементов субмодулей: стальных пластин ядерного абсорбера. В конструкции тайл-калориметра предусмотрены жёсткие требования по точностям производства компонент абсорбера и его полномасштабной сборки. Общее количество стальных пластин – ядерных поглотителей в калориметре – несколько сот тысяч с производственным допуском ± 0.1 мм на длине 100-1600 мм и ширине 220-380 мм и ± 30 мкм на толщине 4-5 мм. Допустимая неплоскостность боковой поверхности с размерами 1.9×5.6 м² модуля ограничена 0.6 мм. Названные точности высоки и поиск решений для их достижения представляет определенные трудности.

Реализация принципиальной конструктивной схемы тайл-калориметра^[1-3] обеспечена адекватными технологиями промышленного производства компонентов, сборки субмодулей, модулей и собственно калориметра. Разработаны и созданы соответствующие методы прецизионного метрологического контроля^[4].

Учитывая сложность задачи, в 1994 г. в ОИЯИ была начата подготовка к изготовлению прототипа субмодуля, - т.н. «метрового субмодуля». Прототип - слоистая система, которая содержит 120 т.н. мастерных пластин* и более 500 спейсеров^{[5]**} (рис.2) с допусками по толщине ± 0.05 мм и ± 0.1 мм пластин соот-

* Мастерные пластины - трапециевидальные пластины толщиной 5мм, определяющие размеры субмодуля в плане.

** Спейсерные пластины - короткие трапециевидальные пластины толщиной 4мм, устанавливаемые на мастерные пластины с зазором для вставки впоследствии сцинтилляторов.

ответственно. Эти требования являются исключительными: они существенно превосходят величины ($+0.3 \div -0.4$ мм), регламентируемые ГОСТом 19903-74 для этих толщин. Точность изготовления всех пластин составляет ± 0.1 мм при максимальном линейном размере 1821 мм для мастерных и 200-370 мм для спейсерных.

Высокоточная относительная ориентация пластин при сборке метрового субмодуля по первоначальному проекту обеспечивалась технологически слож-

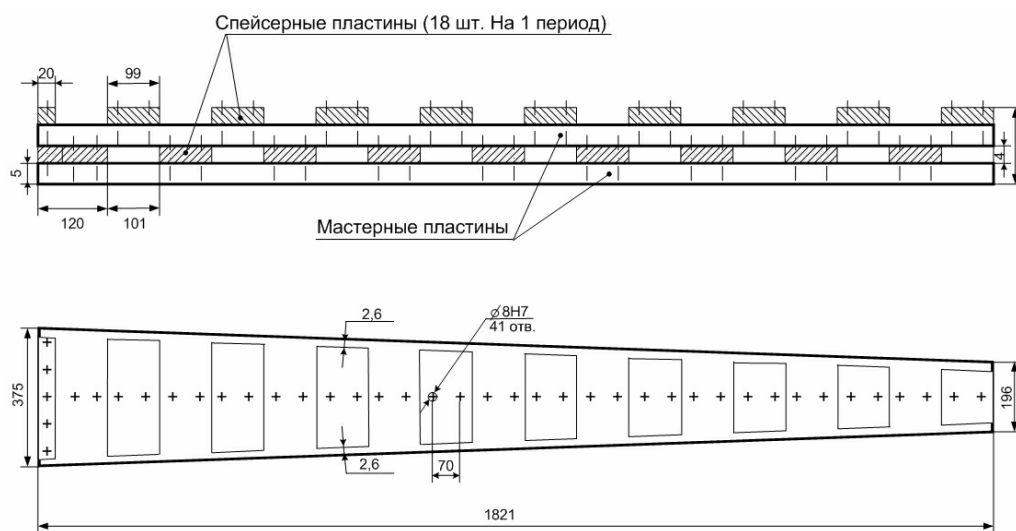


Рис. 2. Схема одного из 55 периодов метрового прототипа субмодуля.

но – неоправданно большим количеством отверстий, требующих прецизионного исполнения расположения по оси симметрии плиты с позиционным допуском ± 50 мкм (рис. 2).

Проведенное нами техническое исследование процесса проката и анализ заводских методов и средств контроля толщины листа на Новолипецком Metallургическом Комбинате показало принципиальную техническую возможность прокатного комплекса НЛМК изготовить листы с минимальными *только положительными* отклонениями от номинала. В мае 1994 года пластины, изготовленные в ОИЯИ из липецкой стали, были отправлены в ЦЕРН для сборки дубненского прототипа метрового субмодуля. При этом нами были достигнуты проектные размеры по всем контролируемым геометрическим (линейным и угловым) параметрам прототипа. Это позволило

перейти к этапу подготовки к контролируемому массовому промышленному производству пластин абсорберов в полном объеме для сооружения субмодулей в Дубне, Пизе, Праге, Протвино с доставкой в ОИЯИ для сборки модулей. Учитывая масштаб производства (65 двадцати-тонных модулей), было решено вначале собрать прототип модуля, т.н. «модуль-0»^[6-8].

Мастерные пластины были переданы нам из Аргоннской Национальной Лаборатории (АНЛ, США), а спейсерные пластины для нулевого модуля были изготовлены под нашим контролем методом лазерного края в С-Петербурге на Кировских заводах^[9].

В мае 1996 собранный нами модуль-0 был отправлен в ЦЕРН. Его размеры строго соответствовали требованиям проекта. Это положило начало массовому производству модулей в ОИЯИ.

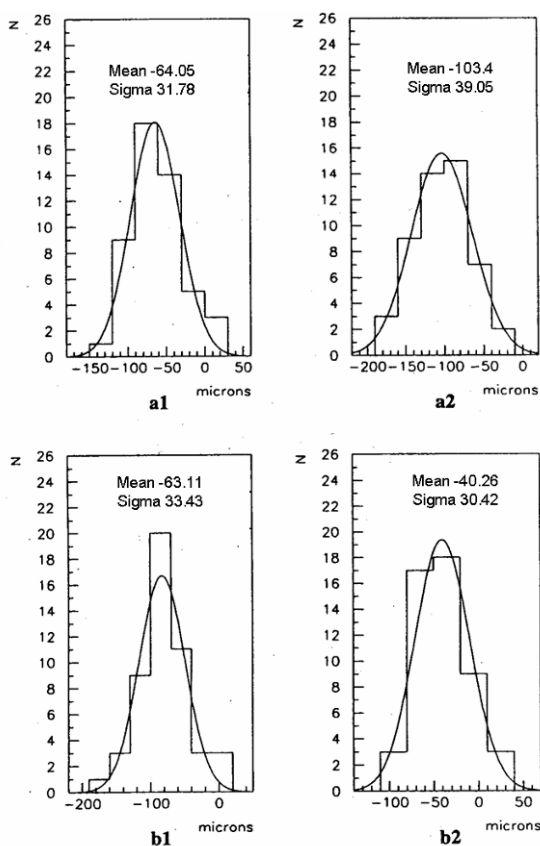


Рис. 3. Распределение отклонений от номинальных размеров величин a1, a2, b1, b2 для спейсеров 1-го типоразмера.

Из-за проблем при использовании листов из горячекатанной стали марки сталь 10 для метрового прототипа приняли решение: для массового производства ≈ 600000 шт. мастерных и спейсерных пластин использовать полосы шириной 420мм, длиной 1620мм и производственным допуском на толщину листа ± 0.03 мм из холоднокатанной стали чешского производства марки CSN 11347 (аналог российской стали марки сталь 10). Наиболее эффективной технологией массового промышленного производства пластин признана штамповка.

Исходя из экономических соображений, спейсерные пластины (244800 шт.) было решено изготавливать на Мин-

ском Тракторном Заводе^[10-11], а мастерные пластины на заводе ТАТРА (Чехия), где имелся необходимый нам пресс с достаточным рабочим усилием 800 тонн.

Использована созданная автором Программа контроля качества^[10] с критериями контроля всех этапов производства: от проката стали до транспортировки готовых изделий в места их дальнейшего использования. Последующая практика использования «программ качества» для полномасштабного массового производства (≈ 600 тыс. штук) мастерных и спейсерных пластин показала их принципиальную необходимость и эффективность.

Согласно Программы контроля качества каждая 30-я отштампованная мастерная или спейсерная пластина проверялась установкой на свои шаблоны, подготовленные нами, а размеры каждой 600-й пластины контролировались на 3-х координатном измерительном центре ТАТРА для мастерных пластин или оператором для спейсерных пластин на МТЗ.

Автором были разработаны карты *оптимального* раскроя листов^[11], а также схемы и методы метрологического контроля спейсерных пластин с характерной точностью 20мкм с использованием стандартных промышленных измерительных инструментов, обладающих требуемой точностью.

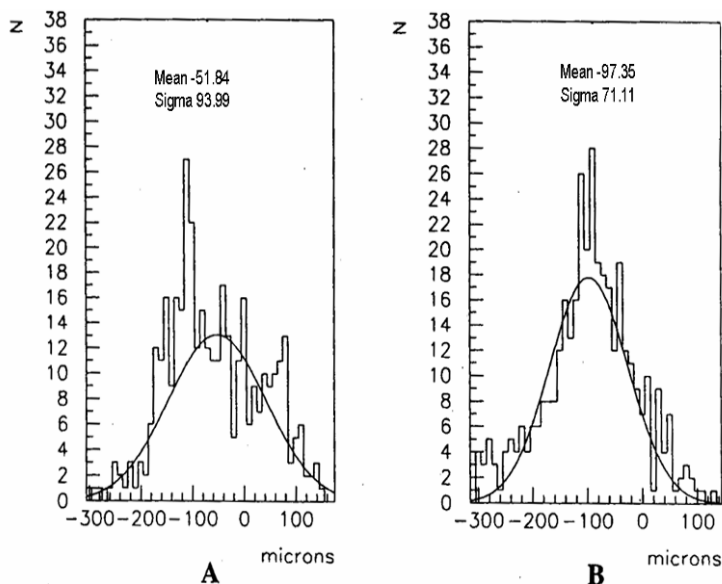


Рис. 4. Распределение отклонений от номинального значения габаритных размеров А и В для всех спейсеров 12-ти типоразмеров.

На рис. 3 показаны отклонения от номинальных размеров измеренных величин ряда контролируемых геометрических параметров a_i и b_i для спейсеров 1-го типоразмера; эти отклонения типичны для всех типоразмеров. На рис.4 показаны отклонения от чертежных собственно габаритных размеров А и В для всех спейсеров 12-ти типоразмеров, изготовленных на МТЗ.

Приведенные распределения свидетельствуют: разработанные и применённые методы статистического контроля массового производства по выборке являются достаточно мощными: спейсеры отштампованы в соответствии с требуемыми высокоточными для данных условий проектными допусками: (+100 ÷ - 200) мкм.

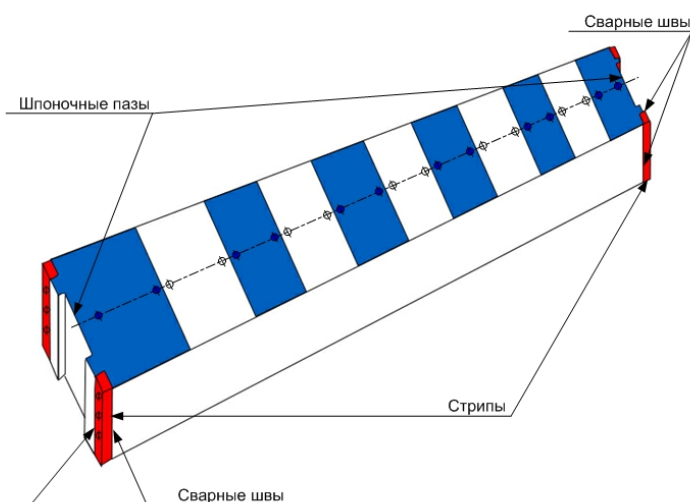


Рис. 5. Схематический вид субмодуля: введены установочные шпоночные пазы и 4 угловых стрипа.

Во второй главе описаны результаты конструкторской разработки и создания субмодулей и модулей. В июне 1994 года в ЦЕРНе при нашем участии был собран прототип метрового субмодуля из дубненских пластин. Выявленные нами при сборке недостатки конструкции субмодуля (разработанной до нашего

вступления в проект) неприемлемы в полномасштабной конструкции модуля и тайл-калориметра в целом; предложенные автором принципиальные конструкторско-технологические решения^[11] по субмодулям, модулям и технологии их сборки сняли все выявленные ключевые трудности.¹ Конкретно, это достигнуто тем, что в конструкцию субмодулей автором введены (рис 5.):

- а) два шпоночных паза на осевой линии по коротким сторонам субмодуля;
- б) пластины с резьбовыми отверстиями (стрипы), ввариваемые по четырем углам трапеции;

¹ Эти предложения составили основу соответствующего раздела Технического Проекта АТЛАС^[2].

и предложена конструкция^[11] приспособления для сборки субмодулей. Введение шпоночных пазов в мастерных плитах при производстве субмодулей (рис.5) коренным образом изменило принцип сборки субмодулей, сделав возможным располагать мастерные плиты с относительной точностью по горизонтали ± 0.1 мм, используя на порядок меньше баз: только две базы вместо сорока одной, как в метровом прототипе.

Более того, при сборке модулей (рис.6) шпоночные пазы в широком основании субмодулей оказались *принципиальным технологическим фактором*, позволившим достичь требуемой точности (± 150 мкм) в центрировании положения субмодулей при установке их на общей балке. Введение угловых

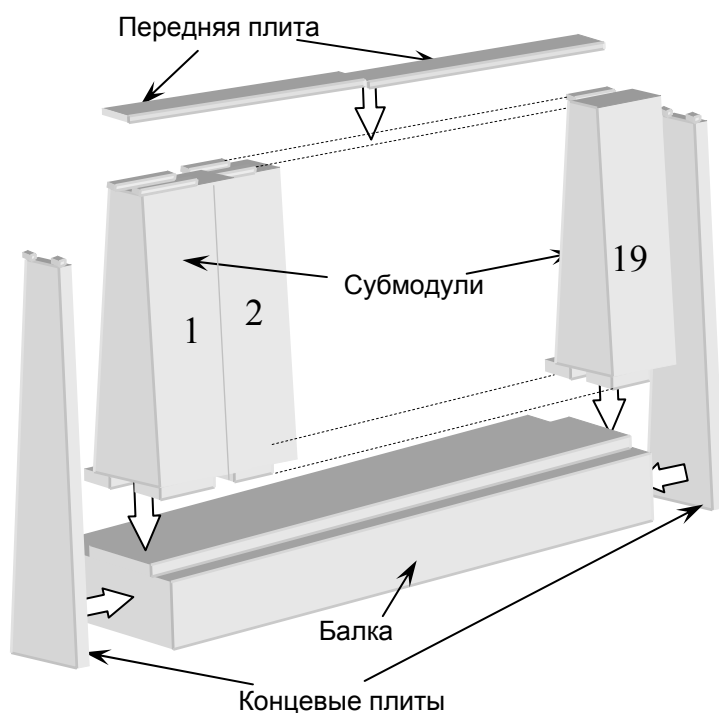


Рис. 6. Схема сборки модуля.

пластин (стрипов) – позволило крепить субмодули болтами к балке, что, в свою очередь, дало возможность регулирования положения субмодулей относительно вертикальной оси для достижения проектной неплоскостности боковых поверхностей модуля.

Автором предложены ранее отсутствовавшие технологически мотивированные допуски на изготовление деталей и узлов субмодулей, модулей и

технологического оборудования по их сборке. Исходя из принятых допусков, был рассчитан принципиально важный параметр модуля - предельное значение 0.6мм неплоскостности боковых поверхностей на площади 1.9 x 5.6 м², - что позволило впоследствии назначить минимально возможные расстояния между модулями в калориметре: 1.5 мм^[11] на внутреннем радиусе и 1.9 мм на

внешнем. В собранном с соблюдением этих технических критериев калориметре АТЛАСа реализована высокая проектная герметичность, что является принципиальным достижением.

Контролируемый параметр субмодуля - его толщина H_i - в ходе производства измерялась равномерно по периметру и по осевой линии субмодуля в 20 точках цифровым рейсмусом с точностью 20 мкм. Измеренная неплоскостность поверочной плиты составила 70 мкм.

Соблюдение технологии сборки, мотивированный выбор измерительного оборудования и достаточный уровень неплоскостности поверочной плиты обеспечили достижение весьма стабильного качества сборки субмодулей по параметру H_i . При сборке модуля стало возможным устанавливать субмодули

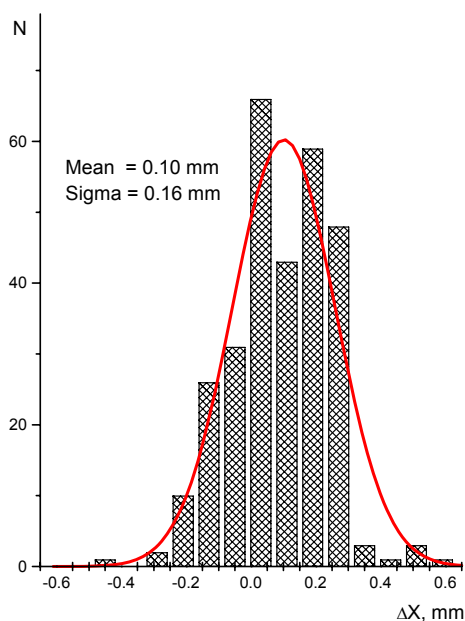


Рис. 7. Максимальные величины $\Delta X = H_i - H_{nom}$ для субмодулей ОИЯИ.

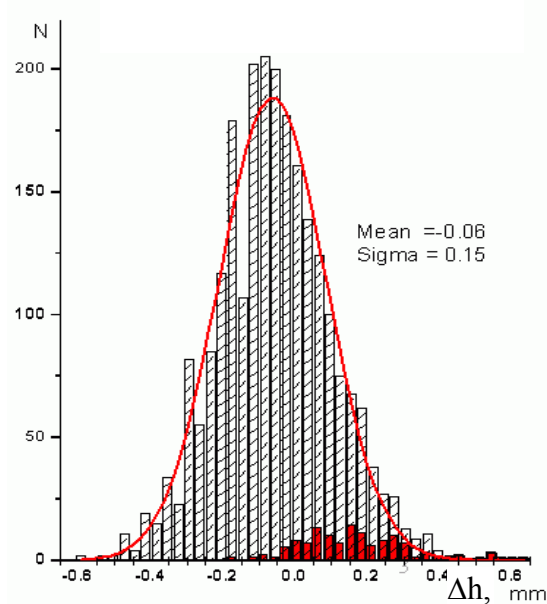


Рис. 8. Распределение отклонений $\Delta h = h_i - h_{nom}$ субмодулей от вертикали в модулях ОИЯИ; максимальные отклонения закрашены.

на балку *не селективно*, а произвольно, обеспечив равномерность распределения субмодулей по длине модуля.

Большинство из 308 субмодулей, изготовленных в ОИЯИ в период декабрь 1998 – июль 2001 г.г., соответствовало допускам.

В июле 1999 года под инженерно-технологическим руководством автора в ОИЯИ на специально подготовленном и оборудованном технологическом участке начата сборка модулей.

Требуемая точность контроля положения субмодулей в модуле для достижения проектной неплоскостности «0,6 мм» боковой поверхности модуля, в отличие от технологии сборки модуля-0, обеспечивалась применением созданной нами *лазерной измерительной системы* [12].

При допуске 0.6 мм дубненские модули имели неплоскостность, как правило, 0.2-0.3 мм и лишь в редких случаях до 0.6 мм. Применение разработанной лазерной метрологии измерения величины отклонения субмодулей от вертикали $\Delta h = h_i - h_{ном}$ с точностью 0,05 мм [12] обеспечило достижение проектного позиционирования субмодулей и позволило принци-

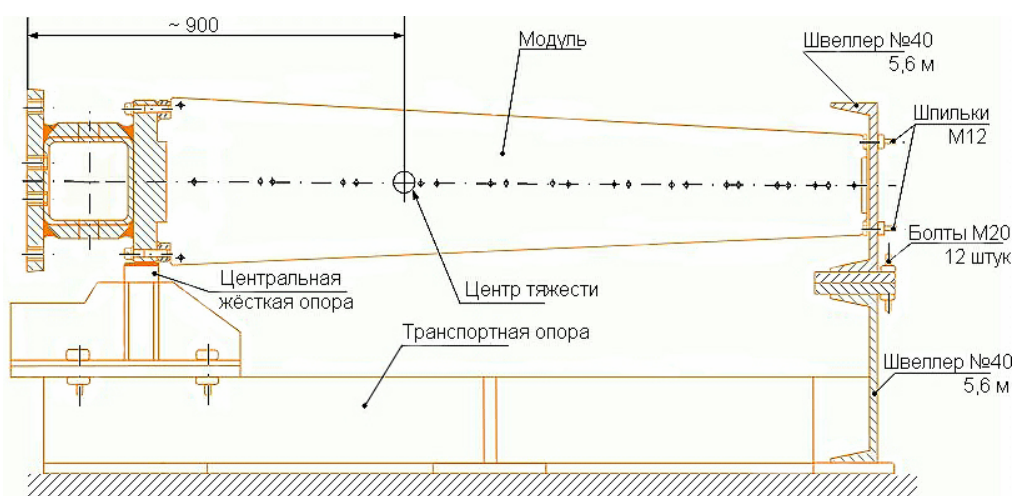


Рис. 9. Транспортная опора для перевозки модуля в горизонтальном положении.

пиально по новому вести процесс сборки модуля: ввиду трудоёмкости юстировки каждого субмодуля с применением электронного уровня и дополнительных средств было принято мотивированное решение при серийном

производстве юстировать по этой технологии только 1-й и 19-й submodule, а положение боковых поверхностей промежуточных submodule контролировать с помощью лазерного луча.

Из рис.8 видно: достигнутые нами отклонения Δh боковых поверхностей submodule от вертикали, прямо связанные с величиной неплоскостности модулей, лежат в интервале (0...0.4) мм и, в целом, заметно превосходят требования к проектной величине неплоскостности (0.6 мм).

Для сборки submodule и модулей и 3-х мерных манипуляций с ними спроектировано и изготовлено специальное такелажное оборудование, включая быстро монтируемые траверсы, предложенные автором. Практика работы с траверсами доказала их эффективность и надежность: за все время работы с 10-20 тонными модулями выполнено ≈ 2000 операций по подъему-перемещению без инцидентов. Применение 3-х быстро монтируемых и демонтируемых траверс также существенно ускорило монтаж баррелей в шахте.

Автором сконструированы транспортные опоры для перевозки модулей из Дубны в Женеву на автомашине в горизонтальном положении (рис.9). Модуль опирался на «линию» в узкой его части и «точку» в широкой. Колебания свободно висящих краев модуля в широкой его части гасились демпфирующими элементами. Транспортировка модулей в ЦЕРН (общий пробег 65-ти

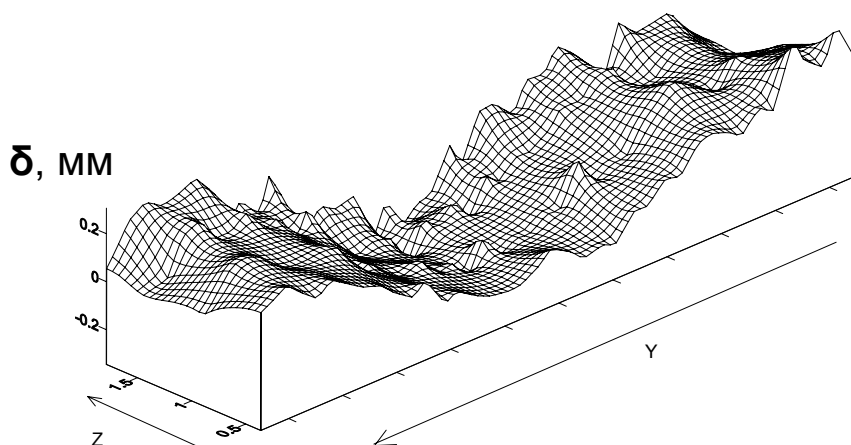


Рис.10. Отклонения δ от номинальной поверхности модуля JINR32 (рельеф).

поездок около 200 000 км) выполнена без повреждений, что подтверждено визуальным контролем, а также сравнением результатов полномасштабных

измерений неплоскостности боковых поверхностей (рельефа) каждого 8-го модуля до и после их транспортировки^[13]. Пример результатов наших измерений^[14] показан на рис.10: практически все измеренные отклонения δ точек боковой поверхности реального модуля от номинальной (проектной) поверхности лежат в интервале $(-0.2 \div +0.2)$ мм.

В третьей главе описана методика контролируемой сборки адронного тайл-калориметра, ее апробация при сборке калориметра на поверхности и применение в подземном экспериментальном павильоне АТЛАСа при финальной сборке.

Сборка трех секций полномасштабного тайл-калориметра общим весом более 2500 тонн – задача исключительная по сложности в практике сооружения крупномасштабного исследовательского оборудования. Ее успешное решение достигнуто применением предложенного нами комплексного подхода, идея которого основана на контроле процесса сборки шиммами (прокладками) расчетной толщины между модулями, предсказательном расчете изменения формы собираемого барреля и способе введения последнего, 64-го, модуля при недостаточной ширине конечного зазора.

Автором предложена и реализована с коллегами технологическая схема принципиально важной концепции «предсборки» калориметров на поверхности. Это позволило в последующем перейти к ответственному этапу - заключительной полномасштабной сборке в шахте по апробированной схеме с отработанными сборочными и технологическими операциями.

Программный контроль эволюции формы баррелей достигнут тем, что между модулями на внутреннем и внешнем радиусах (рис.11) в середине каждого субмодуля устанавливались шиммы расчетных толщин. Шиммы также передавали весовую нагрузку от модуля к модулю и предотвращали повреждения световых волокон, находящихся вблизи боковых поверхностей модулей.

Реальные зазоры между модулями отличаются от номинальных за счет неплоскостности боковых поверхностей модулей. Для расчета толщины шимм на внутреннем и внешнем радиусах собираемых баррелей разработана соответствующая программа.

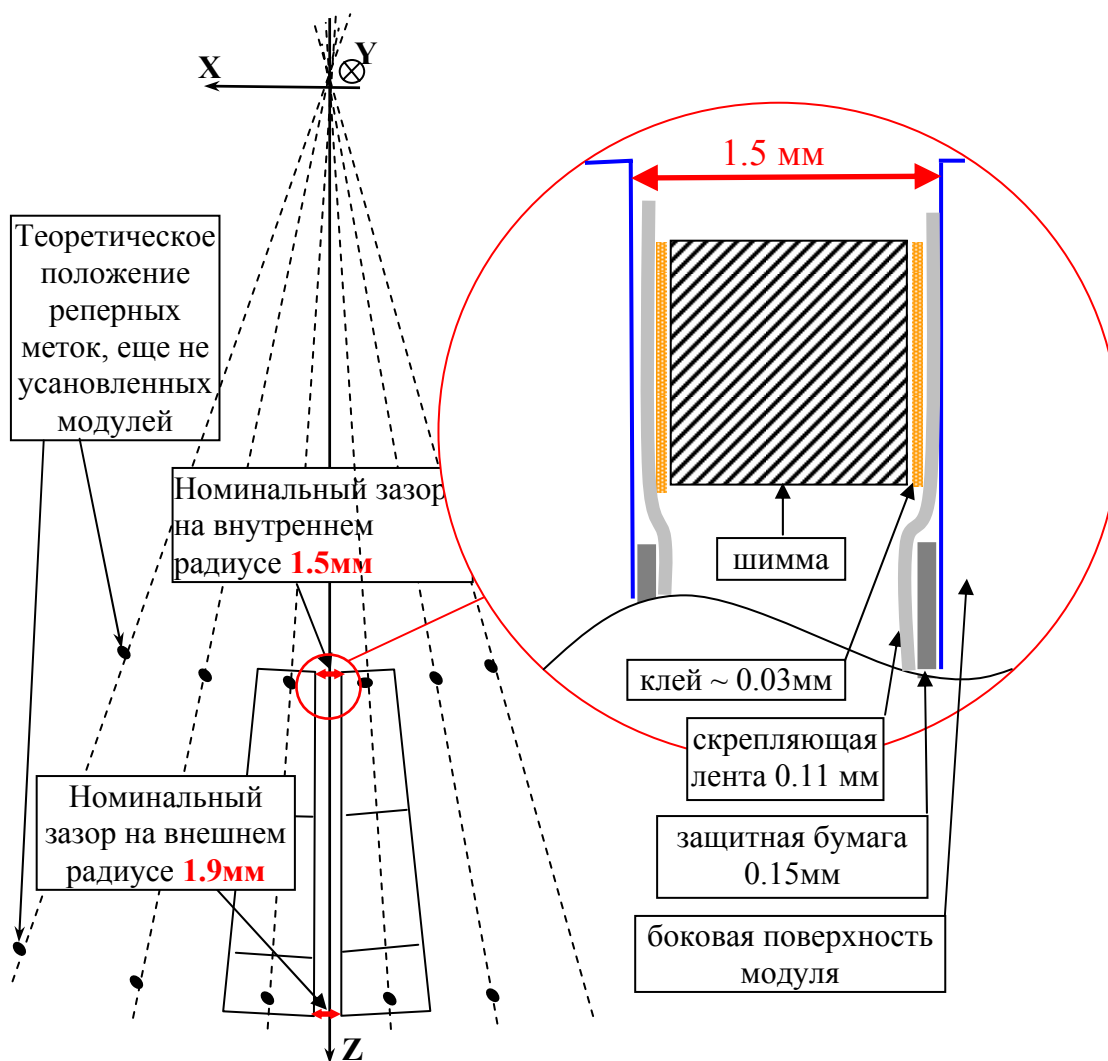


Рис.11. Установка шимм между модулями.

В ходе производства модулей создана база данных по неплоскостности боковых поверхностей модуля на расстоянии 50 мм от верхней поверхности модуля (на внутреннем радиусе барреля) и непрямолинейности нижней плиты несущей балки модуля (внешний радиус барреля). На основании этой базы данных с помощью разработанной нами программы^[9] рассчитаны реально

необходимые толщины шимм по каждому submodule на внутреннем и внешнем радиусе для каждой пары соседних модулей.

Величины толщин реально наклеенных шимм заносили в протокол сборки и эти данные впоследствии использовали для предсказательного расчета положения еще не установленных модулей.

Предварительная сборка баррелей на поверхности ставила 3 главные задачи:

- 1) – отработать технологические процессы подготовки модулей к сборке и установки их в баррель;
- 2) – доказать возможность сборки баррелей с заданными жесткими допусками: $\pm 10\text{мм}$ на $\varnothing 8470\text{мм}$ и 2мм - неплоскостность торцевой поверхности барреля;
- 3) - сократить время сборки баррелей в шахте, опуская вниз уже собранную группу модулей нижней части баррелей.

На нижней части баррелей между модулями и скрепляющих их соединительными плитами возникают поперечные силы, которые воспринимаются установленными с натягом штифтами.

Автором решена комплексная задача по проектированию, изготовлению, установке и извлечению специальных цилиндрических штифтов для глухих отверстий $\varnothing 33\text{р}6$, для которых проведен прочностной расчет и определена необходимая температура охлаждения штифта.

Первой собиралась 3-х метровая секция калориметра из коротких модулей, т.н. «испанский баррель».

Обнаружение пластических деформаций шимм между модулями потребовало уточнения порядка применения шимм как фактора, определяющего эволюцию формы барреля по мере установки модулей: Решение нами найдено в установке 3-миллиметровых радиальных шимм (ранее проектом не предусмотренных).

Наличие для последнего модуля зазора, меньше номинального, первоначально считалось недопустимым из-за опасности повреждения оптических волокон. Автором предложен и успешно реализован вариант

сборки, позволяющий, как показал расчет, собрать баррель при зазоре, меньшем номинального значения ширины модуля: последний модуль, как клин, входит в конечный зазор, раздвигая ветви барреля и не вызывая пластических деформаций собственно барреля.

Это подтверждено прямыми измерениями: сняв модули 64 и 63, измерили расстояния между модулями 59 и 60 на внешнем и внутреннем радиусах. Результаты измерений во время предсборки и при разборке таковы: на внешнем радиусе барреля со стороны концевых плит было -9.6 мм, стало -9.4 мм; отличия в пределах точности измерений 0.5мм; на другой стороне барреля показания измерений на внешнем радиусе совпали: -2.95 мм в обоих случаях. Это доказывает, что деформации барреля при установке последнего модуля были, как и предполагалось, действительно упругими.

Предсборка стала «генеральной репетицией» принципиальной важности для выработки сценария заключительной сборки в шахте. Вертикальный диаметр испанского барреля превысил номинал на 15 мм (0.18%)^[15] вместо допустимых 10 мм (0.12%), а горизонтальный размер из-за пластических деформаций шимм на нижней части цилиндра был меньше номинала на 21 мм (0.25%).

При сборке 2-го (самого большого) цилиндра стратегия определения толщины шимм основывалась на расчете^[15] предполагаемой геометрии барреля в зависимости от толщины шимм и уже с учетом величин их деформаций.

Значения пластических деформаций шимм^[10] между каждой парой соседних модулей получили, сравнивая измеренные расстояния между реперными метками сразу после установления модулей в первый баррель и при окончательно собранном первом барреле (рис. 12).

К толщинам шимм, полученным в результате обработки данных по геометрии модуля, прибавляли усредненные значения деформации шимм по каждому характерному региону однотипного сжатия шимм. Эти средние значения указаны на рис.12 для каждой из трех зон.

Теодолитные измерения строящейся части центрального барреля и измерения расстояний между реперными метками на модулях прецизионной рулеткой (точность 0.5мм) позволили нам *предсказательно*^[15] описывать эволюцию геометрических параметров барреля с ростом количества установленных модулей и прогнозировать величины конечного зазора на внешнем и внутреннем радиусах для обеспечения возможности установки последнего, 64-го, модуля.

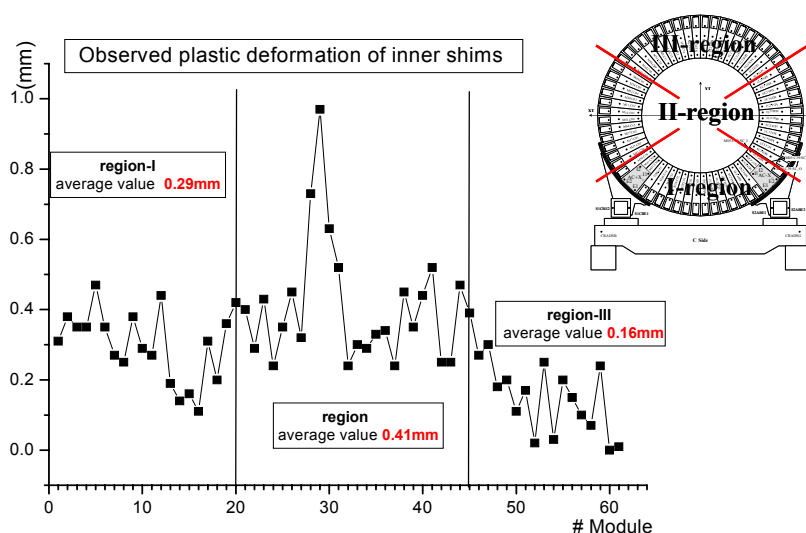


Рис. 12. Наблюдаемые значения деформаций шимм на внутреннем радиусе во время предварительной сборки первого барреля.

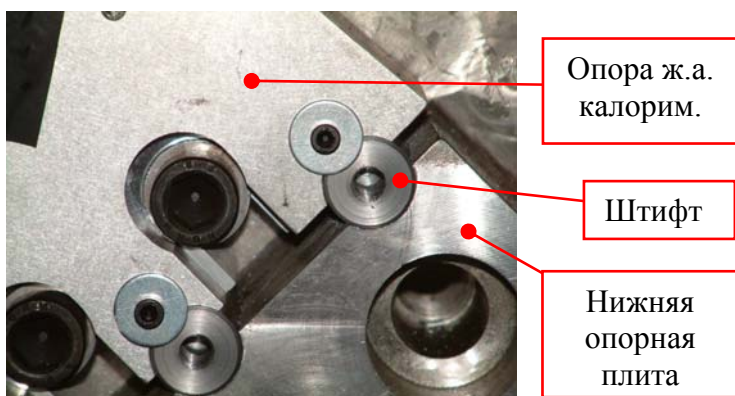


Рис. 13. Опираение фермы на нижнюю плиту через цилиндрические штифты.

Предварительная сборка центрального барреля (октябрь, 2003) и полномасштабные теодолитные измерения геометрии барреля^[16] показали: 1300 - тонный абсорбер калориметра собран с соблюдением допусков на все геометрические размеры:

в частности, + 10 мм на внешний диаметр 8470 мм.

При сборке второго цилиндра с помощью предложенной автором технологии достигнута неплоскостность торцевой поверхности барреля в пределах 2мм на внешний диаметр 8470 мм. В итоге решены все задачи предварительной

сборки 2-го (дубненского или центрального) барреля и доказана возможность сборки баррелей с жесткими допусками, установленными заранее.

Исследовано (в имитации стальными блоками) воздействие веса жидко-аргонного калориметра (≈ 260 тонн) через промежуточные фермы на опоры барреля, минуя сам баррель. Геодезические измерения показали, что влияние веса жидко-аргонного калориметра на геометрию барреля незначительно и им можно пренебречь. Предложенное автором конструкторское решение (рис.13) передачи весовых нагрузок от жидко-аргонного калориметра к опорам барреля было в точности повторено при финальной сборке в подземном павильоне.

Предварительная сборка двух баррелей на поверхности явилась принципиально важным этапом, который позволил создать технологический «сценарий» полномасштабной сборки калориметра в подземном павильоне.

Созданная программа «предсказания» положения модулей в барреле явилась эффективным инструментом, помогающим оперативно решать вопросы по стратегии шиммирования.

Первым в шахте собирался центральный 1300 тонный баррель из дубненских модулей; его сборка имела ряд особенностей. К уже собранному и спущенному в шахту в виде монолита (≈ 260 тонн) 8-ми модулям необходимо по очереди монтировать последующие с точностью, не хуже, чем ± 5 мкм.

Для этого при монтаже очередного модуля (или соединительной плиты, скрепляющей пару соседних модулей) вставляли установочные штифты $\text{Ø}33_{-0.02}$ мм в отверстия, максимально разнесенные по диагонали друг от друга, когда модуль (или соединительная плита) *были еще подвешены на кране*. Затем по другой диагонали устанавливали переходные штифты $\text{Ø}33^{+0.02}$ мм, а на место установочных вставляли охлажденные в жидком азоте штатные штифты. Идея в том, что штатные штифты при нагреве задавали *с высокой точностью* относительное положение соседних модулей. Кран отсоединялся, устанавливались и протягивались все болты, а затем поочередно устанавливались все остальные штифты. Описанная технология позволила

достичь вышеназванную точность (± 5 мкм) в относительном расположении модулей. Предложенная технология существенно сократила время сборки барреля в шахте.

Геометрия барреля контролировалась на протяжении всей сборки. На основании результатов измерений была незначительно откорректирована стратегия шиммирования, и собранный 1300 тонный баррель строго соответствовал жестким допускам: $+10$ мм на диаметр 8470 мм^[16].

При сборке второй (3-х метровой) секции калориметра в шахте (испанского барреля) экспериментально подтвердилась правильность наших критериев корректировки размеров шимм: в итоге в его финальной геометрии достигнуты требуемые жесткие допуски: $+10$ мм (0.12%) по вертикали и -4 мм (0.05%) по горизонтали на диаметре 8470 мм^[15-16].

Созданная методика сборки, основанная на «принципе шиммирования» и программного предсказания эволюции формы, была успешно применена при сборке 3-ей, последней секции калориметра, составленной из американских модулей.

В итоге был достигнут требуемый результат: следуя расчетному сценарию шиммирования получили номинальное значение зазора для последнего модуля, и 64-й модуль, лишь коснувшись ветвей барреля, занял требуемое положение. Финальное отклонение диаметров 3-его барреля от номинала составило $+10$ мм (0.12%) по вертикали и -6.4 мм (0.08%) по горизонтали^[16].

Успех финальной сборки в шахте обеспечен созданной нами принципиальной схемой сборки баррелей, использованием специально изготовленного подъемно-такелажного оборудования для манипуляций с модулями, созданием участка для сборки баррелей со всем необходимым набором инструментов и технологического оборудования и, наконец, благодаря организованной и подготовленной интернациональной группе высококвалифицированных инженеров и техников. Основной вклад внесен специалистами ОИЯИ, включая автора.

Калориметрический комплекс АТЛАСа был готов к первому запуску ЛНС, состоявшемуся 10 сентября 2008 года.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Предложены принципиально новые решения ряда ключевых структурных элементов ядерного абсорбера адронного тайл-калориметра АТЛАС. Эти решения составили существенную часть раздела «Механика» Технического Проекта (TDR) АТЛАС.
2. Подготовлено и реализовано контролируемое массовое производство 300000 шт. стальных пластин ядерного абсорбера адронного тайл-калориметра АТЛАС.
3. Созданы главные структурные элементы адронного калориметра – субмодули и модули, для чего были разработаны и организованы производственные участки и методика контроля, обеспечившая достижение проектных допусков.
4. Сконструированы и изготовлены транспортные опоры для перевозки в ЦЕРН 20-ти тонных модулей и специализированное подъемно-такелажное оборудование, включая легко монтируемые траверсы.
5. Разработаны технологические схемы и осуществлена сборка трех секций адронного калориметра установки АТЛАС с применением принципа шиммирования, выполнением контрольных измерений и предсказательного расчета эволюции формы баррелей в процессе их сборки с достижением жестких допусков (0,1%) на диаметры и плоскостности (0.02%) торцевых поверхностей.
6. Предложено и реализовано решение ключевой проблемы монтажа баррелей: весом 64-го модуля «ветви» барреля раздвигаются в пределах упругих деформаций.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. ATLAS Collaboration:...,**N.Topilin**,..., et al ATLAS Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43, CERN, Geneva, Switzerland, (1994).
2. ATLAS Collaboration:...,**N.Topilin**,..., et al, ATLAS Tile Calorimeter Technical Design Report, ATLAS TDR 3, CERN/LHCC/96-42, CERN, Geneva, Switzerland, (1996).
3. P.Amaral,...,**N.Topilin**,..., et al., Hadronic shower development in Iron-Scintillator Tile Calorimetry, NIM in Physics Research, A 443 (2000)51-70.
4. V.Batusov,...,**N.Topilin**,..., et al., Development of laser measurements at the ATLAS Tile Calorimeter module production, JINR, Dubna E-13-2001-257 (2001).
5. J. Budagov,...,**N.Topilin**,..., et al. Report on fabricating of ATLAS hadron calorimeter prototype #5 in Dubna. ATL-TILECAL-PUB-1994-014, CERN, Geneva, Switzerland, (1994).
6. J. Budagov,...,**N.Topilin**,...,et al. Tile calorimeter module assembly. ATL-TILECAL-PUB-1994-021, CERN, Geneva, Switzerland, (1994).
7. J. Budagov,...,**N.Topilin**,..., et al. ATLAS Tile hadron calorimeter module assembly design. ATL-TILECAL-PUB-1994-036, CERN, Geneva, Switzerland, (1994).
8. J. Budagov,...,**N.Topilin**,..., et al. ATLAS barrel hadron calorimeter 0-module assembly technology. JINR, Dubna. E13-97-23.(1997). ATL-TILECAL-PUB-1994-94. CERN, Geneva, Switzerland, (1994).
9. B.Alikov,..., **N.Topilin**,..., et al. Recent advances in precision laser cutting for the ATLAS hadron calorimeter absorber production. Dubna. E13-95-515 (1995). Presented at the International ATLAS Collaboration Conference, November 1995, CERN, Geneva, Switzerland.
10. B.Alikov,...,**N.Topilin**,..., et al. ATLAS barrel hadron calorimeter: general manufacturing concepts for 300000 absorber plates mass production. JINR, Dubna. E13-98-135, (1998).

11. В.Ю. Батусов, ..., **Н.Топилин**, ..., и др. Адронный тайл-калориметр установки АТЛАС: опыт создания прототипов и массового производства модулей. ОИЯИ, Дубна, P13-2005-130. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2006, Т. 37. Выпуск 5.
12. V. Batusov, ..., **N. Topilin**, ..., et al., Development and application of high-precision metrology for the ATLAS Tile-Calorimeter construction. JINR, Dubna. E-13-2004-177, (2004). Presented at the 8th IWAA, October 4-7, 2004, CERN, Geneva.
13. V. Batusov, ..., **N. Topilin**, ..., et al., High Precision Laser Control of the ATLAS Tile-Calorimeter Module Mass Production at JINR. Part. and Nuclei, Letters, 2001, N2- p.33-40. - Bibliogr.: 2. - 344.1e.
14. V. Batusov, ..., **N. Topilin**, ..., et al. Development and application of high-precision metrology for the ATLAS tile-calorimeter construction (Pre-assembly experience and lessons). JINR, Dubna. E13-2005-42, (2005).
15. В. Батусов, ..., **Н.Топилин**, ..., и др. Модульный ядерный абсорбер адронного калориметра установки АТЛАС (опыт контролируемой сборки на поверхности и под землей). Дубна, P13-2008-141, 2008г. Письма в ЭЧАЯ, 2009, Т.6, Выпуск 4.
16. J. Abdallah, ..., **N. Topilin**, ..., et al., Design, Construction and Installation of the ATLAS Hadronic Barrel Tile Calorimeter, CERN, ATL-TILECAL-PUB-2008-001, CERN, Geneva, Switzerland, (2008).