

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.1.07

Ляблин
Михаил Васильевич

**Разработка и применение методов лазерной метрологии при создании
адронного калориметра установки АТЛАС и их развитие для контроля
положения крупномасштабных физических установок**

01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2011



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 физико-математических наук Залиханов Б.Ж. (ОИЯИ),

кандидат физико-математических наук Сомов С.В. (МИФИ)

Ведущая организация:

НИИЯФ МГУ

Защита состоится « _____ » _____ 2011 г. в ____ часов на заседании диссертационного
совета в Объединенном институте ядерных исследований по адресу: 141980, Моск. обл.,
г. Дубна, ул. Жолио-Кюри 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных
исследований

Автореферат разослан « _____ » _____ 2011 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба
посылать по вышеуказанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета



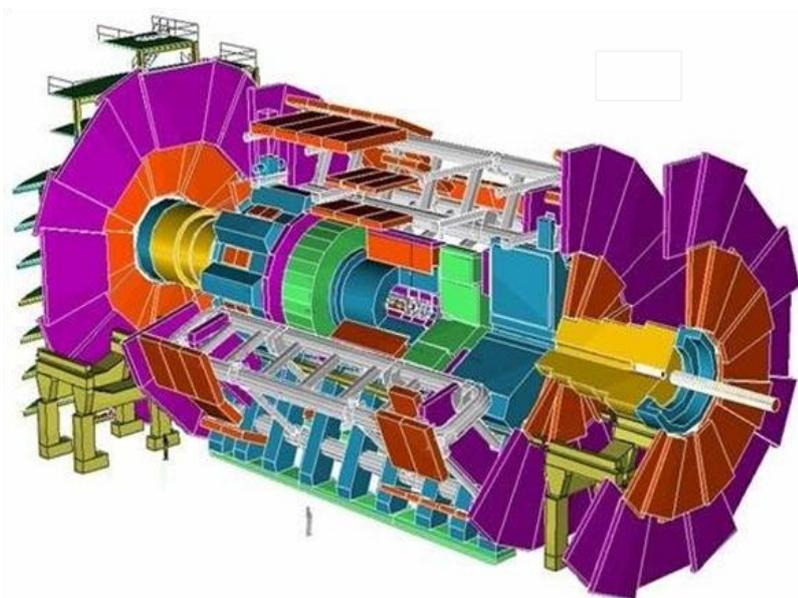
доктор физико-математических наук, профессор

Ю.А. Батусов

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Пуск в действие в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН, Женева) Большого адронного коллайдера открыл уникальную возможность исследования взаимодействия протонов с протонами при самой высокой энергии, когда-либо достигавшейся в лабораторных условиях. Для практической реализации этих исследований созданы спектрометрические комплексы, обеспечивающие получение важной новой информации принципиального научного значения. Установка АТЛАС принадлежит к числу нескольких подобных устройств, действующих в ЦЕРНе. Одна из ключевых систем АТЛАСа - т.н. адронный калориметр. Он играет основную роль в измерении энергий и направлений струй и частиц, в определении их природы и, тем самым, в идентификации процессов рр-рассеяния. Калориметр необходим в решении широкого класса фундаментальных проблем современной физики, таких как обнаружение бозонов Хиггса, проявлений суперсимметрии, поиск новых частиц и явлений за пределами стандартной модели. В этих и многих других исследованиях роль калориметра исключительна. Поэтому сооружение калориметрической системы спектрометрического комплекса АТЛАС принадлежит к числу наиболее актуальных задач



современной физики элементарных частиц высоких энергий.

Рис.1. Схематическое изображение установки АТЛАС

Адронный калориметр исследовательской установки АТЛАС является наиболее крупным устройством подобного

класса, когда-либо созданным для экспериментов на ускорителях. Размеры этого детектора (диаметр 8,4 м; длина 13 м; вес 2500 т) непосредственно связаны с величиной энергии ($14 \cdot 10^{12}$ эВ), реализуемой в акте рр-рассеяния. Создание нового ядерно-физического устройства подобного масштаба с достижением жестких проектных

параметров калориметра, диктуемых более высоким энергетическим интервалом, относится к числу сложнейших научно-технических проблем и требует применения ранее не использовавшихся новых идей и методов. Решение достигнуто, в том числе, благодаря предложению, разработке и применению автором новых физико-технических подходов, сделавших возможным контролируемое сооружение адронного калориметра АТЛАС с использованием методики предсказательного описания эволюции его формы во время сборки.

Для обеспечения необходимой точности создания модулей - основных структурных единиц адронного калориметра - в отсутствие доступных метрологических методов автором были предложены и развиты новые методики лазерного контроля. Это решило основную задачу первого этапа - высокоточную и ритмичную сборку модулей. Знание их геометрических размеров обеспечило в дальнейшем возможность прогнозируемого сооружения адронного калориметра в целом.

Для решения актуальной проблемы контроля положения длинномерных объектов (например, секций линейных ускорителей) экспериментально исследовано поведение лазерного излучения в воздушной среде. Обнаружено явление существенного уменьшения шумового дрожания лазерного луча при распространении его в закрытой трубе.

В итоге предложены и развиты методы применения одномодового лазерного луча в метрологическом контроле протяженных исследовательских установок и сформулированы физико-технические основы осуществления сейсмической стабилизации исследовательской установки большой протяженности.

Цикл завершенных исследований автора представляет собой физическую основу создания нового поколения контролирующего лазерного метрологического оборудования, обладает научной новизной и актуальностью.

Цель работы

- Разработка физико-технических основ метрологического обеспечения высокоточного создания *модулей* ядерного абсорбера адронного калориметра АТЛАС и полномасштабного детектора - *баррелей* адронного калориметра АТЛАС:
- Разработка программного обеспечения и метрологических методик для решения нестандартной проблемы - контролируемой сборки баррелей, непрерывно деформирующихся в процессе их сооружения;
- Исследование процесса распространения луча лазера в атмосфере и разработка методов метрологического лазерного контроля положения протяженных установок.

Научная новизна

- Предложено физически мотивированное использование лазерного луча для создания метрологического обеспечения процесса сооружения крупномасштабного исследовательского оборудования нового поколения для экспериментов ТэВ-диапазона;
- Создан лазерный аппаратно-программный комплекс (ЛАПК), превосходящий традиционные метрологические системы как по точности, так и по скорости обмера;
- Разработана и применена для сборки калориметра ранее отсутствовавшая методика предсказательного описания эволюции формы крупномасштабного детектора, обусловленной непрерывной деформацией элементов его конструкции в процессе сооружения;
- Обнаружен эффект ослабления флуктуационного колебания оси лазерного луча при прохождении в атмосферном воздухе через трубу и зависимость этого эффекта от звуковых параметров трубы как 3D-резонатора;
- Предложена физически мотивированная схема создания протяженного лазерного луча в качестве координатной оси для метрологического мониторинга;
- Признано изобретением «Устройство для формирования лазерного луча»: патент на изобретение № 2401986 РФ от 20 окт. 2010 г.

Практическая ценность.

- Развитые методы метрологического контроля и созданный лазерный аппаратно-программный комплекс применены на всех ключевых этапах сооружения основных структурных систем ядерного абсорбера адронного калориметра АТЛАС и в его полномасштабной сборке, обеспечив достижение жестких проектных допусков на геометрические параметры детектора;
- Создан ядерный абсорбер адронного калориметра - существенная часть калориметрического комплекса установки АТЛАС, играющий ключевую роль в получении важной новой информации принципиального научного значения в исследовательской программе АТЛАС на Большом адронном коллайдере;
- Предложен и изготовлен ряд новых метрологических устройств, программное обеспечение и методики, представляющие практический интерес при планировании и создании крупномасштабных исследовательских установок для экспериментов нового поколения;
- Обнаружено явление стабилизации положения лазерного луча в воздушной среде при прохождении его через трубу, которое является физической основой для создания новых методик прецизионной лазерной метрологии.

Автор защищает.

- ◆ Разработка лазерных метрологических методик и их применение при сборке модулей ядерного абсорбера адронного калориметра АТЛАС.
- ◆ Комплекс метрологического и программного обеспечения сборки адронного калориметра.
- ◆ Метод прогнозируемого сооружения крупногабаритных конструкций в режиме непрерывного изменения их формы во время сборки.
- ◆ Результаты исследования неопределённости пространственного положения лазерного луча при его распространении в воздушной среде.
- ◆ Наблюдение и результаты исследования явления стабилизации положения лазерного луча в воздушной среде при прохождении его через трубу.
- ◆ Методы создания длинной лазерной реперной линии для использования в качестве координатной оси при контроле положения протяженных исследовательских установок и иных крупномасштабных сооружений.

Апробации работы и публикации. Основные результаты работы докладывались на научно-методических семинарах Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова Объединенного института ядерных исследований, регулярных международных рабочих совещаниях коллаборации АТЛАС в ЦЕРНе, Международном совещании по ускорителям (Октябрь 2004г., Женева, Швейцария). Они опубликованы в виде статей в журналах «Письма в ЭЧАЯ», «ЭЧАЯ», «Apply Physics Letters», а также в изданиях ОИЯИ и ЦЕРН.

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

Получен патент Российской Федерации на изобретение «Устройство для формирования лазерного луча» № 2401986 РФ 20 окт. 2010 г.

В диссертации обобщены результаты работ автора, выполненных в 1997-2010 гг. в Объединенном институте ядерных исследований и Европейском центре ядерных исследований.

Структура диссертации

Диссертация объёмом 168 страниц состоит из введения, пяти глав, четырёх приложений и заключения, в котором приводятся основные результаты. Содержит 3 таблицы, 116 рисунков, 30 формул и список цитируемой литературы из 54 ссылок.

Содержание работы

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

Первая глава имеет обзорный характер.

Описаны общие характеристики лазерного луча, связанные с его распространением в пространстве после выхода из оптического резонатора: расходимость луча, его пространственная модовость. Рассмотрены возможности коллимирования его на большие расстояния.

Для применения лазерного луча в метрологии приведены зависимости максимальной длины коллимации Z_{\max} от начального диаметра лазерного луча в схеме фокусируемой коллимации (рис. 2). В этом способе диаметр лазерного луча на всём протяжении его распространения не превышает начального значения, что является важным достоинством предложенной схемы при её применении в устройствах с

использованием длинных лазерных реперных линий.

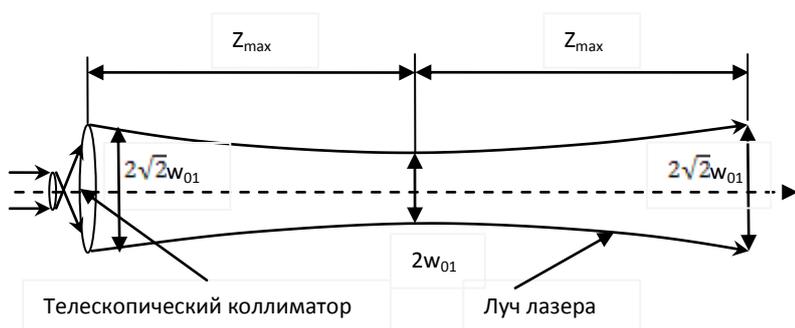


Рис.2. Коллимация лазерного луча с фокусировкой

Приводимые в главе данные

говорят о возможности использования лазерного луча в метрологии больших расстояний (1-5 км).

Для обоснования применения лазерного луча в качестве реперной линии исследованы стабильность его положения в пространстве и максимальная длина коллимированного распространения. Для минимального смещения δ лазерного луча с ограничением его дробовым шумом в дуантном позиционно-чувствительным фотоприёмнике, получено выражение:

$$\delta_{\text{др.шум}} = \frac{\pi d_{\text{л}}}{8} \sqrt{\frac{2h\nu\Delta f}{\eta P_{\text{л}}}}, \quad 1^*$$

^{1*} Выражение для $\delta_{\text{др.шум}}$ получено в работе: Batusov V., Budagov J., ... Lyablin M. et al.

Photodetector Noise Limitations of the Laser Ray Space Localization Precision (JINR; E13-2008-90).

где d_l - диаметр лазерного луча, Δf - ширина полосы измеряемого сигнала, η - квантовая эффективность фотоприёмника, h - постоянная Планка, ν - частота лазерного излучения P_l - мощность лазерного луча.

При характерных значениях $d_l = 10^{-2}$ м, $\eta = 0.5$, $P_l = 10^{-3}$ Вт, $\Delta f = 1$ Гц, $\nu = 7,5 \cdot 10^{14}$ Гц, получаем $\delta_{др.шум} = 1,7 \cdot 10^{-10}$ м. Оценка $\delta_{др.шум}$ говорит об исключительных точностных возможностях применения лазерного луча в качестве реперной линии (координатной оси).

Исследованы внешние ограничения на стабильность положения лазерного луча. Они в основном связаны с нестабильностями положения лазерного источника. Это сейсмическая нестабильность основания лазера и собственно механическая нестабильность резонатора лазера, которые приводят в дальнейшем к угловому отклонению лазерного луча от первоначального направления. Для исключения влияния лазерного источника на стабильность положения лазерного луча предложено использовать оптико-волоконную развязку.

Вторая глава посвящена описанию Лазерной измерительной системы (ЛИС).

Главные структурные единицы адронного калориметра - т.н. модули. При их сборке возникла необходимость прецизионной юстировки составных частей и последующего обмера изготовленного модуля. Общепринятые измерительные технологии в силу больших габаритов модуля (длина 5,6 м, высота 1,9 м) и жесткого допуска (+0,6 мм) на неплоскостность его боковых поверхностей требуют использования дорогостоящей оптической аппаратуры. В реалиях производственного процесса применение такой аппаратуры являлось крайне затруднительным. В этих условиях была предложена и реализована новая измерительная технология с применением лазерного луча.

Описана идеология ЛИС. Вводится понятие лазерной реперной линии, соединяющей лазерный источник и центр (О) позиционно-чувствительного фотоприёмника (ПЧФ). Физическим «основанием» этой линии является лазерный луч. На примере определения профильной линии на поверхности (рис. 3) показана возможность измерения её геометрических параметров относительно лазерного луча.

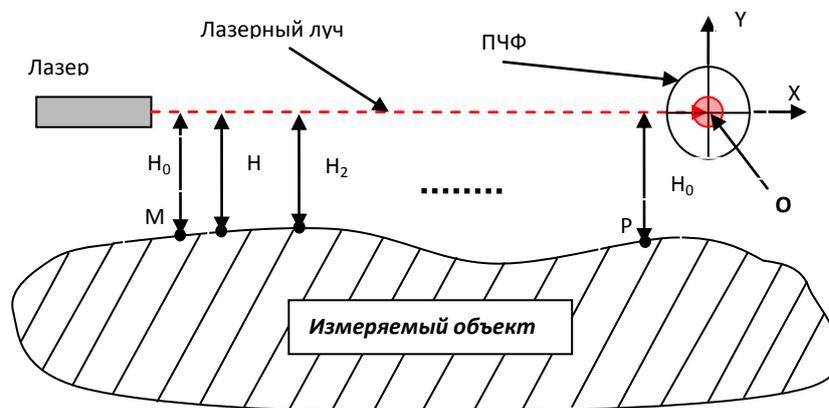


Рис.3. Схема измерения профильной линии МР Лазерной измерительной системой (ЛИС)

Располагая лазерную реперную линию над измеряемой поверхностью таким образом, чтобы начальная (М) и конечная (Р) точки находились на одинаковой высоте (H_0), измеряем расстояния от оси лазерного луча до поверхности измеряемого объекта в промежуточных точках. Затем, вычитая высоту H_0 из данных измерений, определяем профиль линии МР.

Рассмотрены технологии применения ЛИС при обмере модулей адронного calorиметра. Для определения главного контролируемого параметра, неплоскостности боковой поверхности ($5,6 \times 1,9 \text{ м}^2$) модуля, необходимо измерить величины её скрученности (твист). Описана предложенная технология измерения твиста квазиплоской поверхности при помощи диагонального метода. Использование этого метода позволило значительно улучшить геометрические параметры собираемых модулей, что в дальнейшем определяющим образом обеспечило достижение жестких проектных точностей сборки барреля адронного calorиметра.

Показано, что «идеология» ЛИС легко применима при создании измерительных систем, предназначенных для обмера поверхности (2D-измерения), объемных объектов (3D-измерения). Описаны варианты методик с использованием ЛИС.

Перспектива в развитии ЛИС состоит в изготовлении компактного лазерного блока. В этом случае возможен сложный 3D-обмер с расположением активных элементов ЛИС на самом измеряемом объекте. Показано, что если связывать измерительные элементы в одну метрологическую сеть, расположенную на сложном 3D-объекте, можно получить качественно новую систему измерений. Такая метрологическая сеть позволяет автоматически осуществлять мониторинг геометрического положения измеряемого объекта. Например, при проведении измерений на установке АТЛАС требуется мониторировать расположение детектирующих систем относительно пучков частиц.

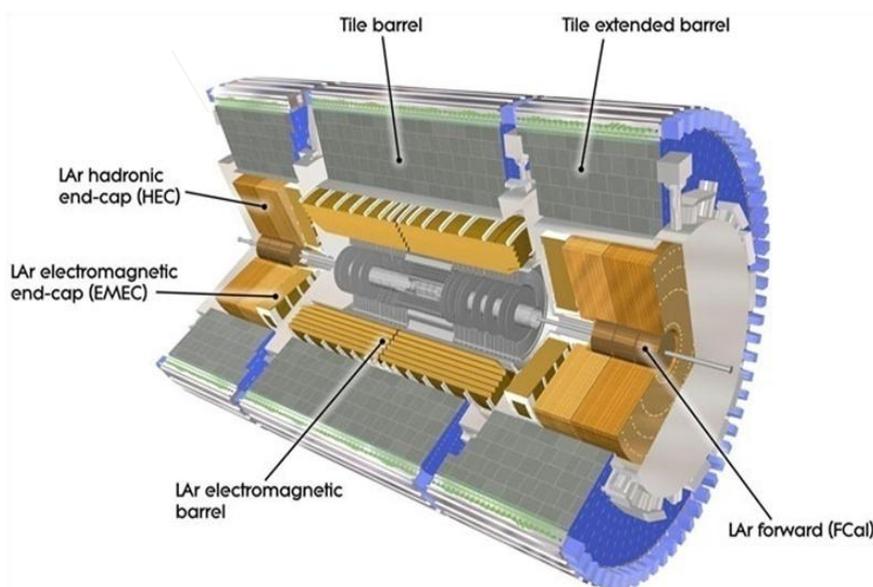
Рассмотрены варианты ЛИС для проведения дистанционных следящих измерений в различных вариантах расположения мониторируемого оборудования:

- расположение измеряемых объектов вдоль прямой линии (линейный ускоритель)
- сложный 3D измеряемый объект.

При использовании встроенного дальномера, измеряющего расстояние по принципу локации, ЛИС приобретает черты, свойственные теодолитной измерительной системе. Принципиальная новизна: предложенный вариант ЛИС свободен от недостатка теодолитной системы - зависимости точности измерений от оператора. Действительно, достаточно приблизительно навести лазерный луч на ПЧФ, чтобы получить с него «сигнал рассогласования», который можно использовать для автоматической юстировки лазерного луча на его центр. Таким образом, кардинально меняется технология измерений: исключено влияние оператора на процесс измерения.

В третьей главе рассмотрено применение Лазерной измерительной системы в производстве модулей - главных структурных единиц адронного калориметра - и в метрологическом обеспечении сборки барреля адронного калориметра.

ядерный абсорбер адронного калориметра (Рис. 4) представляет собой три



цилиндрических устройства (барреля) диаметром 8.4 м, длиной 19 м и весом 2300 т. Каждый баррель состоит из 64 модулей.

Рис.4. Общий вид адронного калориметра АТЛАС

В Дубне в 1999-2002 гг. были собраны 65 модулей центральной части барреля адронного калориметра.

Модуль (Рис. 5) - сборная конструкция, состоящая из 19 субмодулей, несущей балки, 2 внешних и 2 верхних пластин. При помощи болтов и сварочных соединений производилась сборка модуля в единую конструкцию длиной 5,6 м, высотой 1,9 м и весом 20 т.

Был установлен жесткий проектный допуск на производство модулей: неплоскостность боковых поверхностей модуля должна быть не более +0.6 мм к номинальным размерам. Темп производства - один модуль за две недели.

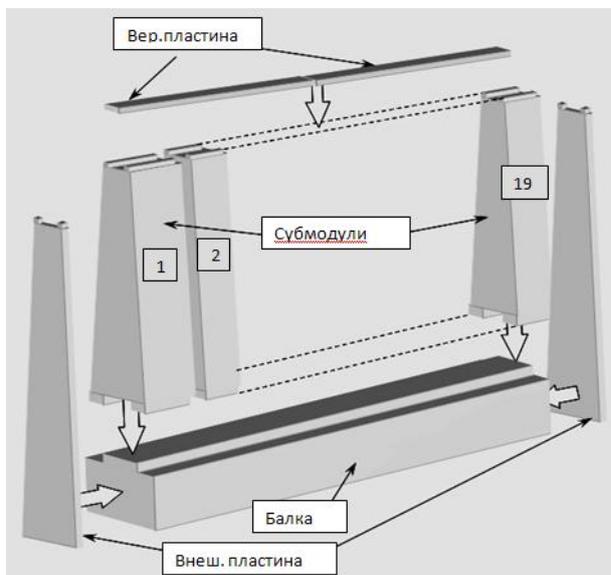


Рис.5. Схема сборки модуля ядерного адсорбера адронного калориметра

Из-за отсутствия альтернативных методов контроля, которые обеспечили бы необходимый темп и точность измерения, разработана, создана и применена Лазерная измерительная система.

ЛИС позволила проводить входной контроль геометрических параметров несущей балки, её установку на сборочный стапель, юстировочные работы на этапе крепления субмодулей и внешних пластин и, после сварки верхних пластин, «выходной» обмер готового модуля.

Описаны технологии юстировок на этапе производства модуля и выходного контроля уже собранного модуля. Одной из основных проблем корректной сборки модульной конструкции является наличие неточности изготовления его составных частей. Поэтому был введён входной контроль балки и субмодулей с измерением их скрученности (твиста). Обмеры проводились по технологии «диагонального метода», описанного во второй главе. Затем осуществлялась корректная установка балки и субмодулей при помощи ЛИС в позицию с минимизацией их собственных твистовых искажений. Далее выполнялась взаимная юстировка субмодулей при помощи ЛИС по технологии профильной линии. После сварки верхних пластин производился выходной контроль, в том числе и на наличие остаточного твиста модуля.

На рис. 6 показана схема проведения измерений при окончательном контроле модуля, в результате которого формировалась база данных геометрических параметров его боковых поверхностей и габаритов. Измерения проводились по четырём линиям: три на субмодульной части модуля и одна на нижнем основании балки.

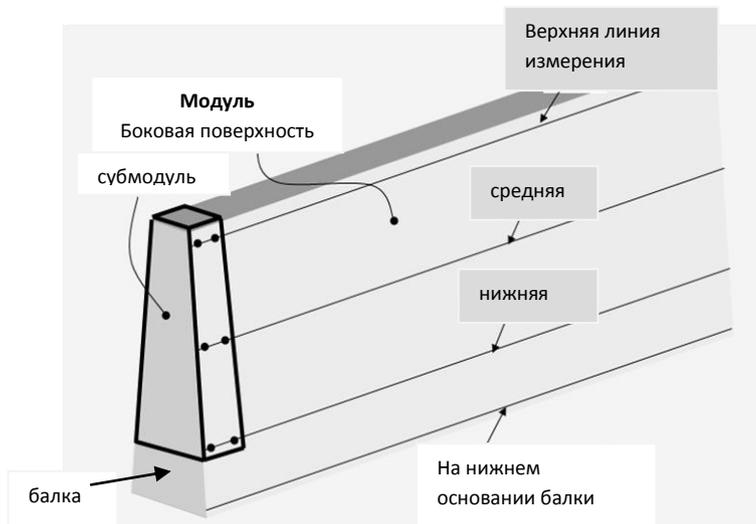


Рис.6. Схема расположения линий измерения при проведении выходного обмера модуля адронного калориметра

номинальные размеры.

По специальной программе определялись геометрические параметры выходов боковых поверхностей за

Для обмера модулей адронного калориметра АТЛАС использовались приспособленные для этого варианты ЛИС (рис. 7).

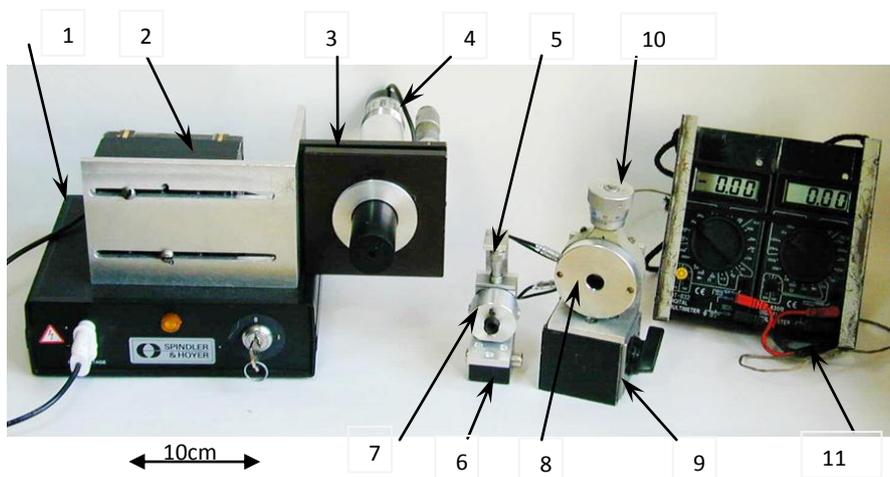


Рис.7. Два типа ЛИС, разработанных в ОИЯИ и применявшихся при изготовлении модулей адронного калориметра АТЛАС:

1 - блок питания гелий-неонового лазера, 2 - магнитная подставка для гелий-неонового лазера и твёрдотельного лазера, 3 - угловой позиционер для лазерных источников, 4 - гелий-неоновый лазер, 5 - позиционер малогабаритного дуантного фотоприёмника, 6 - малогабаритное магнитное основание, 7 - малогабаритный дуантный фотоприёмник, 8 - большой дуантный фотоприёмник, 9 - большое магнитное основание, 10 - позиционер большого дуантного фотоприёмника, 11 - мультиметры

Представлены суммарные результаты выходного обмера модулей, собранных в Дубне. На рис. 8 показаны выходы за номинальный размер всех 65 модулей.

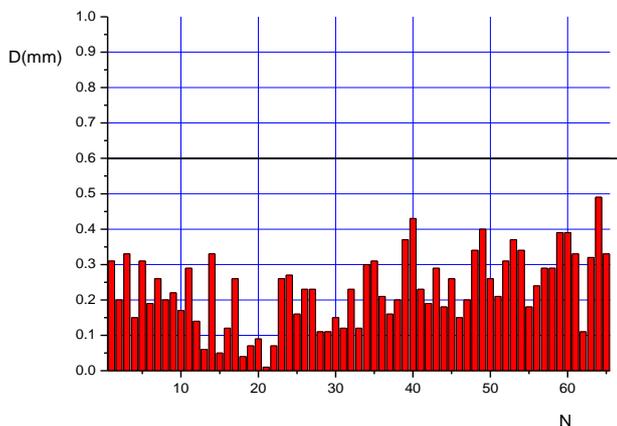


Рис.8. Выходы D за номинальные размеры изготовленных в ОИЯИ модулей

На Рис.9 представлена соответствующая этим данным гистограмма.

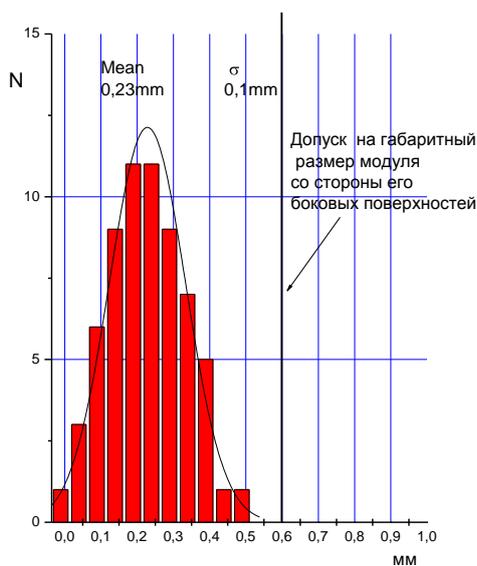


Рис.9. Гистограмма выходов за номинальные размеры изготовленных в ОИЯИ модулей

Средняя величина выхода за номинальные размеры составила 0,23 мм, что более чем в 2,5 раза лучше проектного допуска. Достигнутый «запас прочности» оказался определяющим при последующей сборке барреля.

Для определения влияния транспортировки модулей из Дубны в ЦЕРН проведены сравнительные измерения 12 модулей. Выявлен «наведённый твист» модулей в ЦЕРНе. При установке модулей на неплоское основание модуль скручивался (твистировался). Предложена и осуществлена технология нивелировки твистовых искажений и корректного сравнения результатов измерений. На

рис. 10 показаны данные по выходу за номинальные размеры (отклонение) модуля №7, полученных в Дубне в сравнении с данными измерений в ЦЕРНе. Видно наличие наведённого твиста.

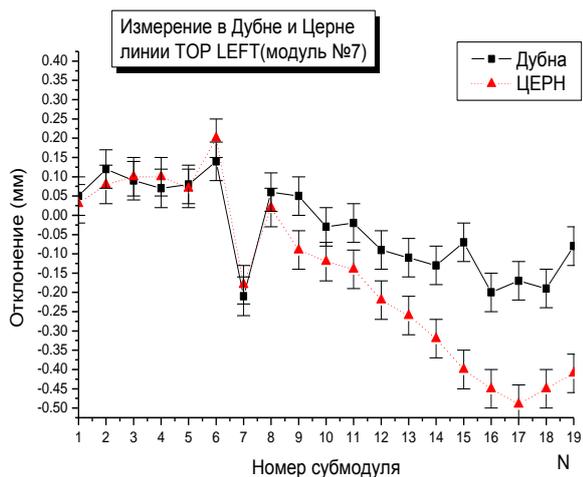


Рис.10. Отклонения боковой поверхности модуля №7 от номинальных размеров, измеренных в Дубне и после его транспортировки в ЦЕРН

Путём пересчёта данных твистированного модуля (рис. 11) получены результаты, совпадающие с данными измерений в Дубне с точностью $\sigma_{\text{л}} = \pm 60$ мкм. Фактически этим показана точность измерений ЛИС при обмере модуля, которая значительно превышает точность теодолитных измерений $\sigma_{\text{т}} = \pm 200$ мкм.

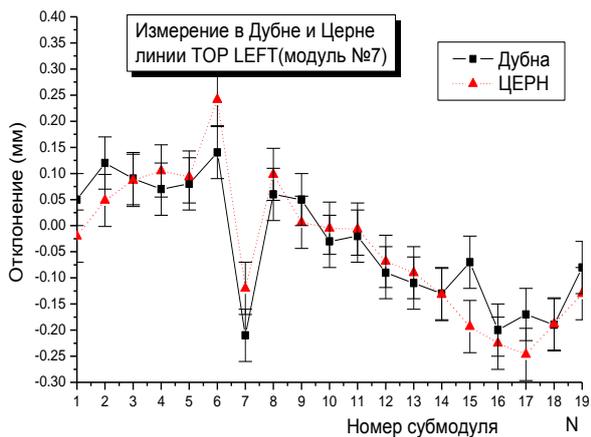


Рис.11. Отклонения боковой

поверхности модуля №7 от номинальных размеров в Дубне и после его транспортировки в ЦЕРН после применения коррекции твистового искажения

Корректность измерительной методики для модулей при помощи ЛИС подтверждена сравнением с сертифицированной

высокоточной ($\sigma_{\phi} = \pm 50 \mu\text{м}$) фотограмметрической системой. На рис.12 показаны выходы за номинальные размеры (Отклонение) модуля №8, измеренные лазерной и фотограмметрической системами. Анализ обеих методик измерения, учёт систематических ошибок при переводе данных измерения из одной системы координат в другую, согласованная коррекция габаритных размеров дали весьма близкие результаты со средним значением различия $42 \mu\text{м}$ и $\sigma = \pm 86 \mu\text{м}$ в распределении этих различий (Рис.13). Сравнение с фотограмметрической системой подтвердило заявленные ранее высокоточные характеристики ЛИС и показало возможность совместного метрологического использования обеих систем.

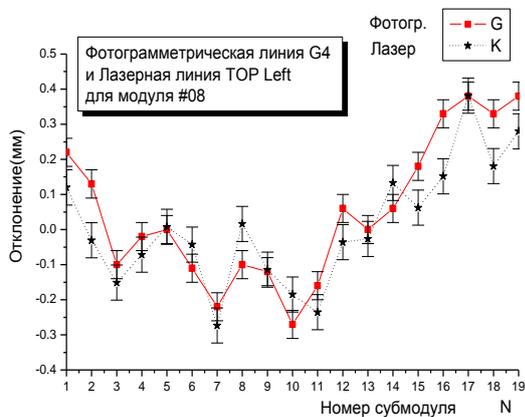


Рис. 12. Отклонения боковой поверхности модуля №8 от номинального размера, измеренные лазерной и фотограмметрической системами

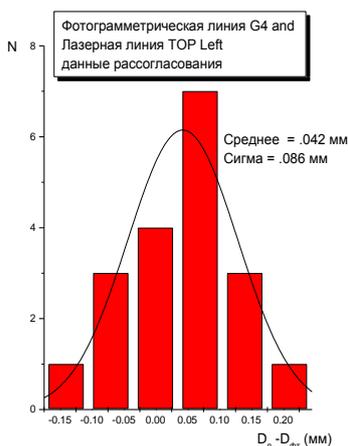


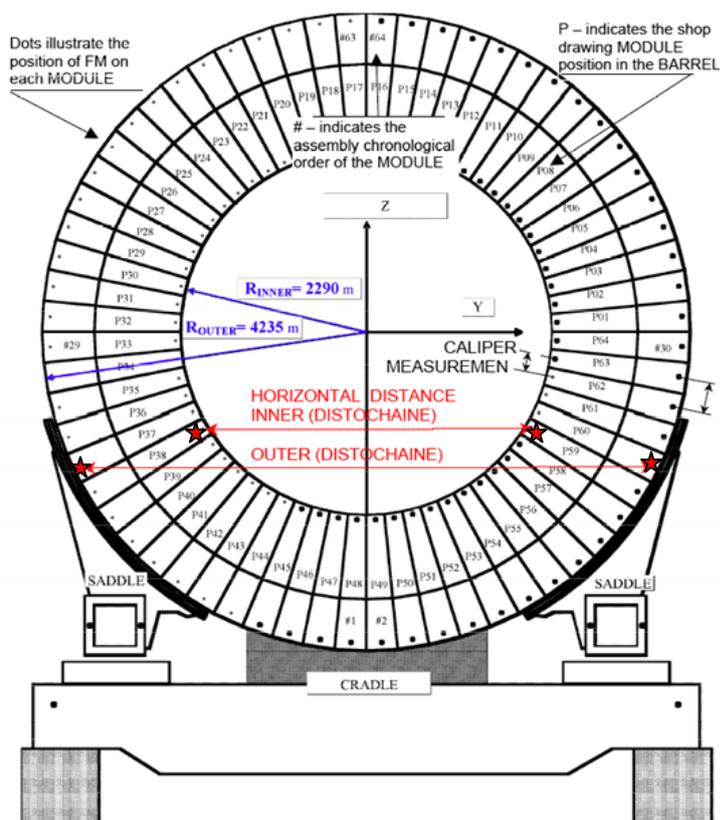
Рис. 13. Распределение разности данных измерения лазерной и фотограмметрической системами

После изготовления всех модулей в ОИЯИ, Барселоне и Аргонне в ЦЕРНе для отработки

технологии и выявления трудностей выполнена предварительная сборка баррелей.

Данные по геометрическим параметрам боковых поверхностей модулей имелись только для созданных в ОИЯИ модулей. Поэтому были определены отсутствовавшие данные: при помощи ЛИС обмерены и все изготовленные в Аргонне (США) модули. По данным измерения сформирована база данных геометрических параметров модулей. Используя базу данных, по специальной программе производился предварительный расчет разделительных стальных прокладок между модулями в барреле и последующая их установка. Роль прокладок совершенно исключительна: устанавливаемые между модулями прокладки с рассчитанными толщинами были единственным инструментальным способом воздействия на эволюцию формы баррелей в процессе их сборки из модулей.

Для контроля положения модулей в собираемом барреле использовались 960 метрологических меток, предварительно установленных по вертикальной оси модуля при помощи специально сконструированного высокоточного оборудования. Контрольные измерения координат части меток, проведённые при помощи фотограмметрической системы, показали: номинальное положение меток совпадает с измеренными с точностью $\pm 0,1$ мм. Такое высокоточное выставление меток позволило в дальнейшем проводить реконструкцию геометрических параметров собираемого барреля, основываясь только на измерениях координат меток.



На рис. 14 показана схема барреля адронного калориметра АТЛАС.

Рис.14. Схема барреля - центральной секции адронного калориметра, собранного из 64 модулей. Distochaine - прецизионная рулетка (фр.), caliper - штангенциркуль (англ.), saddle - седло (англ.), cradle - люлька (англ.).

Баррель - самоподдерживающаяся, собранная из 64 модулей конструкция, опирающаяся на два основания - SADDLE. Начало сборки барреля производилось на временном основании CRADLE (после доведения сборки до уровня 18 модулей оно вынималось). Для ритмичного метрологического контроля сборки барреля (два модуля в сутки) разработана система измерений прецизионной рулеткой (ПР), откалиброванной на интерференционном метрологическом стенде ЦЕРН. Суть методики - определение разности между номинальными (проектными) и измеренными расстояниями между метками «противоположных модулей» (На рис. 14 обозначены - ★). При помощи ПР измерялись горизонтальные расстояния между такими метками. Это позволило судить об отклонении геометрических параметров барреля от проектных. Контрольные высокоточные измерения части меток при помощи теодолита дали величину совпадения с ПР в пределах $\pm 0,7$ мм. Эта точность оказалась достаточной для оперативного контроля геометрических параметров барреля.

Первым собирался внешний короткий баррель из модулей, произведённых в Барселоне (Испания). На этапе сборки «40 модулей» обнаружился эффект уменьшения горизонтальных расстояний относительно номинальных значений.

На рис. 15 показана фаза сборки, соответствующая собраным 46 модулям, где № представляет собой номер последовательно собранного модуля.

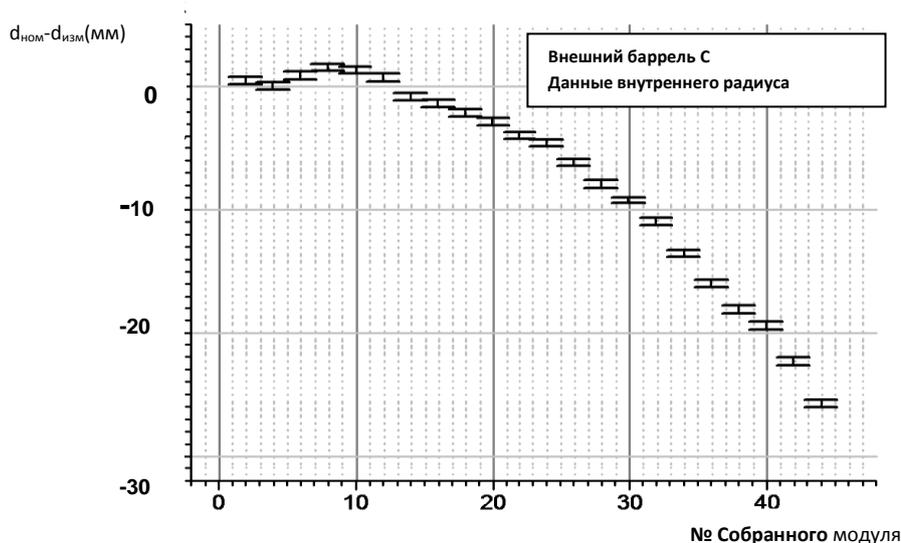


Рис.15. Разность $d_{ном} - d_{изм}$ между номинальными и горизонтальными расстояниями симметричных меток «противоположных модулей» в зависимости от номера собираемого модуля

Выявлена причина этого эффекта, не предусмотренного в проекте. Оказалось, что прокладки, расположенные в верхней (узкой) части модуля, деформировались под нагрузкой установленных при дальнейшей сборке модулей. Вследствие деформации прокладок уменьшались расстояния между модулями, что в конечном итоге привело к существенной деформации («схлопыванию») сборки.

Рис. 16 иллюстрирует окончательные величины ($D_{\text{ном}} - D_{\text{изм}}$) уменьшения расстояния между модулями за счёт деформации прокладок в зависимости от номера собираемого модуля.

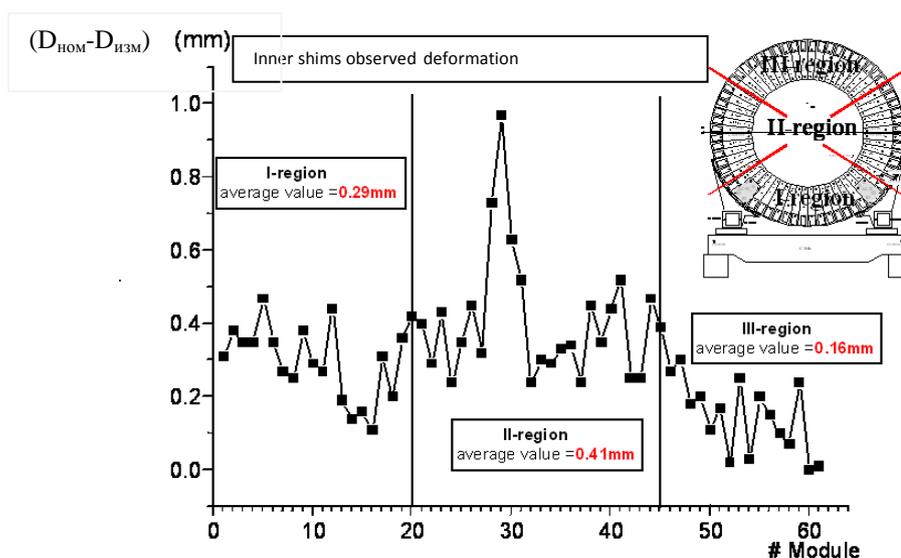


Рис. 16. Окончательные величины $D_{\text{ном}} - D_{\text{изм}}$ уменьшения расстояния между модулями за счёт деформации прокладок в зависимости от номера собираемого модуля

Предложена методика, обеспечившая корректное проведение сборки в условиях изменения геометрических параметров детектора за счёт деформаций прокладок. Методика включала в себя измерение межмодульных расстояний (рис. 14) и специальную вычислительную программу восстановления координат метрологических меток собираемого барреля. Приводится алгоритм программы.

Эта методика позволила не только определить геометрические параметры собранной части, но и вести виртуально-предсказательную сборку, что оказалось решающим фактором для успешного сооружения всех трёх баррелей адронного калориметра АТЛАС.

Результаты использования предложенной технологии предсказательной сборки в режиме изменения геометрических параметров собираемого барреля наиболее полно проявились на финальной стадии сборки барреля.

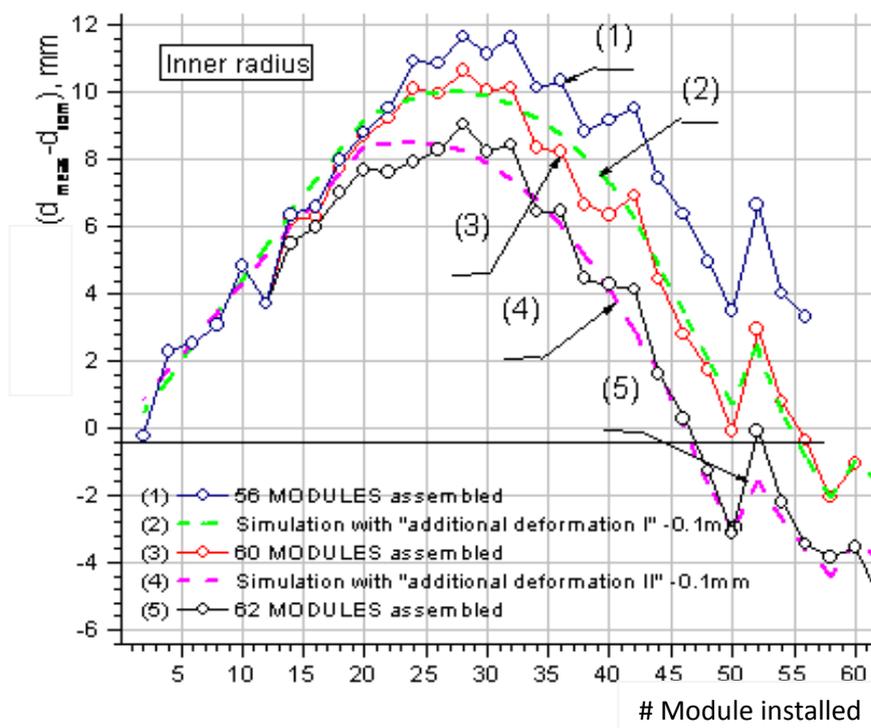


Рис. 17. Зависимость разности $d_{изм} - d_{ном}$ между измеренными и вычисленными отклонениями от номинальных размеров горизонтальных расстояний между метками «противоположных модулей» в трёх положениях: (1) - сборка 56 модулей, (2) – предсказание сборки 60 модулей, (3) - сборка 60 модулей, (4) – предсказание сборки 62 модулей, (5) –сборка 62 модулей

На рис. 17 представлена зависимость разности $d_{изм} - d_{ном}$ между измеренными и номинальными (проектными) размерами горизонтальных расстояний симметричных меток противоположных модулей от номера собираемого модуля на этапе сборки 56, 60, 62 модулей. Также показаны соответствующие данные, полученные при помощи программы предсказательной сборки барреля. Как видно из рис. 17, по мере завершения сборки барреля его геометрические параметры приближаются к номинальным значениям. Это достигается путём подбора дополнительных, корректирующих деформацию прокладок, размеры которых вычислены при помощи программы предсказательной сборки. В конечном итоге достигнута основная цель: сборка финальной части барреля была проведена таким образом, что последний модуль установился в зазор практически номинального размера.

Четвертая глава посвящена результатам исследования влияния воздушной среды на стабильность положения лазерного луча, что существенно при его применении в качестве реперной линии.

Измерены величины $\sigma_B(L)$ среднеквадратичного отклонения пространственного положения оси лазерного луча в зависимости от расстояния L , пройденного им в воздушной среде. Подробно описаны схема эксперимента, методика проведения измерений и калибровка. На рис. 18 показаны результаты этого исследования.

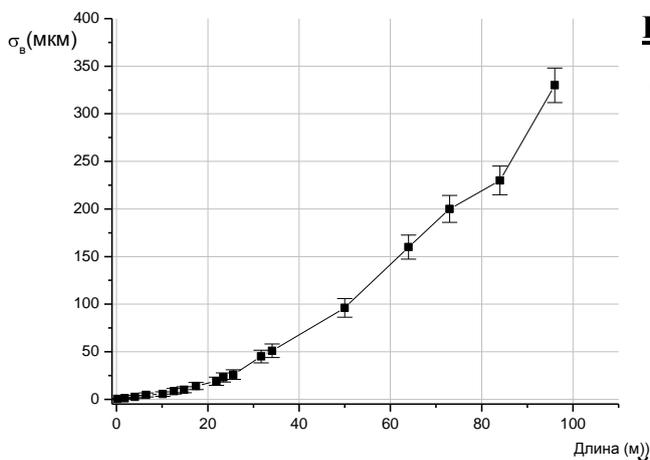
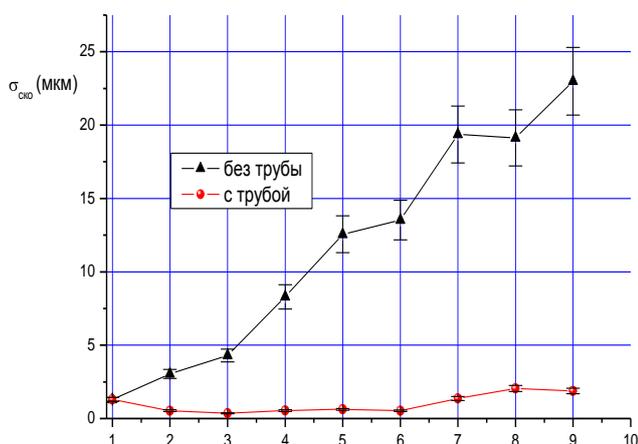


Рис. 18. Неопределённость (среднеквадратичное отклонение) $\sigma_B(L)$ пространственного положения оси лазерного луча в зависимости от расстояния, пройденного им в воздушной среде. Использованы телескопическая насадка - коллиматор и поворотная призма

Из рис. 18 видно, что на расстояниях ~ 30 м, характерных для теодолитных измерений, неопределённость положения лазерного луча составила $\sigma_B(30 \text{ м}) = 40 \text{ мкм}$, т. е. достигнутая точность практически в пять раз лучше точности при использовании теодолитов.

При проведении юстировочных работ по сборке барреля для экранировки потоков тёплого воздуха была применена полая труба, через которую пропускался лазерный луч, и было обнаружено значительное (на порядок) уменьшение дрожания лазерного луча.

Исследовано распространение лазерного луча в трубе на расстояниях 1-9 м. Описаны схема этого эксперимента и методика проведения измерений. На Рис.19



показана зависимость σ_{RMS} лазерного луча от расстояния в полой трубе и в воздухе (при отсутствии трубы). Эти измерения были выполнены в других условиях по сравнению в экспериментом по измерению $\sigma_B(L)$ (Рис.18).

Рис. 19. Лазер DS-670: зависимость $\sigma_{ско}$ от расстояния L (м), пройденного лучом лазера до точки наблюдения

Предложено возможное объяснение обнаруженного явления: причиной стабилизации положения лазерного луча в трубе является стоячая звуковая волна, которая самопроизвольно генерируется в трубе внешними шумовыми источниками. Стоячая

звуковая волна выравнивает показатель преломления воздушной среды внутри трубы, что и сказывается на уменьшении дрожания лазерного луча.

Для проверки этого предположения проведены эксперименты, демонстрирующие наличие самопроизвольно возникающих стоячих волн в трубах различной длины. описаны методики проведения экспериментов. На рис. 20, 21 представлены их результаты.

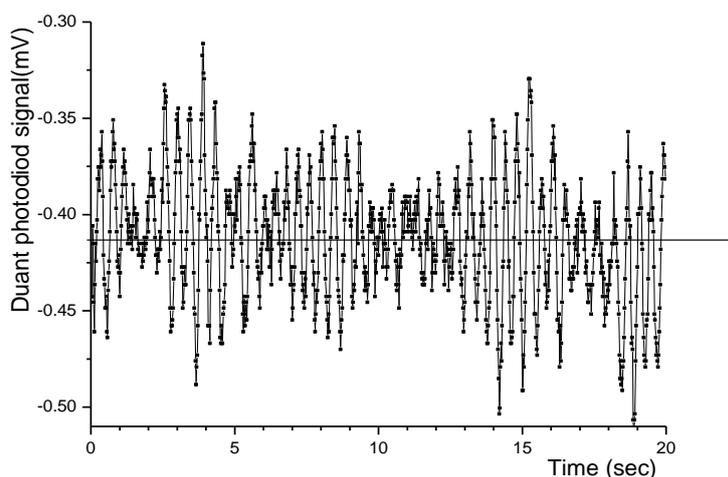


Рис. 20. Осциллограмма сигнала с фотоприёмника от стоячей звуковой волны в трубе длиной $L=34$ м; получена при регистрации колебаний лазерного луча, отраженного от тонкой зеркальной мембраны на торце трубы

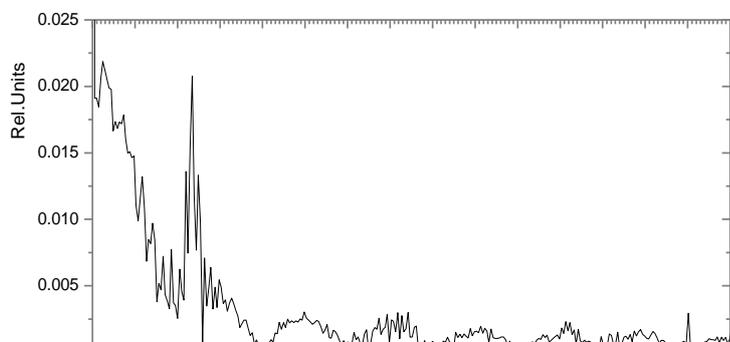


Рис. 21. Фурье-анализ звуковых колебаний, представленных на рис. 20; наблюдается пик основной моды стоячей звуковой волны на длине $L=34$ м с частотой 2,4 Гц

Для проверки выдвинутой нами гипотезы о роли стоячей звуковой волны исследована стабильность положения лазерного луча в открытой и закрытой трубе фиксированной длины $L=10$ м. В закрытой стеклянными окнами трубе, как ожидается, возникает, как в 3D акустическом резонаторе, стоячая звуковая волна большей интенсивности, чем в случае с открытыми концами трубы, и, следовательно, наблюдаемый эффект — стабилизация оптических параметров воздушной среды - должен усилиться.

В таблице 1 представлены соответствующие результаты.

Таблица. 1. Зависимость σ лазерного луча от условий прохождения лазерного луча

N	Условия эксперимента	σ (мкм)
1	Лазерный луч в воздухе: без трубы	$7,5 \pm 0,8$
2	Лазерный луч в трубе: оба конца трубы открыты	$2,3 \pm 0,2$
3	Лазерный луч в трубе: один конец трубы закрыт	$1,6 \pm 0,2$
4	Лазерный луч в трубе: оба конца трубы закрыты	$0,2 \pm 0,02$

Действительно, зарегистрированное усиления эффекта подтверждает высказанное предположение.

Была также исследована зависимость $\sigma_T(L)$ положения лазерного луча от длины в закрытой трубе (Рис.22).

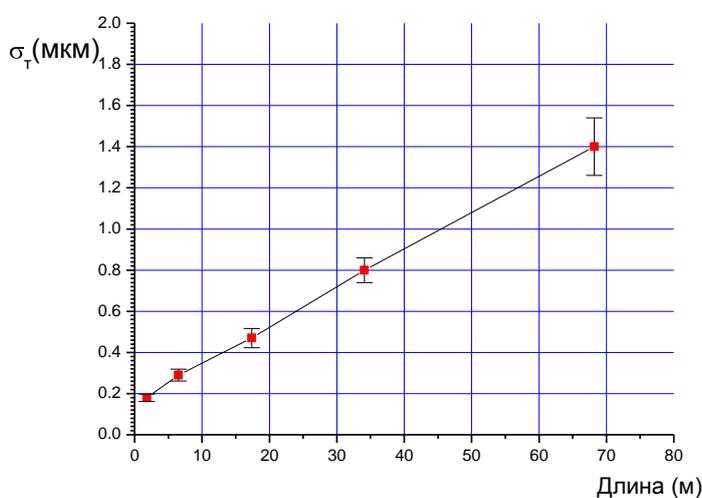


Рис. 22. Зависимость $\sigma_T(L)$ от расстояния, пройденного лазерным лучом в закрытой трубе

Используя данные рис. 18, можно получить зависимость коэффициента улучшения разрешения $R(L) = \sigma_B / \sigma_T$ от длины распространения лазерного луча (рис. 23).

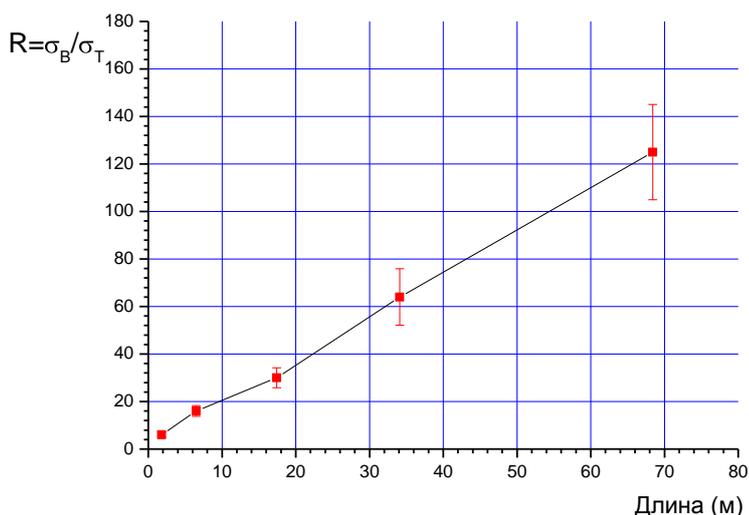


Рис. 23. Зависимость коэффициента улучшения разрешения $R(L)$ от длины распространения лазерного луча

чем на два порядка.

Обнаруженное явление подавления флуктуационного колебания лазерного луча в закрытой трубе на достаточно больших расстояниях может, как представляется, служить

физической основой для создания технических средств прецизионной лазерной метрологии больших расстояний.

Пятая глава посвящена исследованию возможности построения длинных лазерных реперных линий. Длина аналога - струнная реперная линия - ограничена механической прочностью струны. Практика показывает, что длина струнной реперной линии составляет не более ~150м. Между тем, для проектируемых современных линейных ускорителей (ЛС, например, имеет протяженность 40км) требуются реперные линии существенно большей длины.

В гл. 1 показано, что использование лазерного луча в качестве физической основы реперных линий открывает возможность построения одиночной стабильной реперной линии (координатная ось) длиной до 5 км.

Предложена технология «продолженного коллимирования» лазерной реперной линии, основанная на выдвинутой идее о возможности соосного распространения основного и дополнительного лазерных лучей. В результате общая реперная линия удлиняется на необходимую для проведения исследований длину (рис. 24).

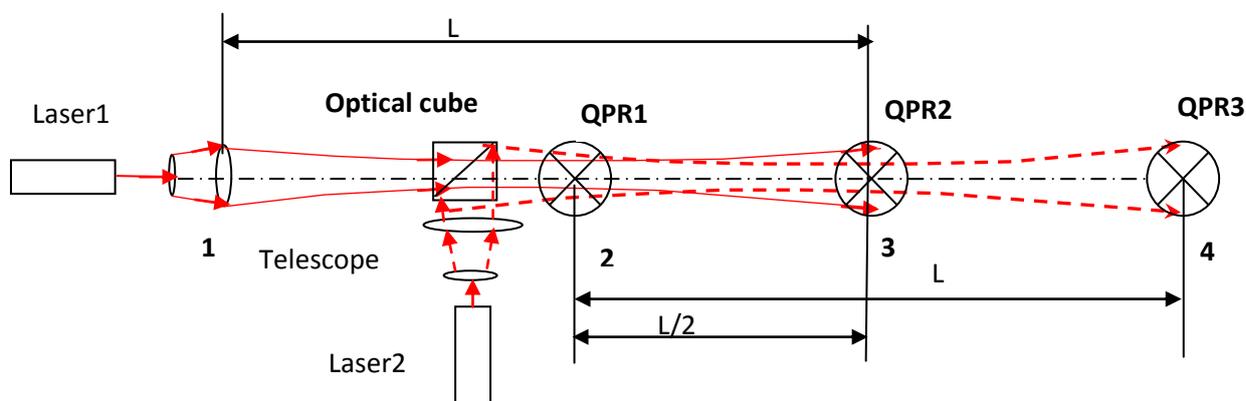


Рис. 24. Схема «продолженного коллимирования» лазерного луча

Предложен оптоволоконный вариант «продолженного коллимирования». На рис. 25 представлена продолженная лазерная реперная линия с запиткой одним лазером через оптоволоконный распределительный тракт. Используется факт сохранения одномодового режима распространения лазерного излучения в оптическом волокне значительной длины.

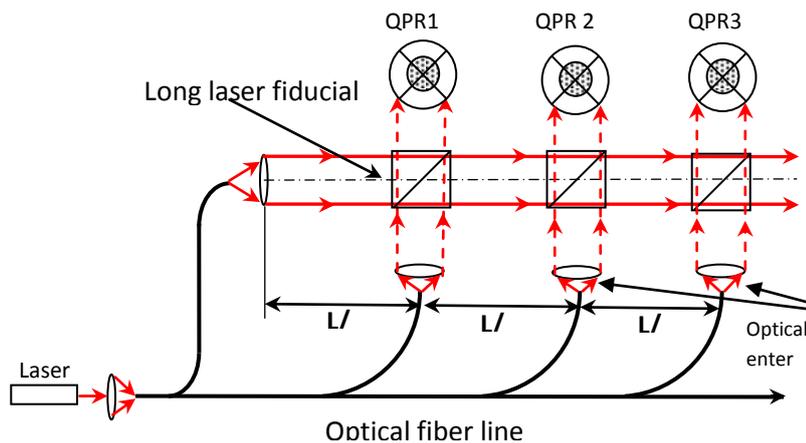


Рис. 24. Схема оптоволоконного подвода лазерного излучения в *продолженную коллимированную лазерную линию*

Рассмотрены существенные технические вопросы построения лазерных реперных линий:

- применение оптоволоконной развязки для устранения влияния нестабильности лазерного источника на стабильность положения лазерного луча;
- использование плоскопараллельных пластин для неразрушающего вывода излучения на измеряемую точку;
- ограничения, связанные с неточностью изготовления оптических элементов.

Предложенные нами варианты реперных линий открывают возможность построения полномасштабной мониторирующей системы долговременной стабилизации положения контролируемых объектов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Разработаны ранее отсутствовавшие физически мотивированные новые методы метрологического обеспечения создания крупногабаритного исследовательского оборудования. Они базируются на использовании лазерного луча и применены на ключевых этапах сооружения адронного калориметра установки АТЛАС - уникального детектора нового поколения для экспериментов ТэВ-диапазона на Большом адронном коллайдере.
2. Впервые создан Лазерный аппаратно–программный комплекс (ЛАПК) метрологического сопровождения прецизионной сборки главных структурных элементов ядерного абсорбера адронного калориметра АТЛАС - 5.6-метровых, 20-тонных модулей. ЛАПК не имеет аналогов в практике сооружения крупномасштабных детекторов и по достигнутой точности (± 30 мкм) и скорости измерений превосходит все традиционные измерительные методики в сопоставимых условиях.
3. Применение ЛАПК обеспечило достижение результата принципиального значения: главный контролируемый параметр - средняя неплоскостность боковых поверхностей произведённых модулей - втрое меньше проектного допуска (+0.6 мм), что сделало возможной сборку барреля адронного калориметра в контролируемом, предсказательном режиме.
4. Впервые создана методика предсказательного описания эволюции формы барреля в процессе его монтажа из модулей, разделённых деформируемыми прокладками. Деформация межмодульных прокладок - явление, не учтённое в первоначальном проекте и выявившееся только при монтаже барреля. Применение новой методики обеспечило достижение проектной цели: калориметр собран с отступлением от диаметра $\varnothing 8400$ мм на 0,1 %, что вдвое лучше проектного допуска.
5. Исследована зависимость точности σ пространственной локализации координаты оси лазерного луча от расстояния, пройденного им в атмосфере. Обнаружены новые эффекты, и получены ранее не приводившиеся в печати данные:
 - установлено, что применение лазерного луча в воздушной среде в качестве визирной линии значительно улучшает точность измерения по сравнению с аналогичными показателями теодолитов и нивелиров в сопоставимых условиях,
 - впервые обнаружен эффект значительного, до 100 раз, снижения σ при прохождении лазерного луча через трубу с атмосферным воздухом с усилением явления при установке на концах трубы оптически прозрачных окон-заглушек,

- впервые указана физическая природа этого явления: стабилизация оптических параметров воздушной среды стоячей звуковой волной, возникающей внутри трубы как 3D-резонатора, под воздействием окружающего широкополосного акустического шума.
6. Разработаны новые принципиальные оптоэлектронные схемы и предложены варианты их инструментальной реализации, позволяющие использование лазерного луча в качестве длинной реперной линии для метрологического мониторинга протяженных объектов научно-исследовательского и гражданского назначения.
 7. Признано изобретением «Устройство для формирования лазерного луча»: патент Российской Федерации №2401986 (соавтор).

Список публикаций

1. **M.Lyablin** et al. Plane parallel mirrors Fabry-Perot cavity to improve Virgo superattenuators. *Physics Letters A*, 1998, V243, #4, p.187-194.
2. V. Batusov, Yu. Budagov, .. **M. Lyablin** et al. High precision laser control of the ATLAS tile-calorimeter module mass production at JINR. *Nucl.Lett.* 2001, Vol.102, p.33-40.
3. V. Batusov, Yu. Budagov, .. **M. Lyablin** et al. Comparison of ATLAS tilecal module No. 8 high precision metrology measurement results obtained by laser (JINR) and photogrammetric (CERN) methods. *Part.Nucl.Lett.*, 2002, Vol.113, p.36-50.
4. V. Batusov, Yu. Budagov, .. **M. Lyablin** et al. The module nuclear absorber of the ATLAS Hadron Calorimeter (An experiment of controlled assembly on the Surface and Underground). *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2009. Vol. 4, p. 337–347.
5. P. Adragna V.Yu., Batusov, Yu.A. Budagov, .. **M.V. Lyablin** et al. The ATLAS hadronic tile calorimeter: From construction toward physics. *IEEE Trans.Nucl.Sci.* 2006, Vol.53, p.1275-1281.
6. В.Ю.Батусов, Ю.А.Будагов, .. **М.В.Ляблин**, и др. Адронный тайл-калориметр установки АТЛАС: опыт создания прототипов и массового производства модулей. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, 2006, Т.37. Выпуск 5.

7. V.Yu. Batusov, Yu.A. Budagov, .. **M.V. Lyablin** et al. ATLAS hadron tile calorimeter: Experience in prototype construction and module mass production. Phys.Part.Nucl., 2006, Vol.37, p.785-806.
8. В. Батусов, Ю. Будагов, .. **М. Ляблин** и др. Модульный ядерный абсорбер адронного калориметра установки АТЛАС (опыт контролируемой сборки на поверхности и под землёй). Письма в ЭЧАЯ, 2009, Т.6, № 4.
- 9.V.Batusov, Yu. Budagov, .. **M. Lyablin** et al. A study of an air media influence on the rectilinearity of laser ray proliferation towards the using for lard distances and high-precision metrology. Phys.Part.Nucl.Lett. 2007, Vol.4,p. 155-156.
10. V.Batusov, Yu. Budagov, .. **M. Lyablin** et al. Laser Beam Fiducial Line Application for Metrological Purposes. Physics of Particles and Nuclei. 2009, Vol. 40, No. 1, p. 115–129.
11. V. Yu. Batusov, Yu. A. Budagov, **M. V. Lyablin**, and A. N. Sissakian. Observation of Specific Features of Laser Beam Propagation in Air with Standing Acoustic Waves. Physics of Particles and Nuclei Letters. 2010, Vol. 7, No. 1, p. 33–38.
12. Батусов В.Ю., Будагов Ю.А., **Ляблин** М.В., Сисакян. А.Н. Устройство для формирования лазерного луча. Патент на изобретение № 2401986 РФ 20 окт. 2010 г.