

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-270

P13-98-270

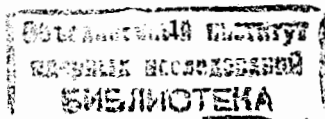
Р.А.Астабатьян, Г.Д.Кекелидзе, С.П.Лобастов,
В.Д.Пешехонов, А.В.Рябов, Л.М.Смирнов

МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ
ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК

1998

Введение

В настоящее время все более широкое применение находят трековые детекторы на основе тонкопленочных дрейфовых трубок (строу) [1]. Среди множества проблем, возникающих при их создании, одной из наиболее важных является обеспечение и контроль прямолинейности и однородности строу по размерам как в процессе изготовления тонкопленочных трубок, так и при сборке всего детектора. Например, сочетание трекера и детектора рентгеновского переходного излучения (РПИ) на основе строу, проектируемого для внутреннего детектора установки ATLAS, предъявляет следующие требования к строу: отклонение от среднего диаметра не должно превышать 10 мкм, сагитта для строу длиной до 50 см должна быть менее 0,3 мм [2]. Это приводит к необходимости проверки всех строу перед их окончательной сборкой в модуль. Наиболее простым и достаточно эффективным методом проверки строу является их тестирование на прохождение пучка света с регистрацией светового пятна, образующегося на выходе строу, ПЗС-матрицей. При этом возможны два метода измерений. В ЦЕРН, в рамках проекта ATLAS, создана установка на основе, описанной в работе [3]. На этой установке строу проверяются на прямолинейность посредством сканирования тонким световым



лучом внешней поверхности трубки, вращающейся вокруг своей оси. Очевидное преимущество метода сканирования – высокая пространственная точность. Однако последняя определяется не только размером единичных элементов ПЗС-матрицы, но и прецизионностью закрепления и перемещения строу соответствующей механической системой. Кроме этого, метод требует многократных измерений и следовательно, ограничен по времени в случае тестирования большого числа строу. С другой стороны, метод сканирования ограничен просмотром строу только с его внешней стороны и не по всей поверхности, что не позволяет обнаружить дефекты, связанные с локальным характером повреждения поверхности строу.

Другим методом, представленным в настоящей работе, является анализ изображения светового пятна от прохождения параллельного пучка света через неподвижные тестируемые строу. Этот метод, более прямой, хотя и менее точный по пространственному разрешению, одинаково чувствителен как к прямолинейности, так и к локальным дефектам строу. Он отличается простотой исполнения, возможностью тестирования установленных в модуль строу, и, по крайней мере, в десятки раз меньшими временами экспозиции при тестировании. Кроме того, второй метод дает возможность юстировки собранных в единый модуль строу до установки в них анодных проволок. Это может существенно облегчить

сборку многомодульных трекеров длиной 50 см и более.

Целью представленной работы являлось исследование возможности простой и быстрой проверки и отбраковки строу методом анализа изображения от светового пятна при прохождении параллельного пучка света через внутреннюю поверхность строу.

Экспериментальная установка

На рис. 1 показан схематический вид экспериментальной установки. Световой поток от источника после коллимации формируется оптической системой в параллельный пучок света с расходимостью не хуже 0,2 мрад и проходит через тестируемый объект. Интегральное изображение этого объекта, после прохождения формирующей изображение линзы, проецируется на ПЗС-матрицу размерностью (512x512) элементов, с линейными размерами единичного элемента (16x16) мкм. Установка работает на линии с ЭВМ, в которую записывается информация об интенсивности светового потока в каждом элементе матрицы и следовательно, о распределении светового потока внутри полученного изображения. Предварительная обработка информации проводилась посредством стандартных процедур по вычету фона, смаза, контрастирования и фильтрации данных.

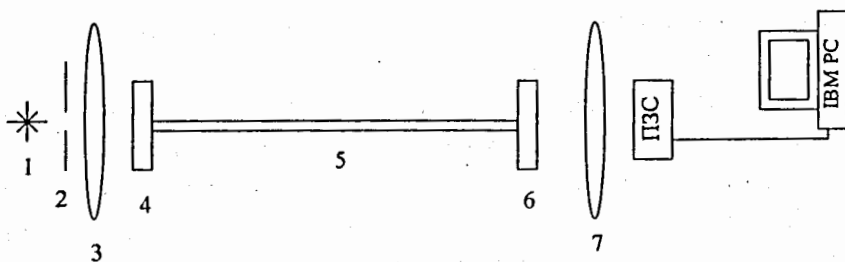


Рис. 1. Схематическое изображение установки:
 (1) - источник света; (2) - коллиматор; (3, 7) - линзы; (4, 6) - держатели строу; (5) - строу

Установка работает в условиях обычного освещения и не требует дополнительной защиты от светового фона. Источником света служит лампочка накаливания мощностью несколько ватт, а в качестве оптической системы, формирующей параллельный пучок света, - система из трех линз. Вся установка собрана на оптической скамье и закреплена на поворотном устройстве, позволяющем проводить калибровочные и основные измерения в горизонтальном и вертикальном положении тестируемых строу. Был разработан специальный держатель, фиксирующий тестируемое строу относительно светового луча. Конструкция держателя показана на рис.2. Перед установкой строу и калибровочными измерениями проводилась тщательная юстировка верхней и нижней частей держателя относительно светового пучка по их изображениям на ПЗС-матрице. Изображение закрепленного таким образом эталонного строу с нулевым изгибом служит опорным в

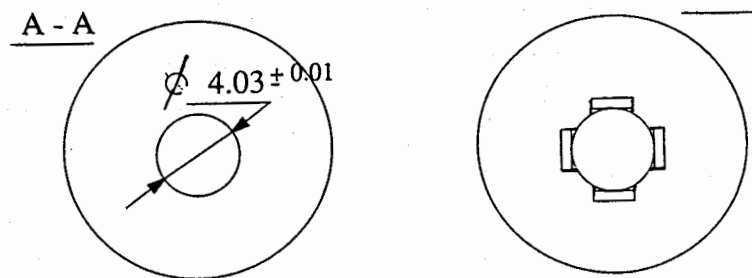
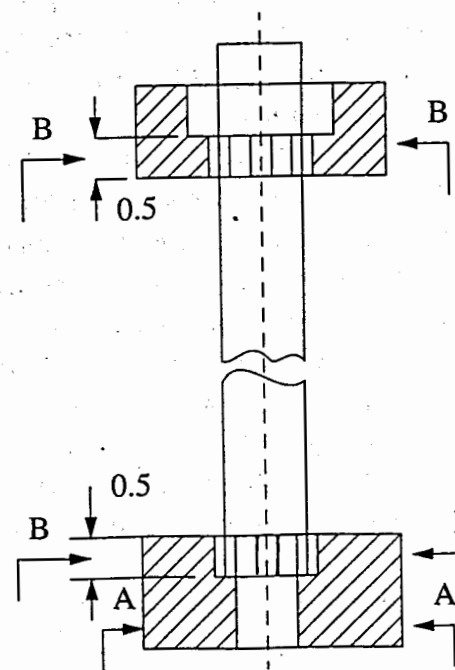


Рис. 2. Конструкция механического держателя для установки строу

калибровочных измерениях. При этом необходимо отметить, что такое закрепление строу с нулевым изгибом должно искажать (выпрямлять) деформацию испытываемого образца. Однако подобные искажения будут

возникать и при сборке строу в едином модуле, и окончательную юстировку при сборке можно проводить по предложенной методике на аналогичной установке.

Точность установки строу обеспечивается в пределах 20 - 40 мкм, время установки 5 - 10 с. Испытываемое строу устанавливается в держатель и посредством микрометрического устройства, закрепленного на оптической скамье, подвергается механической деформации. При этом, из-за отсутствия эталонного строу с нулевым изгибом, проводился отбор такого эталона методом последовательных приближений по следующей схеме отбора.

По полученным калибровочным кривым (рис. 5, 6, 8, 9) зависимостей параметров, характеризующих деформацию для отобранного образца, уточнялась нулевая позиция с характерными для такого недеформированного строу параметрами. Далее, из имеющихся строу выбирался образец с минимальным, согласно предварительным калибровочным кривым, изгибом, после чего вся процедура калибровки повторялась на этом отобранном эталонном образце. При необходимости процедуру можно было повторять.

На таком отобранном эталонном строу и получены все калибровочные кривые, представленные в настоящей работе.

Калибровочные измерения

Как отмечалось выше, единственным, по существу, недостатком предложенного метода

является плохое пространственное разрешение установки, связанное с протяженностью объекта, просматриваемого ПЗС-матрицей. Разрешение в фокальной плоскости установки определяется размерами единичного элемента матрицы, симметричным образом ухудшаясь по мере удаления по обе стороны от фокальной плоскости. Рис. 3 представляет зависимость

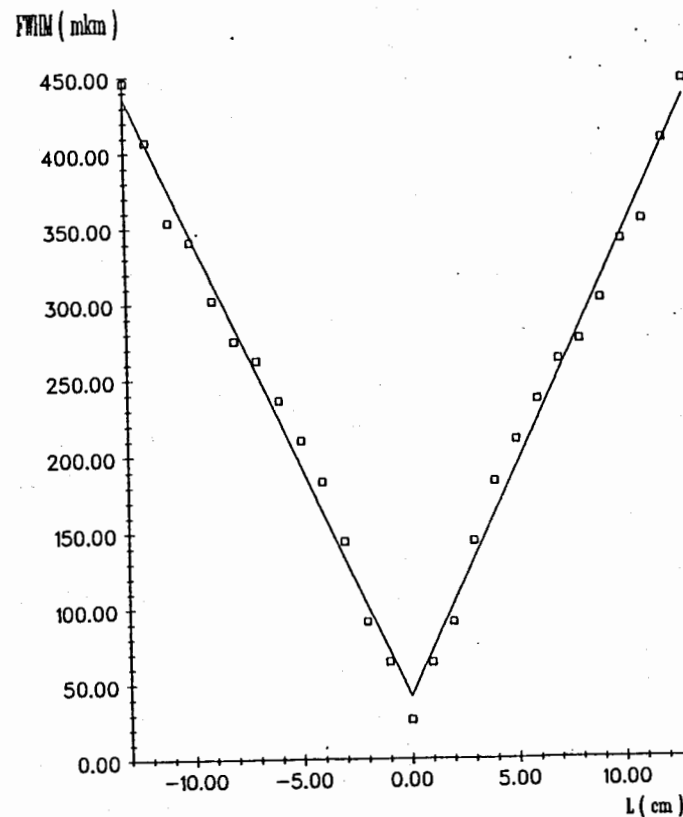
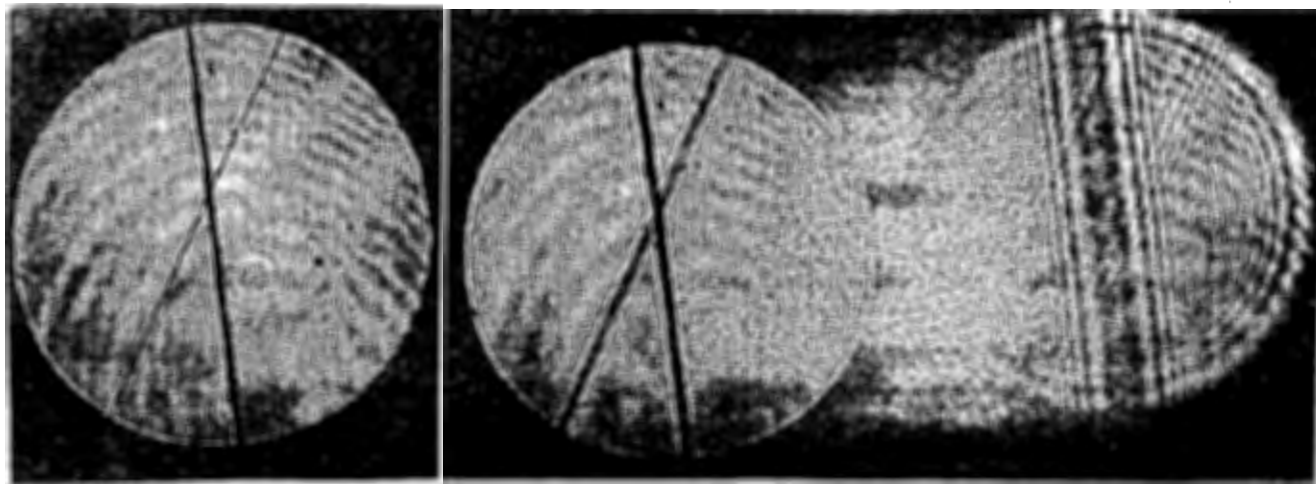


Рис. 3. Зависимость разрешения установки (FWHM) от расстояния до фокальной плоскости

пространственного разрешения установки (FWHM) как функцию расстояния от фокальной плоскости. Для определения этой зависимости снималось изображение коллиматора с натянутыми тонкими проволоками, показанное на рис. 4. Перемещая коллиматор относительно фокальной плоскости, по полученным световым изображениям проволок на ПЗС-матрице определялось пространственное разрешение установки. Из рис. 3, 4 видно, что световое изображение в фокальной плоскости установки переносится без искажений на ПЗС-матрицу и пространственное разрешение определяется размерами ее единичного элемента, позволяя в пределах протяженности объекта в 1 см выявлять локальные дефекты поверхности с точностью не хуже 30 мкм. Однако на расстояниях, соизмеримых с протяженностью строу, пространственное разрешение существенно ухудшается: так, на расстоянии 20 см уже не удастся идентифицировать нить диаметром 100 мкм. Очевидно, что возможности эффективного тестирования на подобной установке протяженных объектов заключаются не в выявлении локальных дефектов, а в обработке интегральных характеристик светового пятна.

Исходя из этого, используемые в дальнейшем параметры, характеризующие степень деформации строу, усреднялись при обработке по 1440 значениям угла поворота относительно выбранной геометрической оси изображения. При этом элементы матрицы проецировались на соответствующий углу



а)

б)

в)

Рис. 4. а) Изображение коллиматора ($\Phi = 5$ мм) с натянутыми на него нитями диаметрами 20 мкм и 100 мкм в фокальной плоскости установки; б) то же на расстоянии 1 см; в) на расстоянии 13 см от фокальной плоскости

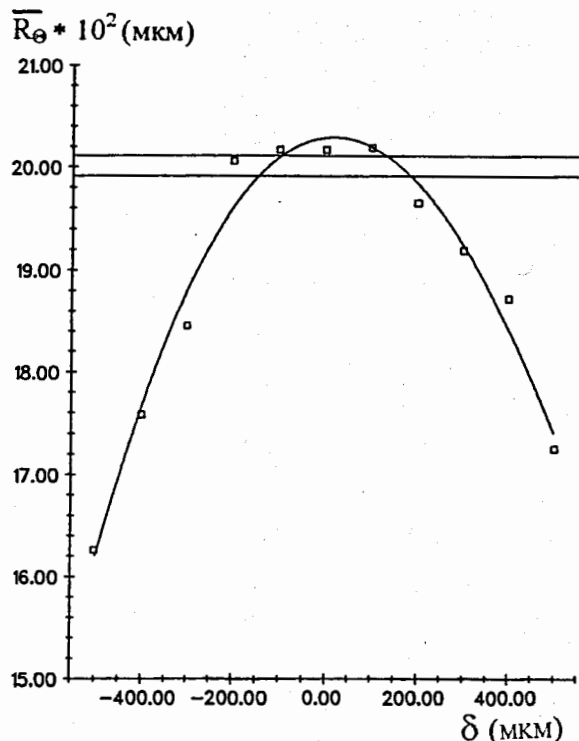


Рис. 5. Зависимость среднеарифметического значения радиуса изображения от деформации строу

поворота радиус-вектор. В нижеприведенных выражениях использованы следующие обозначения: N_{ij} - цифровой код элемента матрицы (i - номер строки, j - номер столбца), соответствующий интенсивности светового изображения в данном элементе матрицы; φ - угол поворота радиус-вектора, проведенного из геометрического центра изображения относительно выбранной оси; R_0 - геометрический радиус строу; R - текущий радиус изображения; элементу матрицы присваиваются значения $p_{ij} = 1$, если $N_{ij} > N_0$, или $p_{ij} = 0$,

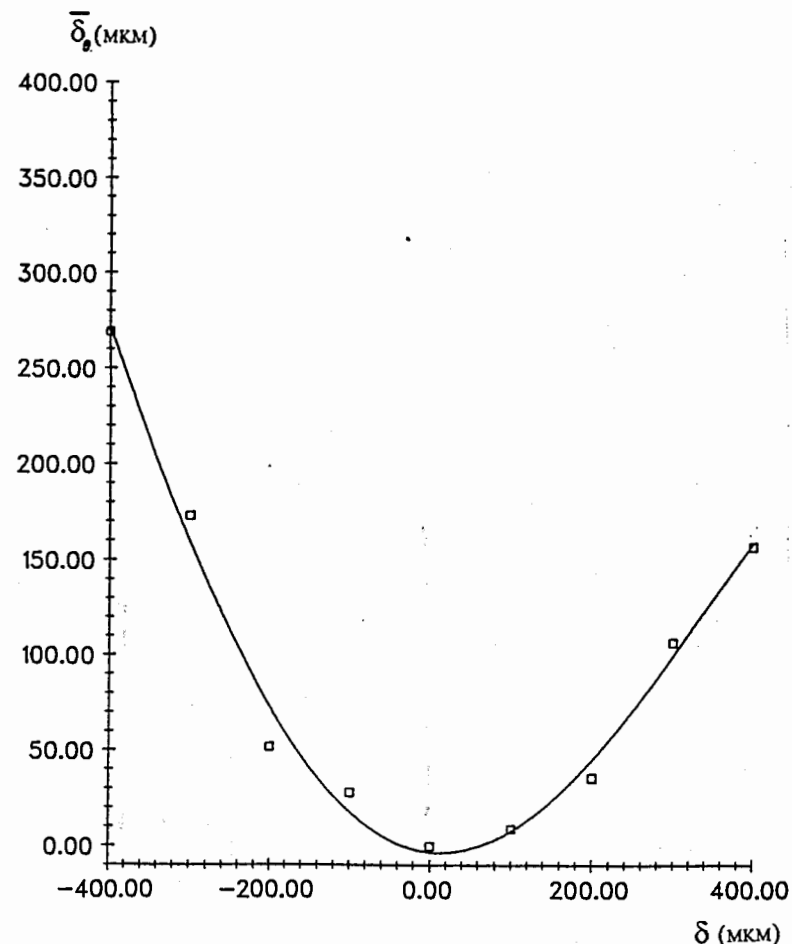


Рис. 6. Зависимость среднеарифметического отклонения восстановленного радиуса от геометрического центра изображения как функция деформации строу

если $N_{ij} < N_0$; N_0 - выбранный порог по интенсивности.

Обработка информации проводилась четырьмя способами:

1. По среднеарифметическому значению радиуса изображения R_q , вычисляемого как длина радиуса-вектора от геометрического центра изображения до последнего значащего элемента матрицы с $(n_{ij})_q = 1$, т.е. до границы изображения. Зависимость среднеарифметического радиуса от деформации представлена на рис. 5.

2. По среднеарифметическому значению разницы $\delta_0 = \sqrt{(R_\theta - R_0)^2}$ между геометрическим и восстановленным по предыдущему алгоритму радиусами (рис. 6).

3. По зависимости χ^2 , полученной при вписывании прямой в распределение радиусов. На рис. 7 показано распределение радиусов изображения, полученное по 1440 значениям угла радиуса-вектора, и вписанная в эти данные прямая. Величины радиусов даны в относительных единицах матричных элементов, проецируемых на радиус-вектор. Зависимость χ^2 от деформации строу представлена на рис. 8. Зависимости, представленные на рис. 5, 6, 8, получены по единому алгоритму и качественно идентичны, однако совместное использование этих параметров может существенно улучшить степень достоверности измерений.

4. По интегральной интенсивности светового изображения (рис. 9).

$$N = \sum_i \sum_j n_{ij}.$$

Обращает на себя внимание немонотонный ход калибровочных кривых (рис. 5, 6, 8, 9), указывающий на комплексный характер сформированного на выходе строу светового пятна и отражающий вклад многих процессов.

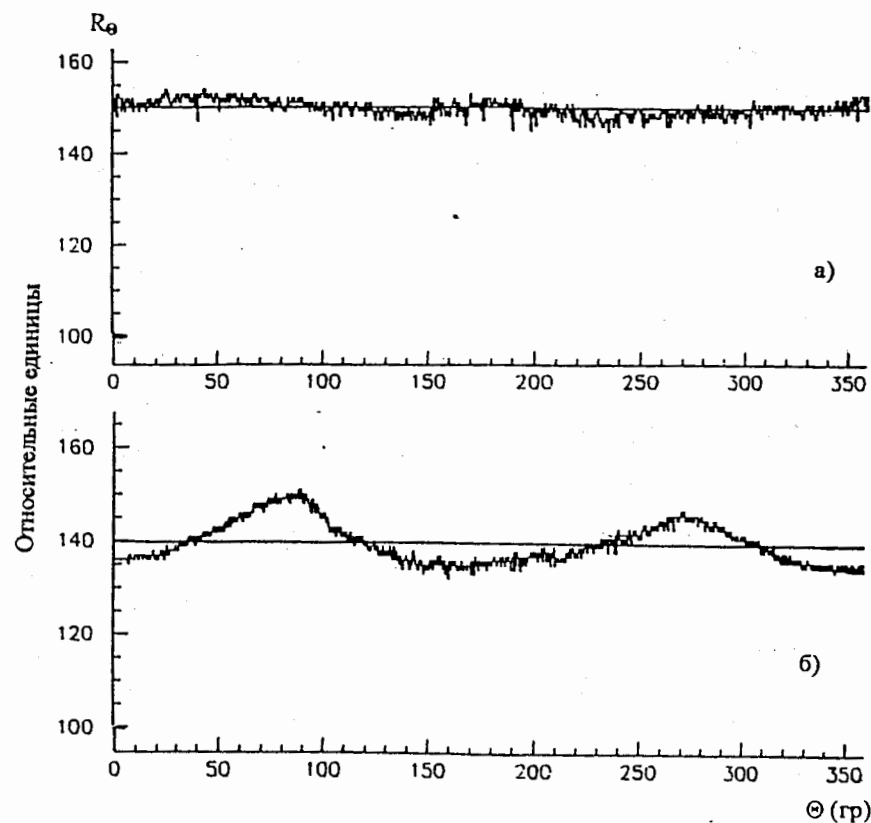


Рис. 7. Вписанная в распределение радиусов изображения прямая при деформации:
а) 0 мкм,
б) 300 мкм

Укажем, в частности, на один - полное внутреннее отражение. Необходимо отметить, что все методы обработки проводятся при одной экспозиции и, следовательно, не требуют дополнительного времени, т.к. подавляющую часть последнего составляет установка строу и измерения, единые для всех методов обработки. По полученным

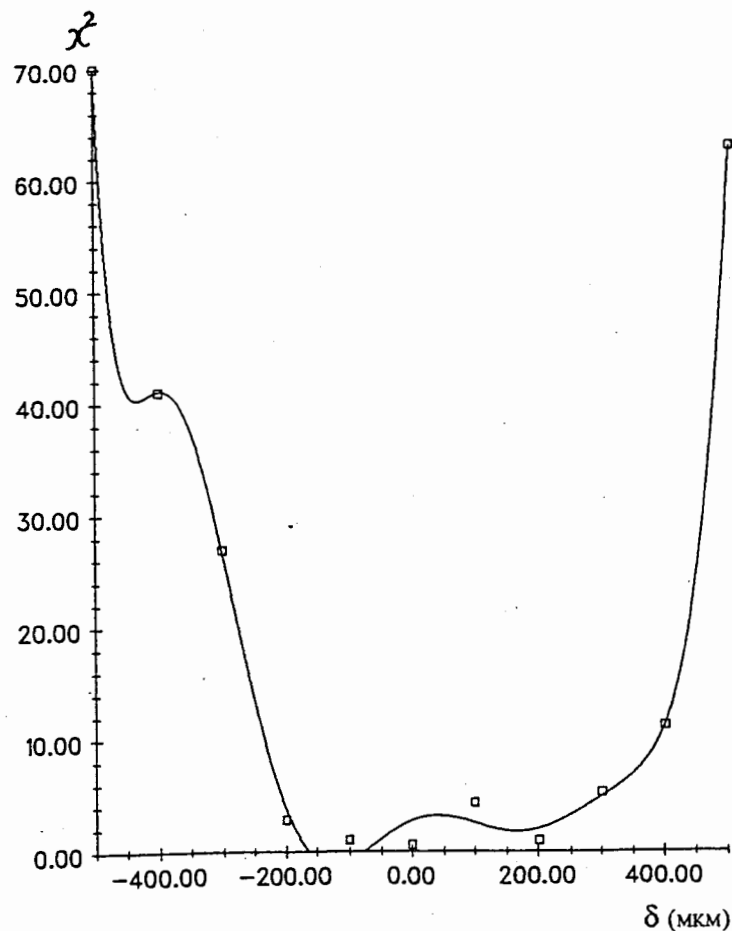


Рис. 8. χ^2 вписанной окружности как функция деформации строу

калибровочным кривым можно проводить тестирование и отбраковку строу на прямолинейность, а также на возможные локальные дефекты внутренней поверхности.

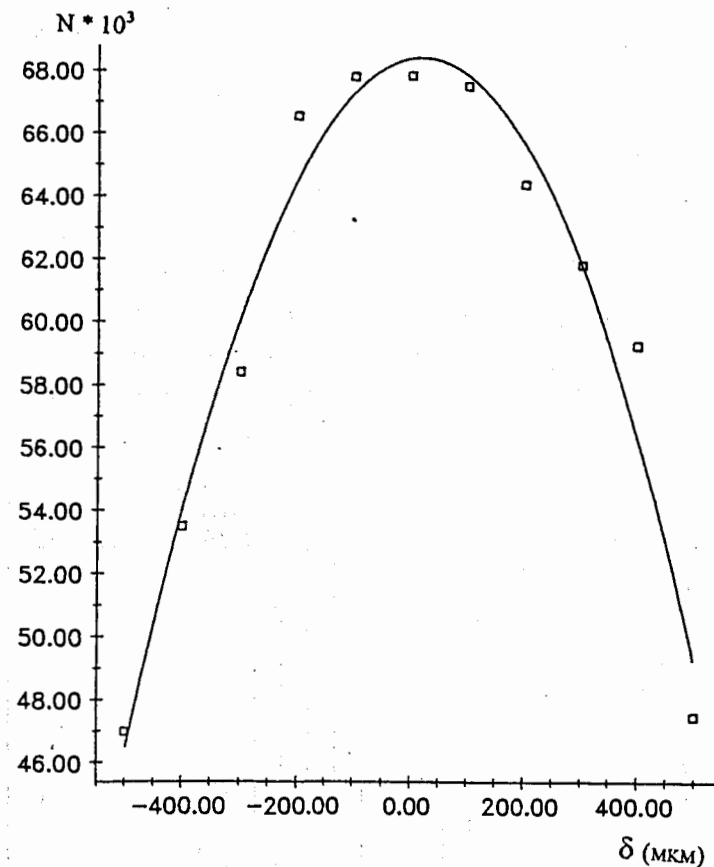


Рис. 9. Зависимость полного числа сработавших элементов матрицы от деформации строу

Результаты проверки образцов строу

Как уже отмечалось во введении, для окончательного уточнения калибровочных кривых применялся метод последовательного отбора эталонного строу с минимальным значением деформации и все вышепредставленные калибровочные кривые получены на таком

эталонном образце. Для оценки стабильности и однозначности всей установки в целом и однозначной установки строу в держателе в частности, было проведено многократное тестирование эталонного строу с 38 независимыми установками последнего в механический держатель. Величины деформаций определялись по калибровочным кривым рис. 5, 6, 8, 9. Результаты этой проверки по кривой рис. 5 представлены на гистограмме рис. 10.

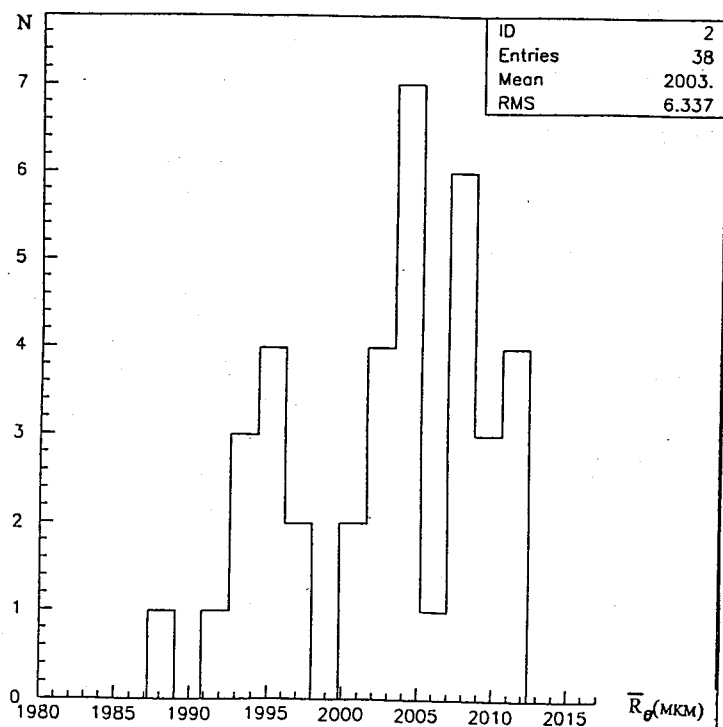


Рис. 10. Распределение средних радиусо изображения при 38 последовательны установках эталонного строу держатель

Горизонтальными прямыми на рис. 5 отмечены минимальное и максимальное значения среднего радиуса изображения. Наибольшее отклонение величины деформации, характеризующее как однозначность и повторяемость результатов многократных испытаний эталонного образца, так и точность установки строу в держателе, составляло не более 100 мкм.

Для оценки эффективности предложенного метода были отобраны контрольные образцы, предварительно измеренные на установке в ЦЕРН методом сканирования, описанным во введении. Результаты представлены в таблице. $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ - полученные деформации в мкм по всем четырем калибровочным кривым рис. 5, 6, 8, 9 соответственно; δ_k - результаты контрольных измерений. Оценочное значение точности контрольных измерений составляло 100 мкм.

Таблица

N	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_{mean}	δ_k
straw						
2	260	260	300	280	275	370
4	120	100	150	100	115	115
5	115	200	140	130	150	90
6	100	100	150	100	110	100
7	275	285	315	280	290	390
8	230	190	230	250	225	300
9	300	310	350	325	330	435
10	200	190	140	200	180	230

Далее были проведены измерения деформаций строу по всем методам обработки светового изображения согласно калибровочным кривым. Истинное значение деформации принималось как среднеарифметическое от измеренных значений - $(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4)/4$. Как

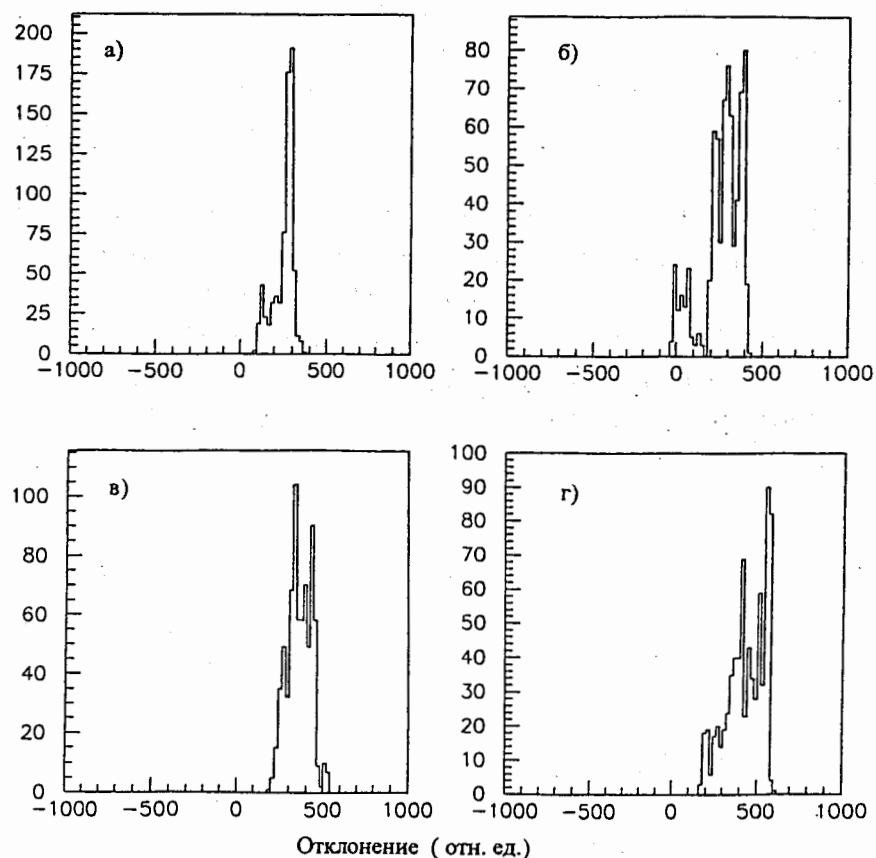


Рис. 11. Распределения отклонений между вычисленными и геометрическим радиусами: а), б), в), г) соответствуют значениям деформации 0, 100, 200, 300 мкм

видно из таблицы, измеренные нами деформации контрольных образцов удовлетворительно согласуются друг с другом и с результатами независимых измерений.

Проводилась также оценка точности измерений деформаций строу. На рис. 11 приведены распределения отклонений вычисленного и геометрического радиусов изображения. Величины отклонений заданы в относительных единицах и получены по 1440 значениям угла поворота радиуса-вектора. В качестве критерия точности нами выбрана величина деформации, при которой распределения на рис. 11 разделяются с фактором режекции, равным десяти. Предварительное значение точности при этом составляет - 200 мкм. Эта величина не противоречит результатам, приведенным в таблице.

Заключение

Перечислим основные особенности предложенного метода и параметры установки по измерению прямолинейности и деформации строу методом измерения интегрального изображения на выходе строу:

1. Точность измерений деформаций строу (отклонения от прямолинейности) в пределах - 200 мкм.
2. Возможность выявления локальных дефектов в пределах этой точности по всей поверхности строу.
3. Возможность тестирования на прямолинейность и деформации строу в модуле трекера.

4. Дополнительная возможность тестирования точечных объектов с линейными размерами, не превышающими 10 мм с точностью ± 10 мкм; например, проведение входного контроля комплектующих деталей для строу детектора.

5. Простота установки и ее эксплуатации.

6. Полное время экспозиции на одно строу не более 15 - 20 с, включая установку строу, набор и обработку светового изображения, выдачу конечного результата.

7. Недостатком предложенного метода является необходимость проведения новых калибровочных измерений при изменении типовых геометрических размеров строу.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 ATLAS Collaboration. ATLAS Inner Detector Technical Design Report, Vol. 1, CERN/LHCC/97 - 16, 1997.
- 2 ATLAS Collaboration. ATLAS Inner Detector Technical Design Report, Vol. 2, CERN/LHCC/97 - 17, 1997, page 659, 693.
- 3 B. Bernstein, M.J.Price, Nucl. Instr. and Meth., A364 (1995), p. 103.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 сентября 1998 года.

Астабатьян Р.А. и др.

P13-98-270

Метод интегрального измерения прямолинейности тонкопламенных дрейфовых трубок

Предложен метод проверки прямолинейности строу, основанный на анализе формы светового пятна, образуемого проходящим через него параллельным пучком света. Описана установка и ее основные узлы: оптическая система для формирования параллельного пучка света; специальный прецизионный держатель, на который устанавливается тестируемый строу; регистрирующая световое изображение ПЗС-матрица. Получены характерные калибровочные кривые для разных алгоритмов обработки интегрального светового изображения. Измерены характеристики установки: пространственное разрешение в фокальной плоскости; зависимость пространственного разрешения от расстояния до фокальной плоскости. Разрешающая способность к изгибам для строу протяженностью 50 см составляет ~ 200 мкм; полное время экспозиции на одно строу, включая установку строу в специальный держатель, набор и обработку светового изображения и выдачу конечного результата $\sim 15 - 20$ с. Метод одинаково чувствителен как к нарушениям прямолинейности (изгибам) строу, так и к локальным дефектам строу по всей его поверхности. Он отличается простотой исполнения и возможностью тестирования строу, установленных в модуль детектора.

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1998

Перевод авторов

Astabyan R.A. et al.

P13-98-270

The Method of the Integral Measurement of the Straw Straightness

We propose the fast and simple method of testing straightness and uniformity of the straw. The method is based on the measurement of the integral image formed by passing a parallel light beam across the straw. The basic parts of the set-up are presented. It consists of the parallel light forming optical system; special precise mechanical system to set the testing straw; CCD camera is used as visible light detector. The main characteristics of the set-up are measured: the spatial resolution in the focal plane is as good as a size of a single pixel; the spatial resolution dependence from the distance to the focal plane. The total expositions time including one straw installation into the special supports, collection and calculation of the light image and obtaining final results are less than 20 seconds.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics, JINR.