

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

ИТЭФ-23

В.В.Низкурно, А.П.Крутенкова, В.В.Куликов,
Л.П.Николаева, И.А.Радкевич, В.С.Федорен

УВЕЛИЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КООРДИНАТ
ПРИ ФОТОГРАФИРОВАНИИ ЧЕРЕЗ ОТРАЖАЮЩИЕ И
ПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ

МОСКВА 1973

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

ИТЭФ - 23

В.В.Кивкурно, А.П.Крутеянова, В.В.Куликов,
Л.П.Николаева, И.А.Радкевич, В.С.Федорен

УВЕЛИЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КООРДИНАТ
ПРИ ФОТОГРАФИРОВАНИИ ЧЕРЕЗ ОТРАЖАЮЩИЕ И
ПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Москва 1973

Для фотографирования искровых камер, расположенных под делями магнита трехметрового трекового спектрометра ИТЭФ установлена система зеркал, описанная в работах /1,2/. Предлагаемая система позволяет уравнивать оптические пути от находящихся на сравнительно большом расстоянии друг от друга искровых камер и в шесть раз сжать размер изображения на пленке за счет ликвидации пустых промежутков. При этом оказалось возможным воспользоваться узкоформатной 35 мм пленкой, стандартными узкоугольными объективами и промышленными фотоаппаратами.

Увеличение площади записи информации позволило не только существенно уменьшить расход пленки, что при съемке сотен тысяч кадров становится уже экономически важным, но и в несколько раз увеличить скорость обработки пленки на быстродействующих автоматических сканирующих устройствах.

Фотографирование изображения через пары зеркал вносит дополнительные погрешности в результате измерения координат искр. Эти погрешности не малы, поскольку для существенного удешевления аппаратуры мы использовали зеркала не очень высокого качества. Описываемая ниже система коррекции позволила сравнительно просто ввести поправки на абберации зеркал и на искажение в верхней стенке камеры. Получена точность восстановления изображения практически такая же, как и при прямом фотографировании объекта.

1. Искажения, вносимые зеркалами

Схема расположения зеркал и направления выбранных координатных осей приведены на рис.1. На спектрометре используются зеркала толщиной 20 мм, и размером $200(300) \times 200 \text{мм}^2$. Локальный радиус кривизны зеркал более 1 км. Нетрудно показать, что при повороте плоскости зеркала на угол α отраженный оптический луч смещается в пространстве объекта на величину:

$$\delta = 2hd \quad (1)$$

где h — расстояние от зеркала до фотографируемой точки.

С помощью автоколлиматора, установленного на оптической скамье, был измерен угол α между поверхностью каждого зеркала и осью "у", направленной вдоль длинной стороны зеркала, в зависимости от расстояния y от края зеркала. На рис.2 приведен график зависимости α от y для одного из рабочих зеркал. Функция $\alpha(y)$ указана с точностью до несущественной константы, определяемой взаимным расположением зеркал и автоколлиматора. Что касается среднего наклона функции $\alpha(y)$ то он, очевидно, связан со средним радиусом кривизны зеркала, который не дает нелинейных искажений, а приводит только к изменению масштаба съемки, учитываемого соответствующим членом преобразований /3/. Поэтому для оценки неоднородных искажений необходимо из $\alpha(y)$ вычесть линейную функцию $ky + b$, которая аппроксимирует $\alpha(y)$ на измеренном отрезке y :

$$\alpha_1(y) = \alpha(y) - (ky + b)$$

Для используемых зеркал измеренная величина α , достигает одной минуты. При этом ошибка определения координаты y в соответствии с формулой (1) будет составлять для h , равного в нашем случае 3м величину 2 мм. Такая ошибка недопустимо увеличивает погрешность опцделеная импульсов частот.

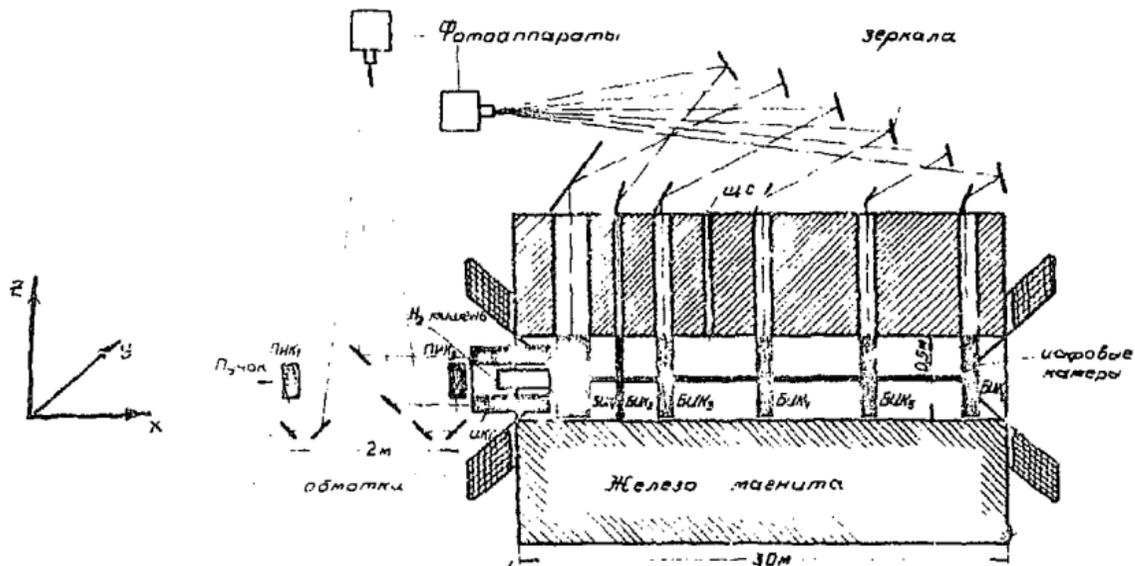


Рис. 4. Продольный разрез спектрометра вертикальной плоскости. СМ₁-СМ₅ - секции ионовые камеры, установленные внутри магнита. СМ - секции магнита. СМ₁-СМ₂ - пучковые камеры, которые являются основой ациклических счетчиков магнита.

В принципе, зная ход зависимости δ от γ можно было бы аналитически внести поправки. Однако, такой путь практически неприемлем по следующим причинам. Для внесения поправок необходимо измерять достаточно точно пространственные координаты зеркал, что является очень трудоемкой задачей. Перестановки в системе приводят к большому объему измерительных и расчетных работ. Кроме того, необходимо гарантировать постоянство механических напряжений зеркал после обмера на оптической скамье и крепления на установке. Поэтому был использован метод внесения поправок, основанный на фотографировании достаточно большого числа реперных точек с известными координатами. Этот метод позволяет внести одновременно поправки как на погрешности зеркал, так и на абберации объектива.

2. Метод внесения поправки

Коррекция делается только для координаты "у". При этом автоматически повышается точность определения по двум стереоскопическим снимкам и координаты "z". Ошибка восстановленной координаты "X" незначительная, т.к. при дальнейшем вычислении точек траектории частицы каждой камеры приписывается вполне определенная координата "X", связанная с известным положением соответствующего зазора камеры в пространстве [4]. В силу того, что искровая камера фотографируется через свою пару зеркал, поправки должны независимо делаться для каждой камеры.

Рассмотрим внесение поправок для одной из них. Для внесения поправок фотографируется система реперов, координаты которых известны из геодезических измерений. Реперы расположены в верхней (Z_2) и в нижней (Z_1) плоскостях

(X, Y) рабочего пространства. В каждой плоскости реперы лежат на двух прямых, параллельных оси Y (X_1) и (X_2) с постоянным шагом по " Y " , равным 50 мм .

Расстояние между прямыми 60 мм. По изображению на пленке реперных крестов, лежащих в плоскости \tilde{Z}_1 , восстанавливаются: оптические лучи в пространстве объекта по методу, описанному в работе [3]. Отыскиваются точки пересечения (x_i, y_i, \tilde{Z}_i) оптических лучей с плоскостью \tilde{Z}_i . Далее для каждого из реперов вычисляется разность $\delta y_i(x_i, y_i, \tilde{Z}_i) = y_i - y_i'$ между восстановленными (y_i') и истинными y_i значениями координаты " Y " . Полученные разности $\delta y_i(x_i, y_i, \tilde{Z}_i)$ и $\delta y_i(x_2, y_i, \tilde{Z}_2)$ вводятся в программу восстановления геометрии событий в качестве констант. Аналогично получают разности $\delta y_i(x_i, y_i, \tilde{Z}_1)$ и $\delta y_i(x_2, y_i, \tilde{Z}_2)$ для реперов, лежащих в плоскости \tilde{Z}_2 . На рис.3. приведены графики зависимостей полученных значений $\delta y_i(x_i, y_i, \tilde{Z}_1)$ и $\delta y_i(x_2, y_i, \tilde{Z}_1)$ от Y для двух различных координат X для одной плоскости. Из этого графика видно, что для удовлетворительного описания необходимо вводить зависимость поправки не только от " Y " , но и от " X " . т.е. $\delta y = \varphi(x, y)$ Внесение поправки при произвольном положении точки осуществляется следующим образом. Пусть восстановленный по изображению точки на пленке [3] оптический луч пересекает две плоскости (\tilde{Z}_1 и \tilde{Z}_2) в точках (x', y', \tilde{Z}_1) и (x'', y'', \tilde{Z}_2) с использованием заабдулированных значений $\delta y_i(x', y', \tilde{Z}_2)$ методом линейной двухпараметрической интерполяции (или экстраполяции) вычисляются величины поправок $\delta y'(x', y', \tilde{Z}_1)$ и $\delta y''(x'', y'', \tilde{Z}_2)$. Скорректированный оптический луч проходит через точки ($x', y' + \delta y', \tilde{Z}_1$) и ($x'', y'' + \delta y'', \tilde{Z}_2$)

Была рассмотрена возможность внесения поправок при использовании реперов, расположенных в одной плоскости.

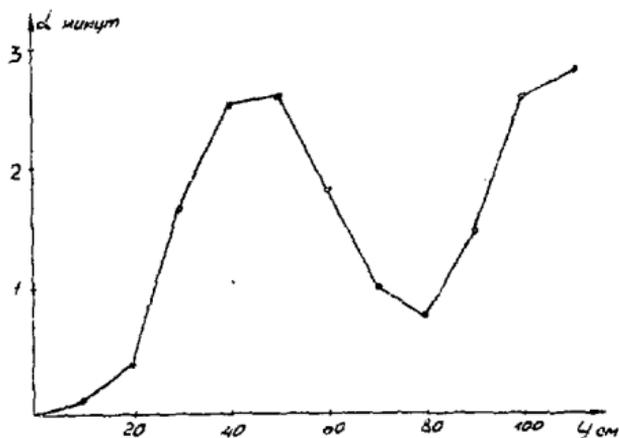


Рис. 2. График зависимости угла α между поверхностью зеркала и осью "у" от координаты "у".

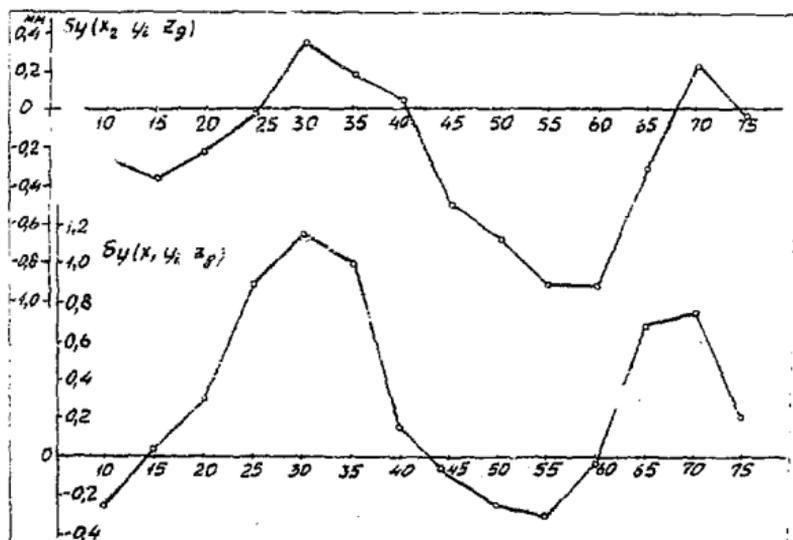


Рис. 3. Зависимость $\delta y_x = \varphi(x, y)$ величин поправок координаты "у".

В этом случае при определении координат точек, лежащих вне плоскости реперов, возникают дополнительные ошибки. Оптический луч на своем пути отражается от нескольких зеркал, поэтому имеется неопределенность при вычислении положения центра, вокруг которого нужно делать корректирующий поворот луча. Оценки показывают, что из-за этой неопределенности возможны ошибки до 0,2 мм

3. Реперная доска

Для изучения aberrаций зеркал и определения параметров преобразования удобно использовать отдельную реперную доску, на которой нанесено достаточное количество крестов.

Доска изготовлена в виде коробки, выфрезерованной из целого куска дюралюминия. При высоте боковых стенок коробки 40 мм ширина — 10 мм, а толщина верхней стенки — 5 мм. Прогиб доски длиной 100 см под собственным весом не превышает 0,01 мм. В верхней стенке коробки прорезано на координатно-расточном станке 22 креста, расположенных на двух параллельных прямых. Расстояния между крестами известно с точностью 0,02 мм. Большое количество крестов позволяет не только найти параметры и проверить корректность преобразования, но и определить aberrации оптической системы. Форма щелей у крестов не приводит к заметному смещению изображений на пленке при изменении расположения источника света. Ширина щелей у крестов составляет 0,6 мм, высота вертикальных стенок щелей не превышает 0,5 мм. Вся доска, включая боковые поверхности крестов, зачернена. Щели снизу подсвечиваются ламинисцентными панелями, дающими равномерное освещение.

В верхней части доски установлено 6 цилиндрических штифтов для геодезического координирования реперной доски.

Положение пеллжов относительно крестов известно с точностью 0,05 мм.

Доска с помощью трех микрометрических винтов может устанавливаться на нужной высоте.

Доска была использована для нахождения параметров преобразования /3/, проверки их корректности и измерения ошибок определения координат.

Для определения ошибок измерения, обусловленных только фотоаппаратом, доска была расположена непосредственно в поле зрения объектива ("Юпитер-II") на расстоянии 3,2 м. Снимки обработаны на просмотрно-цифровальных столах ИТЭФ. Среднеквадратичное отклонение восстановленных координат крестов, не используемых при выработке констант преобразования, /т.е. контрольных крестов/ составило 0,1 мм.

Реперная доска была использована при исследовании методики определения поправок на погрешности зеркал. После внесения поправок точность восстановления контрольных реперов составила $\pm 0,1$ мм.

4. Система реперных нитей

Реперную доску можно использовать при изучении аббераций как всей оптической системы, так и отдельных ее узлов. Однако, при определении констант преобразования и вычислении таблицы поправок с помощью реперной доски, помещаемой поочередно в рабочую область ка каждой искровой камеры, возникают дополнительные погрешности из-за неточности геодезических измерений координат реперов. Следует отметить, что измерение координат реперной доски в середине магнита представляет трудоемкую задачу. Опыт

работы показали, что точность геодезических измерений в средней области магнита $\pm 0,2$ мм. При этом в каждой рабочей области спектрометра получается своя систематическая ошибка, приводящая в конечном итоге к систематическим ошибкам в измерениях импульсов частиц в спектрометре. Поэтому для выработки констант и поправок для всего рабочего объема спектрометра, желательно иметь систему реперных крестов, общую для всех шести рабочих областей, в которых помещены искровые камеры. При этом неточность геодезической привязки общей системы крестов не будет вносить погрешностей при определении импульса частиц. Такая реперная система была осуществлена с помощью нитей, протянутых через весь магнит.

Для этого на входе и выходе магнита имеются на трех разных высотах посадочные места для установки параллельно оси "у" реперных линеек. На линейках прорезаны на координатно-расчетном станке пазы для натягивания нитей параллельно оси X. Расстояние между любой парой пазов известно с точностью $\pm 0,02$ мм, ширина паза 0,7 мм, расстояние между соседними пазами—25 мм. Фактически для нахождения поправок использовался шаг нитей 50 мм.

Для получения реперных перекрестий внутри магнита помещается на посадочных местах рама с поперечными нитями. Координаты перекрестий нитей известны из геодезических измерений с точностью:

$$\begin{aligned} \Delta Y &= \pm 0,1 \text{ мм} \\ \Delta X &= \pm 0,2 \text{ мм} \\ \Delta Z &= \pm 0,2 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Поскольку нити протянуты через весь магнит, то относительное поперечное смещение ΔY соответствующих перекрестий в разных щелях очень мало и обусловлено, главным образом, неоднородностью освещения.

Для получения контрастных фотографий ниток, удовлетворяющих необходимым требованиям обмера на автомате ПСП-ИТЭЗ, оказалось удобным фотографировать белую капроновую многожильную леску диаметром 0,7 мм на фоне черного бархата. Натяжение нитей /0,5 кг/. выбрано таким, что их провисание не превышало 1 мм.

При фотографировании нити освещались через щели в верхнем яме магнита. Возникающие из-за неоднородного освещения изменения положений крестов на пленке приводят к погрешностям при восстановлении координат в пространстве изображений не более 0,05 мм. Фотография реперных нитей, полученная при рабочих измерениях, приведена на рис. 4.

Для выработки констант преобразования и определения поправок в областях искровых камер, расположенных перед магнитом, использовались аналогичные системы нитей.

5. Экспериментальная проверка

Были сфотографированы нити, расположенные на трех разных высотах. Фотографии нитей, полученные при крайних положениях реперных линеек, использовались для выработки констант преобразования и определения поправок. По фотографиям нитей при промежуточном положении линеек были вычислены координаты соответствующих перекрестий и сравнены с измеренными геодезическими методами. Среднеквадратичный разброс между измеренными и восстановленными значениями координат не превышал по оси "у" величины 0,08 мм. Были проверены также погрешности восстановления координат нитей, протянутых внутри спектрометра в разных местах и под разными углами. Во всех случаях точность восстановления координат была не хуже 0,1 мм. При фотографировании нитей, протянутых через спектрометр и головное устройство, полу-

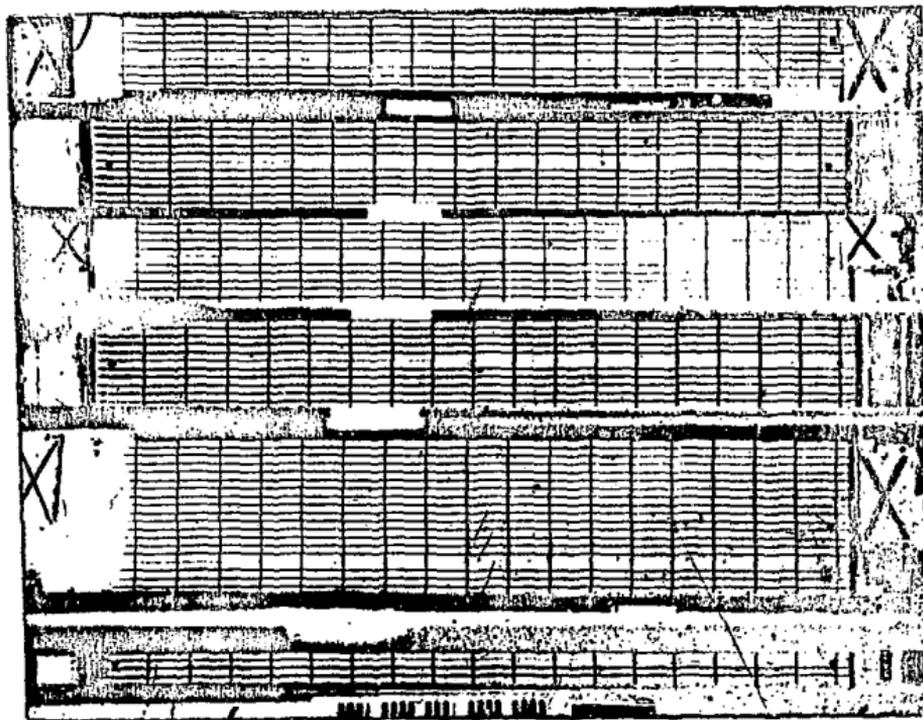


Рис.4.Фотография реперных нитей

чена точность восстановления координат по снимкам 0,12мм
Точность восстановления координат без внесения поправок
для разных областей внутри магнита составляла от 0,8 до
2 мм.

6. Учет искажений в верхней стенке искровой камеры.

На рис.5 изображена схема прохождения оптического луча
через верхнюю стенку при фотографировании искры в искровой
камере. Луч при прохождении плоскопараллельной пластины
претерпевает сдвиг (δ), а в случае непараллельности (кли-
на) поверхностей стенки камеры также и поворот на угол
($\varphi_1 - \varphi$). В спектрометре установлены камеры с толщиной верх-
ней стенки 24 мм, изготовленные из оргстекла с показателем
преломления 1,49.

Для внесения поправок на указанные искажения у каждой
камеры с помощью автоколлиматора НО-25 были измерены углы
между поверхностями верхней стенки в точках с интервалом
по оси $Y = 100$ мм. Измерения проводились по разности углов
отражения светового пучка от верхней и нижней поверхности.
На рис.5 приведен график зависимости угла между плоскостя-
ми φ от расстояния "у" от края стенки для одной из камер.
Максимальное значение угла достигало 20 минут. Нетрудно
оценить, что максимальная величина δ составляет (у края
камеры) 2 мм, а смещение луча на глубине 50 см (высота ка-
мер) при максимальном значении $\varphi = 20'$ достигает 1,5 мм.

Зависимость δ от "у" для каждой из камер удовлетво-
рительно описывается многочленом третьей степени, коэффи-
циенты которого вводятся в программу геометрического восста-
новления координат точек в качестве констант. Формулы попра-
вок для восстановления координат искр в камерах с погрешно-
стью не худшей 0,1 мм имеют вид:

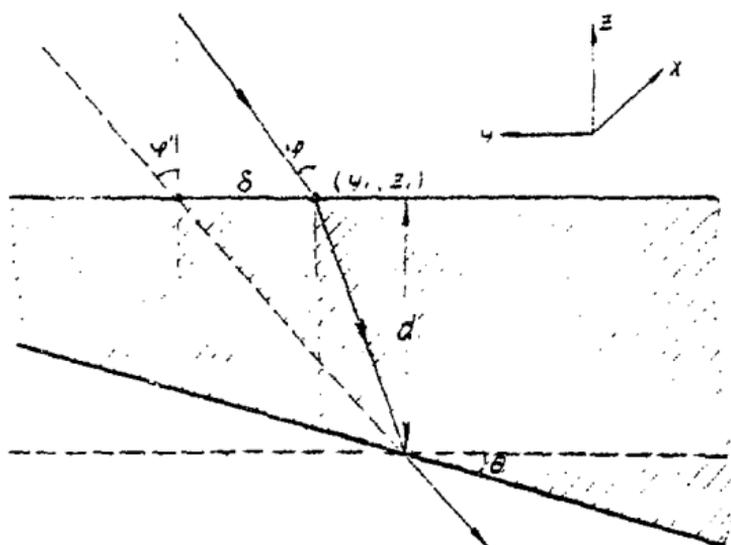


Рис.5. Схема прохождения оптического луча
через верхнюю крышку искровой камеры

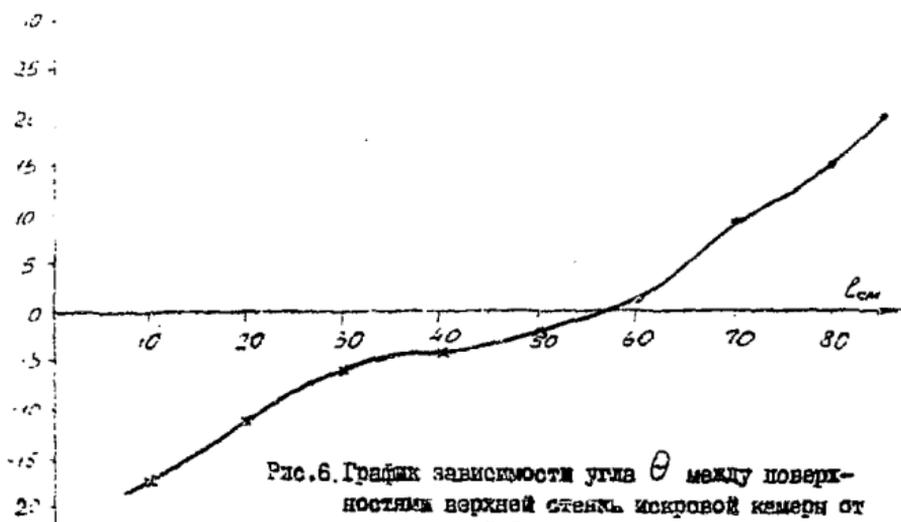


Рис.6. График зависимости угла θ между поверхностями верхней стенки искровой камеры от расстояния "у" от края камеры

$$\delta = d \left[\frac{n-1}{n} \operatorname{tg} \varphi + \frac{n^2-1}{2n^3} \operatorname{tg}^3 \varphi + (n-1)\theta \right]$$

$$\operatorname{tg} \varphi' = \operatorname{tg} \varphi + \theta(n-1)(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)$$

где n — показатель преломления.

d — толщина стенок камер.

φ, φ' и θ — определены выше.

Для проверки правильности внесенных поправок на искажения в верхних стенках камер была сфотографирована система реперных нитей, частично закрытая пластиной из оргстекла той же толщины, что и верхняя стенка у камер. Клинообразность, коэффициент преломления и толщина пластины были измерены и соответствующие поправки внесены в числовой материал программы. При отсутствии поправок смещение закрытых под пластиной реперных перекрестий, восстановленных по пленкам, достигало 2,6 мм. При внесении поправки только на сдвиг δ смещение уменьшилось до 1,2 мм. После внесения обеих поправок смещение не превышало 0,14 мм ни для одной из точек.

Для проверки точности восстановления положения реальной искры внутри камеры, были сфотографированы треки пучковых частиц, пролетающих через весь спектрометр, при включенном магнитном поле.

Среднеквадратичное отклонение восстановленных искр от прямой, проведенной по всем искрам, составило $\tilde{\sigma}_x = 0,19$ мм $\tilde{\sigma}_x = 1,6$ мм, что согласуется с данными, полученными в работе /4/. Величина ошибки $\tilde{\sigma}_x \approx 100\gamma$ обусловлена небольшим углом стереоскопичности.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность В.В.Владимирскому за постоянную помощь и интерес к работе,

И.А.Духовскому за участие в исследованиях оптических искажений в искровых камерах, В.Г.Стеночкину, Ю.И.Орешкину, В.В.Дроздову и Ю.С.Лагину за помощь в работе.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Радкевич И.А. и др. "Приборы и техника эксперимента", 4, 54 (1964).
2. Балашин О.Н. и др. Преприят, Дубна ОИЯИ Д-5805, 1971.
3. Балашин О.Н. и др. Преприят ИТЭФ, ИТЭФ (1970).
4. P. Astbury et al. *Nucl. Instr. and Meth.* 46, 61, 1967.

Подписано к печати 26/II-73 г. Т - 03734. Печ.л. 1,0.
Формат 70x103¹/16. Тираж 250 экз. Заказ 23 М-16. Цена 6коп.

Отдел научно-технической информации ИТЭФ, Москва, ИТЭФ

