

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ44.1к
В-558

PI - 11321

5/11-78

В.В.Вишняков, А.Г.Гальперин, А.Дирнер,

В.Г.Иванов, И.Л.Писарев, Я.Ружичка, Т.А.Стриж

2431/2-78

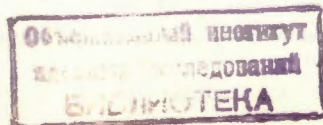
ОЦЕНКИ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАГНИТНОГО ИСКРОВОГО СПЕКТРОМЕТРА
ОИЯИ

1978

P1 - 11321

В.В.Вишняков, А.Г.Гальперин, А.Дирнер,
В.Г.Иванов, И.Л.Писарев, Я.Ружичка, Т.А.Стриж

ОЦЕНКИ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАГНИТНОГО ИСКРОВОГО СПЕКТРОМЕТРА
ОИЯИ



Вишняков В.В. и др.

P1 - 11321

Оценки точностных характеристик магнитного искрового спектрометра ОИЯИ

Рассматриваются точностные характеристики магнитного искрового спектрометра на основе анализа треков частиц пучка. Проведено разделение случайных и систематических ошибок спектрометра и определены их величины. Относительная ошибка в определении импульса частиц пучка 40 ГэВ/с в магнитном поле составила $\Delta p/p \approx 0,5\%$. Ошибка в определении координат искр из-за пространственных флуктуаций $\sigma_{sp} \approx 0,3$ мм, точности определения углов: глубинного - $\delta_\lambda \approx 0,12$ мрад и азимутального - $\delta_\phi \approx 0,15$ мрад. Результаты показывают высокие точностные характеристики искрового спектрометра. Учет систематических ошибок при определении Z-координаты искр позволит уменьшить ошибку в определении глубинного угла примерно в полтора раза и свести ее до величины 0,07 мрад.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Vishnyakov V.V. et al.

P1 - 11321

Evaluation of Accuracy Characteristics of the Magnetic Spark Spectrometer of JINR

The accuracy characteristics of the JINR Magnetic Spark spectrometer are considered by analyzing beam particle tracks. Statistical and systematic errors of the spectrometer were separated and their values were estimated. Momentum resolution for 40 GeV/c particles in the magnetic field is $\Delta p/p \approx 0,5\%$, spark spatial coordinates errors are $\sigma_{sp} \approx 0,3$ mm, deep and azimuthal angles accuracies are $\delta_\lambda \approx 0,12$ mrad and $\delta_\phi \approx 0,15$ mrad, respectively. The results point to high accuracy characteristics of the spectrometer. A deep angle error may be reduced one and half times by taking into account systematic errors when determining spark Z-coordinates.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

Важными параметрами магнитных искровых спектрометров являются величина импульсного разрешения и величины пространственной и угловых точностей, которые, в свою очередь, определяют разрешение по инвариантной массе и переданному импульсу для исследуемых систем частиц /см., например, $^{1/2}$ /. Эти характеристики определяются в основном точностью регистрации траекторий частиц в искровых камерах спектрометра. Пространственная точность регистрации зависит от ряда ошибок - случайных и систематических. К случайным относятся измерительные ошибки и флуктуации искр в камерах относительно траектории частицы. Систематическими являются ошибки, связанные с дисторсиями оптической системы и восстановлением реперных меток в пространстве.

Целью данной работы являлось разделение случайных и систематических ошибок пространственных и кинематических параметров магнитного искрового спектрометра МИС ОИЯИ $^{1/2}$ и определение величин этих ошибок. Оценки пространственных точностей были получены для каждой оптической искровой камеры /ОИК/. Усреднение этих величин определяет точности спектрометра.

Анализ проведен на основе изучения треков частиц пучка, сфотографированных при выключенном магнитном поле спектрометра, установленного на пучке пионов с импульсом 40 ГэВ/с на ускорителе ИФВЭ. Пленки, содержащие такие фотографии, были получены в каждом сеансе работы спектрометра, что дало возможность изучить точности спектрометра и связи систем координат спектрометра и проволочных камер, использовав-

шихся для определения траектории частиц, падающих на мишень. Для анализа были использованы три пленки, полученные в разных сеансах /пленка №342 - декабрь 1975 г., №649 - сентябрь 1976 г., №953 - декабрь 1976 г./.

События, содержащие только одну частицу пучка, измерялись на автоматическом измерительном устройстве НРД ЛВТА ОИЯИ^{/3/} и обрабатывались по программе геометрической реконструкции. Статистический анализ полученной информации проведен по специальной программе, использующей обслуживающую систему^{/4/}.

ПРОГРАММА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

Восстановление пространственной картины исследуемых треков проводилось с помощью специальной программы МОГМ1. Эта программа написана на алгоритмическом языке ФОРТРАН в соответствии с требованиями системы Гидра^{/5/} для ЭВМ CDC-6500 и предназначена для реконструкции одиночных треков в фотографируемом объеме спектрометра.

Исходными данными для программы являются отфильтрованные и записанные на магнитную ленту результаты сканирования стереоснимков на автомате типа НРД^{/3/}. Программа МОГМ1 подгоняет под спираль методом наименьших квадратов трек, образованный восстановленными в пространстве искрами. После реконструкции каждого события программа формирует выходной массив данных, содержащий X, Y и Z-координаты* восстановленных в пространстве искр; ΔY , ΔZ - отклонения восстановленных координат искр от соответствующих координат точек подгоночного трека; λ , ϕ , $\Delta\lambda$, $\Delta\phi$ - глубинный и азимутальный углы трека и их ошибки; $1/R$ - кривизну окружности, являющейся проекцией спирали на плоскость XY. Для дальнейшего анализа результаты работы программы записываются на магнитную ленту или печатаются.

* Ось X направлена вдоль спектрометра, ось Z - по вертикали.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИСКРОВЫХ КАМЕР

Мерой пространственного разрешения камер будем считать разности между измеренными значениями координат искр и координатами точек, реконструированных по программе МОГМ1.

Будем рассматривать указанные разности как случайные величины. Тогда систематическое смещение искры в i-й камере по Z- или Y-координате относительно реконструированного трека ΔZ_i и ΔY_i можно определить как величину значения оценки среднего соответствующего распределения по данной выборке измеренных треков. При этом ширины этих распределений, определяемые их стандартными отклонениями σ_Z , σ_Y , характеризуют совокупность случайных ошибок:

- а/ измерительной;
- б/ разброса искр в камере, определяемого механизмом формирования искры;
- в/ ошибок вследствие оптических дисторсий и т.д.

На рис. 1а, в представлены графики систематических смещений ΔY_i и ΔZ_i как функций номера ОИК, а на рис. 1 с, d - аналогичные графики стандартных отклонений /пленка №649/. На рис. 1 а, в приведены также для сравнения результаты обработки пленки №953, полученной в другом сеансе. Сравнение результатов указывает на незначительные изменения этих величин от сеанса к сеансу, и, как следствие этого, на возможность их учета для улучшения пространственного разрешения.

Рассматривая, в свою очередь, значение систематического смещения ΔY_i , ΔZ_i в i-й камере как i-е значение некоторой случайной величины ΔY , ΔZ , можно построить ее распределение /рис. 2 а, в, пленка №649/. Параметры этого распределения характеризуют спектрометр в целом и зависят от неидентичности ОИК.

В соответствии с моделью реконструированного трека мы должны ожидать, что величины значений оценок средних распределений ΔY и ΔZ должны быть близкими к нулю. Стандартные отклонения данных распределений определяются в основном оптическими дисторсиями ОИК, и равны соответственно 0,16 и 0,80 мм.

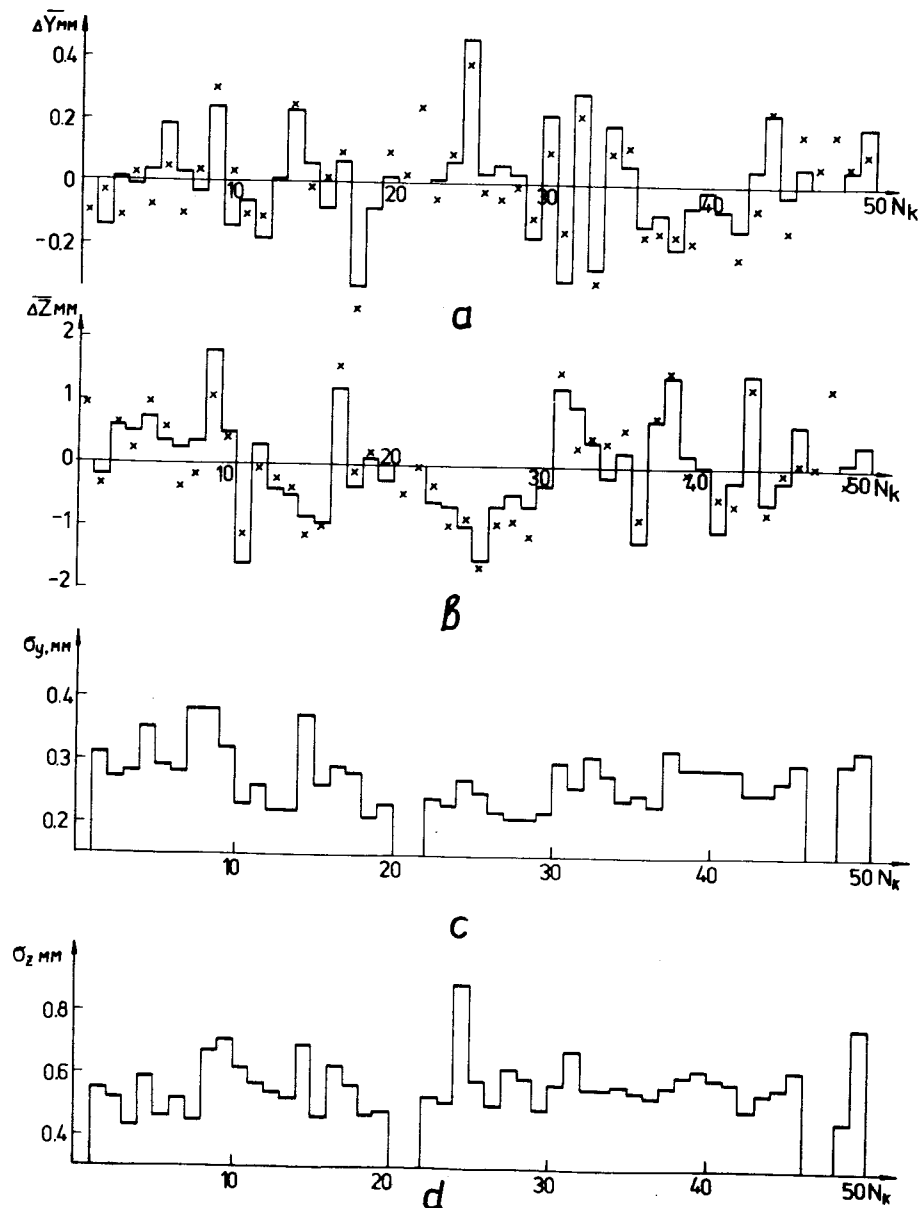


Рис. 1. Распределения систематических смещений ΔZ , ΔY и стандартных отклонений σ_Y, σ_Z по спектрометру /сплошная линия - пленка №649, звездочки - пленка №953/.

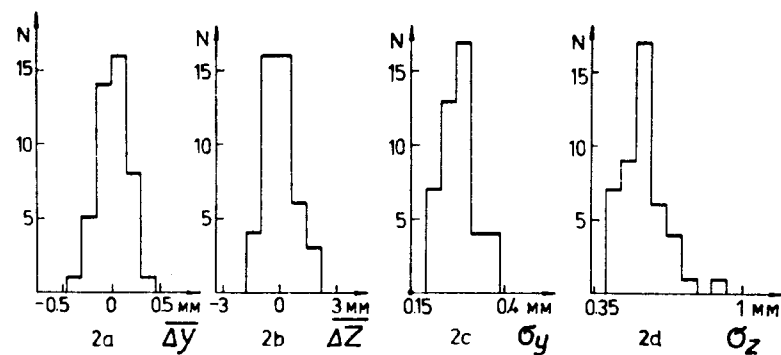


Рис. 2. Распределение величин $\Delta Y, \Delta Z, \sigma_Y$ и σ_Z .

Оценка вклада в величины $\sigma_{\Delta Y}$ и $\sigma_{\Delta Z}$ ошибки, связанной с неточным восстановлением реперных меток спектрометра, приводит соответственно к величинам 0,06 и 0,4 мм. Эта оценка получена на основе определения систематических отклонений изображения реперных меток на стереопроекциях от эталонных положений.

Рассматривая аналогично систематическим смещениям распределение случайной величины, значениями которой являются значения оценок стандартных отклонений по Y- и Z- координате σ_Y, σ_Z для каждой камеры, получаем величины значений оценок среднего пространственного разрешения в ОИК по всему спектрометру по Y- и Z- координате /пленка №649/:

$$\sigma_Y = 0,28 \text{ мм}, \quad \sigma_Z = 0,57 \text{ мм}.$$

Распределения величин σ_Y и σ_Z представлены на рис. 2c, d

В табл. 1 приведены величины $\sigma_{\Delta Y}, \sigma_{\Delta Z}, \sigma_Y$ и σ_Z также и для пленок №342 и №953. Каждая из этих величин незначительно изменяется от сеанса к сеансу, что указывает на достаточную стабильность работы спектрометра. Большую величину σ_Y для пленки №953 можно объяснить увеличением задержки импульсного питания ОИК примерно на 0,3 мкс.

Таблица 1

№ пленки	342	649	953
$\sigma_{\Delta y}$, мм	0,13	0,16	0,16
$\sigma_{\Delta z}$, мм	1,01	0,80	0,79
σ_y , мм	0,30	0,28	0,40
σ_z , мм	0,68	0,57	0,71
σ_{sp} , мм	0,29	0,27	0,39
$\sqrt{\sigma_m^2 + 4\sigma_d^2}$, мм	0,13	0,11	0,13
$(1/R)$, 10^{-6} см^{-1}	0,44	0,13	0,03
$\delta(1/p)$, $10^{-4} (\text{ГэВ}/c)^{-1}$	1,26	1,19	1,43
$R = a/\delta(1/p)$, км	14,7	16,5	13,0
$\sigma_s = \frac{\rho^2}{8R}$, мм	0,20	0,19	0,24
$\sigma_s = \frac{3,5\sigma_y}{\sqrt{n}}$, мм	0,17	0,15	0,21
$\rho = 1/\delta(1/p)$, ГэВ/с	8000	8400	7000
δ_φ , мрад	0,16	0,15	0,19
δ_λ , мрад	0,16	0,12	0,12
Число событий	76	89	87
n - среднее число точек на треке	39	42	45

РАЗДЕЛЕНИЕ ОШИБОК

Используя данные о величинах среднеквадратичных отклонений по Y- и Z-координатам, полученные из реконструкции треков в пространстве и реконструкции треков в двух стереопроекциях, можно построить систему уравнений относительно возможных ошибок:

$$\sigma_{Y1}^2 = \sigma_{sp}^2 + \sigma_m^2 + \sigma_{d1}^2,$$

$$\sigma_{Y2}^2 = \sigma_{sp}^2 + \sigma_m^2 + \sigma_{d2}^2,$$

$$\sigma_Y^2 = \sigma_{sp}^2 + \frac{1}{2}\sigma_m^2 + \sigma_{d1}^2 + \sigma_{d2}^2, \quad /1/$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_{sp}^2 + 4\lambda^2 \left(\frac{1}{2}\sigma_m^2 + \sigma_{d1}^2 + \sigma_{d2}^2 \right),$$

где σ_{sp} - ошибка, связанная со смещением искры, σ_m - измерительная ошибка и σ_d - ошибка, обусловленная дисторсиями стекол ОИК. При построении системы /1/ сделано допущение об изотропности в пространстве флуктуаций искры, т.е. $\sigma_{y sp} = \sigma_{z sp} = \sigma_{sp}$. Измерительная ошибка также предполагается одинаковой при измерениях на обеих стереопроекциях. Предполагается, что оптические дисторсии ОИК различным образом проявляются на каждой стереопроекции, для первой и второй проекций соответственно введены σ_{d1} и σ_{d2} .

Как обычно, здесь $\lambda = L/B$ - стереофактор, где B - расстояние между оптическими осями объективов, а L - расстояние до фотографируемого объекта.

Решая систему /1/ для каждой из камер, получаем наборы величин σ_{isp} , σ_{im} , σ_{id1} и σ_{id2} , $i = 1, 2, \dots, 50$.

Рассматривая каждый из этих наборов как множество значений некоторой случайной величины и строя соответствующие распределения, мы получаем величину значения оценки среднего каждой из ошибок:

а/ пространственной флуктуации положения искры

$$\overline{\sigma_{sp}} = 0,29 \text{ мм},$$

б/ измерительной ошибки

$$\overline{\sigma_m} = 0,09 \text{ мм},$$

в/ дисторсии ОИК

$$\overline{\sigma_d} = 0,05 \text{ мм}.$$

Эти данные получены при обработке пленки №342. В табл. 1 приведены величины σ_{sp} и полной измерительной ошибки, включающей дисторсии ОИК, для всех трех пленок.

Для сравнения приведем значения среднеквадратичного разброса отдельных искр относительно реконструированной траектории и измерительную ошибку из работы /6/ /искровые камеры в магнитном поле/:

$$\sigma_{sp} = 0,18 \text{ мм},$$

$$\sigma_m = 0,09 \text{ мм}.$$

Разницу величин σ_{sp} , полученных в данной работе и работе /6/, можно объяснить различием в задержках импульсного питания ОИК, а также, возможно, влиянием магнитного поля.

В работе /1/ приведено соотношение $\sigma_z = 3,5\sigma_y$, полученное для спектрометра МИС ОИЯИ /2/ на основе данных спектрометра ЦЕРН /6/ с учетом различия в коэффициентах увеличения оптических систем этих спектрометров. Однако введение этого соотношения не оправдано ввиду слабой корреляции σ_y и σ_z : основной вклад в σ_y /-на 90%/ вносит σ_{sp} , а в σ_z /-на 80%/ - σ_m , полная измерительная ошибка. Использование приведенного соотношения в работе /1/ для моделирования могло привести к неточным результатам.

УГЛОВОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА

Угловые ширины пучка частиц, на котором проводились измерения, составляли $\sigma_\phi = 0,4 \text{ мрад}$ и $\sigma_\lambda = 0,6 \text{ мрад}$ /азимутальный и глубинный углы/. Полученные при этом величины значений оценок разрешений спектрометра были соответственно $\overline{\delta_\phi} = 0,15 \text{ мрад}$ и $\overline{\delta_\lambda} = 0,12 \text{ мрад}$ /для пленки №649/. Данные о $\overline{\delta_\phi}$ и $\overline{\delta_\lambda}$ по всем пленкам приведены в табл. 1. Величина $\overline{\delta_\phi}$ изменяется в пределах $0,15 \div 0,19 \text{ мрад}$, а $\overline{\delta_\lambda}$ - от $0,12$ до $0,16 \text{ мрад}$.

Оценку величины $\overline{\delta_\lambda}$ можно также получить, используя данные о пространственной точности в вертикальной плоскости $\overline{\sigma_z}$ и $\overline{\sigma_{\Delta z}}$:

$$\overline{\delta_\lambda} = \frac{\sqrt{2} \sqrt{\overline{\sigma_z^2} + \overline{\sigma_{\Delta z}^2}}}{\sqrt{n}/2 \cdot \ell/2},$$

где \overline{n} - среднее число точек на треке, ℓ - длина спектрометра. Используя, например, данные, полученные для пленки №649, найдем $\overline{\delta_\lambda} = 0,13 \text{ мрад}$. Эта величина близка к найденной в программе геометрической реконструкции. Отсюда также следует, что устранением систематических смещений ($\overline{\sigma_{\Delta z}} \approx 0$) можно добиться уменьшения ошибки в определении глубинного угла примерно в полтора раза.

КУСОЧНО-ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕКА ЧАСТИЦЫ ПУЧКА

В модели трека, используемой в программе МОГМ1, реконструкция траектории частицы ведется по всей длине спектрометра, т.е. анализируются одновременно все измеренные координаты искр, принадлежащих треку.

Оптическая схема спектрометра может быть представлена как пять оптических стереоканалов, связанных условиями "непрерывности" траектории частицы /пучка/ на границах между каналами. В этой связи возникает вопрос о рассмотрении модели трека, представляющей траекторию в виде пяти участков. Расчет делается в предположении, что магнитное поле спектрометра $B=0$. На каждом из участков выбирается линейная модель трека в виде уравнений прямой в двух плоскостях Oxy и Oxz :

$$y = (\text{tg} \alpha_{yx}) \cdot x + a_y,$$

$$z = (\text{tg} \alpha_{zx}) \cdot x + a_z.$$

Границы каналов находятся в четырех плоскостях, расположенных между блоками спектрометра: $X_1 = -150 \text{ см}$, $X_2 = -50 \text{ см}$, $X_3 = 50 \text{ см}$, $X_4 = 150 \text{ см}$ - в системе координат спектрометра.

Спектрометр может быть теперь охарактеризован распределениями линейных

$$\Delta y_i = (a_{y_{i+1}} - a_{y_i})_i,$$

$$\Delta z_i = (a_{z_{i+1}} - a_{z_i})_i, \quad i = 1, 2, 3, 4,$$

и угловых

$$\Delta a_{yx_i} = (a_{yx_{i+1}} - a_{yx_i})_i,$$

$$\Delta a_{zx_i} = (a_{zx_{i+1}} - a_{zx_i})_i,$$

рассогласований прямых участков траекторий частиц в граничных плоскостях. Величины этих рассогласований непосредственно связаны с систематическими смещениями, определяемыми дисторсиями стекол ОИК и неточностью восстановления реперных меток спектрометра.

Таблица 2 /по пленке №649/

параметр \ x см	-150	-50	+50	+150
Δy , мм	$0,06 \pm 0,04$	$-0,20 \pm 0,04$	$0,06 \pm 0,04$	$-0,01 \pm 0,03$
Δz , мм	$1,82 \pm 0,10$	$1,30 \pm 0,10$	$-1,22 \pm 0,07$	$0,54 \pm 0,10$
Δa_{yx} , мрад	$0,20 \pm 0,07$	$0,03 \pm 0,06$	$0,00 \pm 0,05$	$-0,28 \pm 0,07$
Δa_{zx} , мрад	$0,07 \pm 0,15$	$0,32 \pm 0,20$	$1,20 \pm 0,14$	$-1,74 \pm 0,14$

ИМПУЛЬСНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА И РАДИУС ЛОЖНОЙ КРИВИЗНЫ

Треки частиц пучка, полученные в результате геометрической реконструкции по данным измерений на пленке, для случая выключенного магнитного поля имеют некоторую ложную кривизну, связанную с прост-

ранственными флуктуациями искр в камерах, многократным рассеянием и измерительными ошибками. В нашем случае основной вклад вносит ошибка из-за пространственных флуктуаций положения искр $\sigma_{sp} \approx 0,3$ мм. На рис. 3 представлено распределение значений величины ложной кривизны треков $1/R$. Из этого распределения для сагиты получается

$$\sigma_s = \frac{\ell^2}{8} \sigma \left(\frac{1}{R} \right) = 0,20 \text{ мм},$$

где ℓ - длина спектрометра.

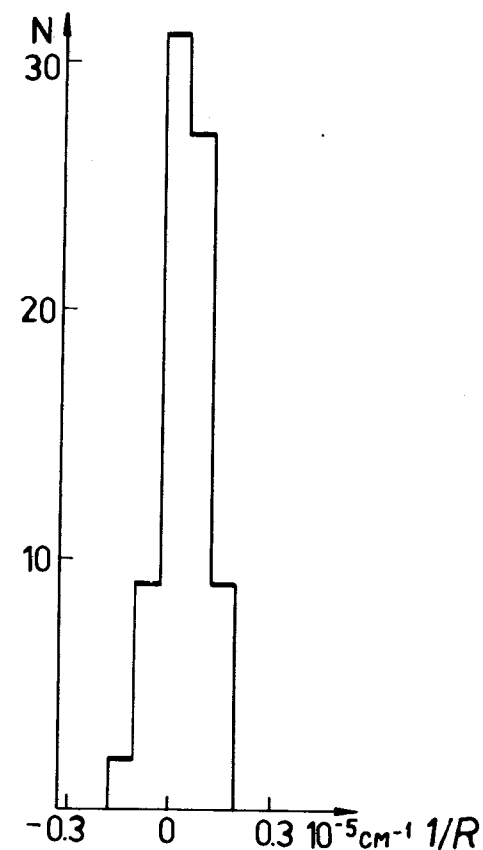


Рис. 3. Распределение ложной кривизны треков $1/R$.

Так как $\Delta p/p = \Delta s/s$, то в предположении слабой зависимости величины ошибки сагиты от магнитного поля относительная ошибка в определении импульса частиц пучка 40 ГэВ/с в магнитном поле 18 кЭ составит $\Delta p/p \approx 0,5\%$. Максимальный измеримый импульс спектрометра при этом $P_0 = 8 \cdot 10^3$ ГэВ/с.

В табл. 1 приведены величины максимально измеримого радиуса $R = \alpha(R) \approx 15$ км и средней точности измерения величины, обратной величине импульса $\bar{\delta}(1/p)$, рассчитанной для спектрометра с магнитным полем /18 кЭ/. В этой же таблице приведены также значения величины σ_s для всех пленок, определенные по радиусу

ложной кривизны и на основании формулы
$$\sigma_s = \frac{35 \cdot \sigma_y}{\sqrt{n}}$$

/n - число точек на треке/, предложенной в работе /7/. Вычисленные значения величины σ_s оказались на 15-20% меньше, чем определенные по радиусу ложной кривизны.

Для пленки №342 получена сравнительно большая величина ($1/R$), что, по-видимому, связано с небольшим остаточным полем в магните спектрометра /около 50 Э/. Это предположение подтверждается наличием эффекта стаггеринга /смещения электронов ионизации в скрещенных электрическом и магнитном полях/ в этих измерениях. Относительное смещение искр $2d = 0,07 \pm 0,02$ мм. Для двух других пленок этот эффект не обнаружен.

Результаты данной работы показывают, что точностные характеристики магнитного искрового спектрометра ОИЯИ являются достаточно высокими, однако необходима дополнительная работа по устранению систематических ошибок. Учет систематических ошибок при определении Z-координаты искр позволит уменьшить ошибку в определении глубинного угла примерно в полтора раза и свети ее до величины 0,07 мрад.

В заключение авторы считают своим приятным делом выразить благодарность И.М.Василевскому за поддержку и постоянный интерес к работе. Авторы признательны М.А.Ананьевой и сотрудникам ООФИ ЛВТА ОИЯИ

за проведение измерений на HPD. Авторы благодарны Л.К.Лыткину за предоставление оптических констант и Г.Н.Литвиновой за помощь при оформлении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lytkin L. e.a. JINR, E1-10718, Dubna, 1977.
2. Анджаяк Р. и др. ОИЯИ, 13-3588, Дубна, 1967.
3. Говорун Н.Н., Дикусар Н.Д. ОИЯИ, 10-10332, Дубна, 1976.
4. Brun R. e.a. HBOOK User Guide Version 2.0. CERN DD/75/11, 1975.
5. Astbury P. e.a. Nucl.Instr. and Meth., 1967, 46, p.61.
6. Bock R.K., Zoll J. JINR, D10-6142, Dubna, 1971, p.547.
7. Roberts A. Int. Symp. Nuclear Electr., Paris, 1963, p.21.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 февраля 1978 года.