

8550

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



СЗ44.14  
А-655

5/2-75

13 - 8550

1634/2-75

Е.М.Андреев, Г.Бом, Ю.Бэр, Г.Либман, В.М.Суворов,  
У.Хардер, Й.Шюлер

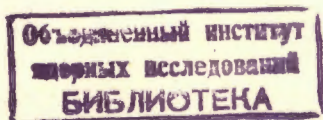
ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ РИСК  
(проект)

**1975**

13 - 8550

Е.М.Андреев, Г.Бом, Ю.Бэр,<sup>1</sup> Г.Либман,<sup>2</sup> В.М.Суворов,  
У.Хардер,<sup>1</sup> Й.Шюлер

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ РИСК  
(проект)



---

<sup>1</sup> ИФВЭ АН ГДР, Цейтен.

<sup>2</sup> Технический университет, Дрезден, ГДР.

Андреев Е.М., Бом Г., Бэр Ю., Либман Г.,  
Суворов В.М., Хардер У., Шюлер Й.

13 - 8550

#### Оптическая система установки РИСК (проект)

Излагается проект оптической системы магнитного спектрометра со стримерной камерой (установки РИСК). Оптическая система обеспечивает геометрическую реконструкцию событий и измерение ионизации релятивистских частиц. Подробно обсуждаются вопросы выбора параметров системы на основе специфических требований к оптике, предъявляемых стримерными камерами.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1975

## Введение

Оптическая система современной стримерной камеры должна обеспечить решение двух экспериментальных задач: 1/ измерение с точностью  $0,3 \div 0,5$  мм геометрических характеристик треков для последующей пространственной реконструкции событий и 2/ измерение ионизации /полного числа стримеров в треке/, произведенной частицей в камере. Эти требования превращают создание оптической системы для стримерной камеры в проблему, связанную с большими затратами сил и средств. По крайней мере для больших камер /с чувствительным объемом в несколько кубометров/ в случае решения задачи путем традиционного для трековых приборов прямого фотографирования возникают трудности из-за малого количества света, излучаемого стримером  $10^9 \div 10^{10}$  фотонов/, большой градации яркости стримеров  $10^2$  раз/ и невозможности неограниченно увеличивать светосилу объективов и чувствительность пленки. Увеличение светосилы объективов сопровождается увеличением дефокусировки изображений стримеров в случае большой глубины фотографированного пространства и, следовательно, уменьшением их освещенности и ухудшением разрешения системы. Что касается пленки, то ее чувствительность находится в обратной зависимости от достижимого при работе с этой пленкой разрешения.

В этих условиях параметры оптической системы должны выбираться оптимальным образом. Оптимизация проводится так, чтобы при разумных затратах получить наибольшую светочувствительность, сохраняя необходимую точность геометрической реконструкции.

Реально в системах прямого фотографирования не возможно добиться 100%-ной эффективности регистрации стримеров. Выход из этого положения, как это было указано Долгошеиным и сотрудниками /1/, состоит в использовании электронно-оптических преобразователей /ЭОПов/ для усиления светового потока от стримера. Однако доступные на сегодня ЭОПы с электромагнитной фокусировкой обладают весьма значительными дисторсиями, сильно зависящими от напряженностей электрических и магнитных полей. Необходимость стабилизации, контроля и учета изменений параметров ЭОПов приводит к тому, что их применение для пространственной реконструкции событий практически неосуществимо.

В связи с этими обстоятельствами на первом этапе реализации оптическая система установки РИСК будет состоять из двух частей: системы прямого фотографирования /СПФ/ для регистрации пространственной картины событий и системы измерения ионизации с помощью ЭОПов с электромагнитной фокусировкой. При этом для системы прямого фотографирования главной задачей является получение максимальной освещенности изображений стримеров при сохранении требуемого уровня точности геометрической реконструкции. Для системы измерения ионизации главным требованием является получение максимального разрешения во всем фотографируемом объеме. Проект предусматривает возможность перехода к единой оптической системе регистрации, основанной на использовании в СПФ новых типов ЭОПов с электростатической фокусировкой, обладающих требуемой стабильностью и надежностью в работе.

Ниже дается поэтапное описание оптической системы установки РИСК - отдельных систем прямого фотографирования и измерения ионизации, а также единой системы регистрации. В приложении 1 рассматривается выбор стереоугла; вопросы оптимизации свойств системы прямого фотографирования и измерения ионизации обсуждаются в приложении 2.

Система прямого фотографирования должна обеспечить пространственную реконструкцию событий в чувствительном объеме стримерной камеры установки РИСК, имеющей размеры  $X \cdot Y \cdot Z = 4600 \cdot 1250 \cdot 800 \text{ мм}^3$ . Используется правая система координат, в которой оси  $x$  и  $z$  направлены по пучку и вертикали соответственно. Магнитное и электрическое поля в камере направлены по оси  $z$ . СПФ характеризуется следующим набором параметров:

$2\theta$  - стереоугол;

$a$  - расстояния объективов до средней плоскости камеры;

$f$  - фокусное расстояние объективов;

$D/f$  - относительное отверстие объективов;

$2\psi$  - угол поля зрения;

$\alpha$  - угол между оптическими осями СПФ в пространстве предмета и осью  $z$ .

Величина стереоугла ( $2\theta$ ) определяет соотношение между ошибками измерений в горизонтальном ( $\sigma_{xy}$ ) и вертикальном ( $\sigma_z$ ) направлениях. Хотя ошибка  $\sigma_z$  падает с увеличением стереоугла, тем не менее неограниченному увеличению стереоугла вплоть до оптимального с этой точки зрения значения  $2\theta = 90^\circ$  препятствуют два фактора:

- 1/ ухудшение точности измерения координат в горизонтальной плоскости из-за увеличения размеров проекций стримеров в плоскости изображения /см. приложение 1/ и
- 2/ увеличение мертвых зон на краях камеры.

В нашем случае для стереоугла взято значение  $2\theta = 17^\circ$ . При этом ошибка  $\sigma_z$  приблизительно в семь раз больше ошибок в горизонтальной плоскости для взятой нами величины отношения длины стримера к его диаметру, равной десяти.

Параметры  $a$ ,  $f$ ,  $D/f$ ,  $2\psi$  системы прямого фотографирования выбраны с точки зрения получения оптимальной освещенности пленки на краю поля зрения /см. приложение 2/. Расстояние фотографирования до средней плоскости камеры  $a = 5 \text{ м}$ , уменьшение  $\beta = 1/50$  и относительное отверстие  $D/f = 1/2,5$ . При этом наиболее подходящим в нашем случае оказался объектив Уран-27 /2,5/100/.

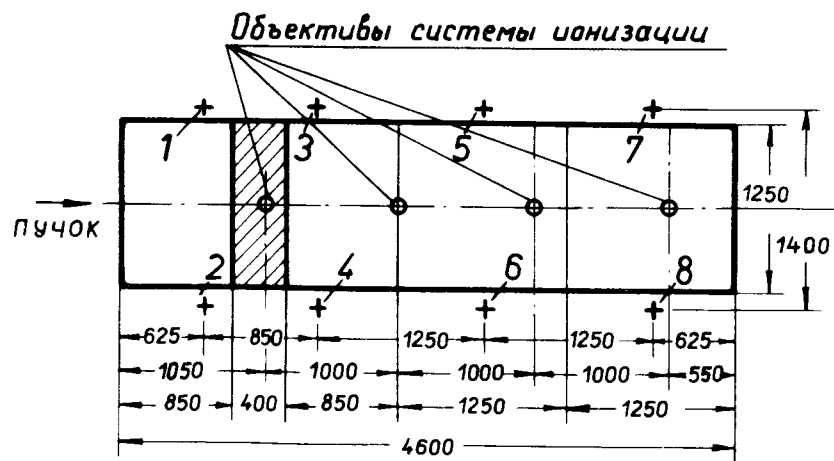


Рис. 1. Эффективное расположение объективов оптической системы относительно чувствительного объема стримерной камеры.

Эффективное расположение объективов показано на рис. 1. Поле зрения в камере разделено на четыре квадрата, из которых два передних квадрата перекрывают друг друга на 40 см /на поверхности чувствительного объема/ для улучшения условий измерения угловых характеристик треков в районе мишени. Соседние по пучку изображения объединяются по два /т.е. 1 и 3; 5 и 7; 2 и 4; 6 и 8 - см. рис. 1/ с помощью зеркальных пар и проектируются на один фоторегистратор. Таким образом, в системе прямого фотографирования используются четыре фоторегистратора /см. рис. 2а,б/.

Зеркала в оптических парах наклонены к горизонтальной плоскости под углом  $45^\circ$ . Зеркала, обращенные к чувствительному объему, располагаются так, что их нормали параллельны вертикальной плоскости, содержащей ось пучка. Зеркала, обращенные к объективам, повернуты дополнительно вокруг вертикальной оси на угол  $\alpha = 9^\circ$ , так что плоскости обоих зеркал в парах не параллельны. В результате сохраняется вертикальное положение каждого объектива, в то время как их оптические оси в пространстве камеры наклонены относительно верти-

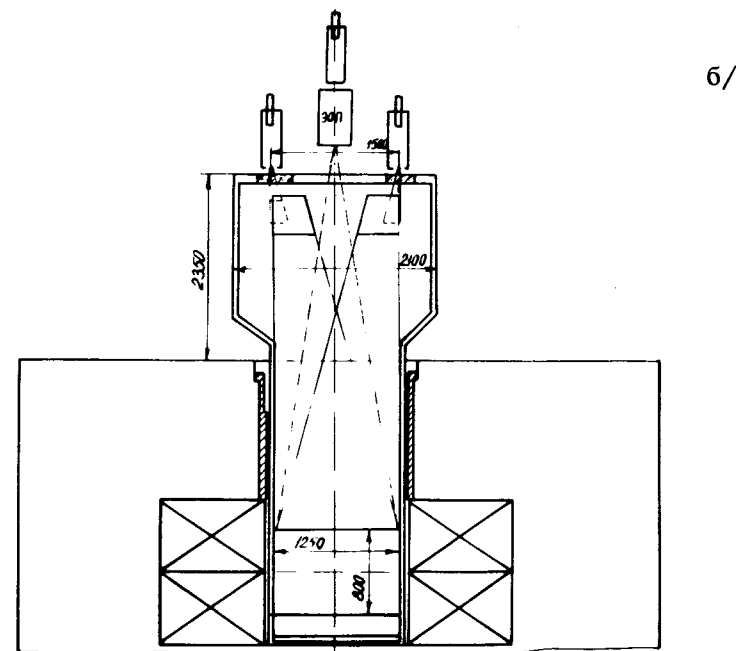
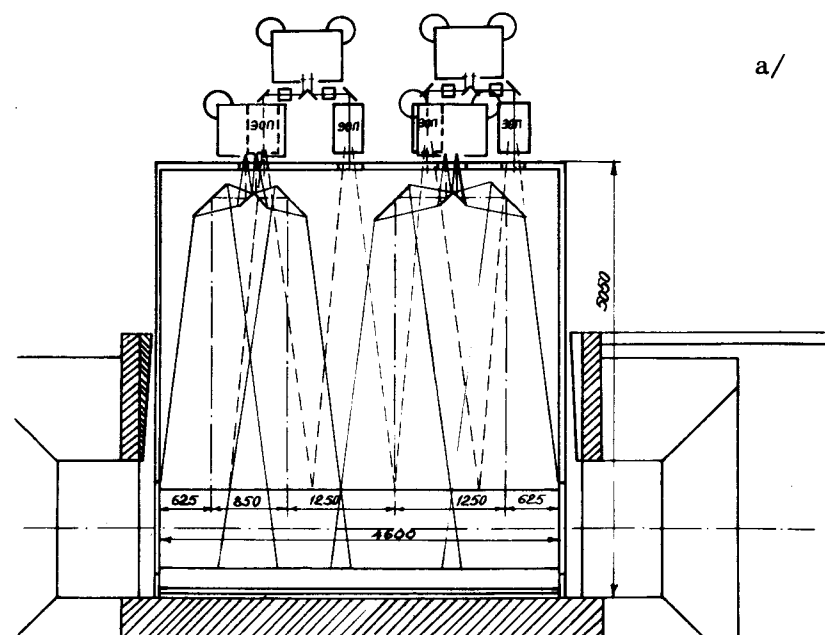


Рис. 2а,б. Общий вид оптической системы: а/ вид сбоку; б/ вид по пучку.

кальной оси на тот же угол. Это дает возможность сократить угол поля зрения с  $2\psi \approx 36^\circ$  /без наклона осей/ до  $2\psi \approx 23^\circ$ . Глубина изображаемого пространства при этом практически не увеличивается, поскольку плоскость изображения наклонена на небольшой угол  $\alpha' \approx 11'$  к горизонтальной плоскости ( $\operatorname{tg} \alpha' = \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha$ ).

Фотографирование производится на перфорированную пленку шириной 35 мм. Оба снимка с каждого фоторегистратора /размер каждого снимка 28 x 28 мм/ и служебная информация располагаются на отрезке пленки длиной 162 мм/ см. рис. 3/. Снимки повернуты относительно друг друга, что связано с поворотом вторых зеркал в парах. Шаг перемотки пленки 95 мм выбран с таким расчетом, чтобы наиболее экономично ее использовать: промежуточные между одновременными снимками участки пленки занимают вторым снимком предшествующего и первым снимком последующего события.

Изображение точечного объекта, рассчитанное на основе абберационных данных объектива Уран-27 имеет диаметр  $d' = /25 \div 60/$  мкм в зависимости от расположения этого объекта по глубине рабочего объема. Зависимости диаметра изображения от угла поля зрения практически нет. С учетом разрешения фотопленки и диаметра стримеров  $/1 \div 2/$  мм их изображение будет иметь размеры  $/50 \div 70/$  мкм. В пространстве предмета ему соответствует кружок рассеяния диаметром  $/2,5 \div 3,5/$  мм.

На основе результатов, полученных на модели установки РИСК, а также на других стримерных камерах, требуемое для геометрической реконструкции количество зарегистрированных стримеров достигается при длине стримера  $\sim 3$  см. При точности измерения центра тяжести изображения стримера в измерительном приборе  $\sim 0,1$  от его размера\* ошибка, связанная с разрешением оптической системы, будет  $\sigma_R \approx 0,3$  мм. Такой же порядок имеют

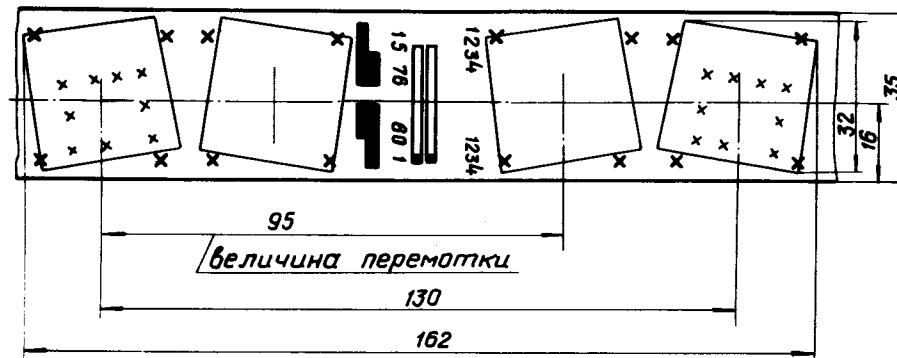


Рис. 3. Размещение двух снимков и служебной информации одного кадра на пленке.

ошибка  $\sigma_D$ , связанная с диффузией электронов за время задержки высоковольтного импульса, и ошибка современных измерительных автоматов  $/\sigma_M \approx /5 \div 6/$  мкм на пленке/. Суммарная ошибка измерения в горизонтальной плоскости составит, таким образом,  $\sigma_{xy} \approx 0,5$  мм, а в определении вертикальной координаты  $\sigma_z = 3,5$  мм.

Эти оценки не включают систематических ошибок, обусловленных дисторсиями светосильных объективов, поскольку эти ошибки одинаковы для стримеров и реперных меток и их можно корректировать при обработке, а также систематических ошибок, связанных с возможностью удлинения стримеров /см. приложение 1/ и смещения их центра тяжести в направлении электрического поля. Коррекция последних возможна только для определенного режима стримерной камеры и требует дальнейших экспериментальных исследований.

#### Система измерения ионизации

В системе измерения ионизации используются четыре объектива, расположенных по оси камеры /см. рис. 1/. При этом первая часть камеры длиной 60 см в поле зрения объективов не попадает, оставшаяся часть /400 см/ делится по числу объективов еще на четыре. Изображения,

\*Эта оценка характеризует точность измерений в пузырьковых камерах. Для стримерных камер эта цифра является предельной. Вопрос ее реализации связан также с качеством фотопленки и методикой проявления, которые влияют на контрастность и отношение сигнала к фону.

даваемые объективами, усиливаются электромагнитными ЭОПами. Затем два расположенные рядом изображения объединяются на пленке с помощью зеркальной системы в один кадр.

Цель оптимизации системы измерения ионизации состоит в том, чтобы получить максимальное пространственное разрешение при наименьшей его неоднородности по всему чувствительному объему /приложение 2/. Изображение на катоде ЭОПа формируется объективом с небольшим относительным отверстием  $D/f = 1/10$  и с уменьшением  $\beta_1 = 1/40$ . Расстояние от объектива /  $f = 105$  мм / до средней плоскости камеры  $a = 4,3$  м. Диаметр используемой части фотокатода - 41 мм, угол поля зрения объектива -  $2\psi = 22^\circ$ . Изображение с экрана ЭОПа переносится на фотопленку с уменьшением  $\beta_2 = 0,8$  /поскольку полное уменьшение  $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2 = 1/50$  / с помощью репродукционного объектива Аврора-4 /258/2,5/. При использовании этого объектива расстояние от экрана ЭОПа до пленки ~ 930 мм; уменьшение яркости изображения при передаче с экрана ЭОПа на пленку ~ 126 раз. Разрешение на фотопленке будет определяться в основном разрешением ЭОПа и составит ~ 15 л/мм /т.е. диаметр кружка рассеяния  $d' \approx 70$  мкм/. При условии, что эффективное увеличение яркости стримеров для измерения ионизации должно быть порядка десяти по сравнению с яркостью, требуемой в системе прямого фотографирования, коэффициент усиления ЭОПов должен быть  $V \approx 2 \cdot 10^4$ . Это требует использования как минимум трехкамерного электромагнитного ЭОПа.

Надо заметить, что использованная в расчетах длина стримеров /3 см/ может оказаться недостаточной для измерения ионизации в силу большого разброса их по яркости /возможность измерения ионизации в таком режиме пока не выяснена/. В этом случае одной из возможностей является двойной запуск стримерной камеры <sup>/2/</sup>. При этом ЭОПы перед вторым высоковольтным импульсом закрываются быстрым затвором.

## Единая оптическая система

Проект системы прямого фотографирования предусматривает возможность непосредственного перехода к единой оптической системе. Переход основан на использовании ЭОПа с электростатической фокусировкой типа RCA 8605. Свет с плоскости изображения объектива на фотокатод ЭОПа и с экрана последнего на пленку передается через волоконные шайбы. В каждом канале фотографирования будет использован двухкамерный ЭОП. При этом будет достигнуто максимальное усиление светового потока, равное 600 /в пересчете данных каталога на длину волны 0,6 мкм/. Параметры объектива, выбранные в соответствии с требованием наилучшего разрешения:  $f = 100$  мм;  $f/D = 10$ . Уменьшение при этом составит  $\beta = 1/50$  и угол поля зрения  $2\psi = 23^\circ$ . Зеркальная система остается неизменной. Фотокатод ЭОПа используется целиком /  $\phi = 40$  мм /.

Главным фактором, определяющим разрешение на краю кадра, является качество электронно-оптического изображения в ЭОПах, в то время как разрешение в центре будет определяться волоконной оптикой и пленкой. На основе технических характеристик упомянутого выше ЭОПа, а также экспериментальных данных, полученных в ЦЕРНе, можно предположить, что диаметр стримеров на пленке на расстоянии 10 мм от центра изображения будет ~ 40 мкм. На краю кадра /20 мм от центра/ он увеличится до 100 мкм /с учетом диаметра стримера 2 мм и разрешения пленки 60 л/мм/.

Несмотря на то, что дисторсии электростатических ЭОПов велики /~ 25% на краю экрана/, в отличие от дисторсий ЭОПов с электромагнитной фокусировкой они мало зависят от напряжения. Для коррекции этих дисторсий верхняя плоскость реперной системы будет выполнена в виде сетки с квадратной ячейкой размерами ~ 100 x 100 мм<sup>2</sup>. Точность коррекции в плоскости изображения ~ 5 мкм.

В такой системе фотографирования остается запас по количеству света ~ 10, что позволяет использовать фотопленку с более высоким разрешением и тем самым улучшить контрастность изображения. Другой возмож-

ностью является уменьшение длины стримеров / < 1 см/, что будет сопровождаться улучшением режима работы камеры /уменьшение разрядов в камере; улучшение работы высоковольтной системы/, а также увеличением точности измерения геометрических параметров событий и ионизации.

Другие преимущества перехода к единой системе фотографирования - уменьшение числа компонентов оптической системы, объема обрабатываемого пленочного материала, а также устранение трудностей, связанных с работой двух систем фотографирования с разными уровнями светочувствительности. Единая система фотографирования позволяет осуществить переход к бесфильмовому съему информации.

### Приложение 1

#### Выбор стереоугла

Рассмотрим след, состоящий из стримеров диаметром  $s$  и длиной  $l$ , расположенный в средней плоскости камеры перпендикулярно стереобазе. Сечение стримера вертикальной плоскостью представляет собой прямоугольник  $s \times l$  /рис. 4/. След фотографируется двумя расположенными на бесконечности объективами, образующими стереопару с углом  $2\theta$ .

Ошибки реконструкции положения следа в горизонтальной и вертикальной плоскостях  $\sigma_{xy}$  и  $\sigma_z$  пропорциональны  $\Delta y$  и  $\Delta z$  соответственно.  $\Delta y$  и  $\Delta z$  - центральные проекции стримера на вертикальную и горизонтальную плоскости из узловых точек объектива. Величины  $\Delta y$  и  $\Delta z$  связаны с размерами стримеров  $s, l$  и стереоуглом  $2\theta$  следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta y &= s + l \cdot \operatorname{tg} \theta, \\ \Delta z &= l + s \cdot \operatorname{ctg} \theta. \end{aligned} \quad /1/$$

Зависимости  $\Delta y$  и  $\Delta z$  от величины стереоугла пред-

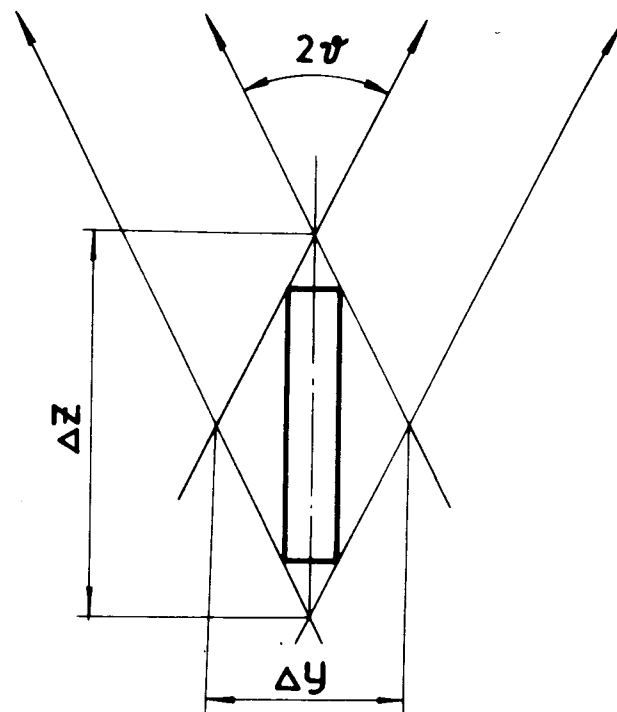


Рис. 4. Проекция стримера в вертикальной плоскости, содержащей стереобазу.

ставлены на рис. 5 / $s$  и  $l$  равны 1 и 10 мм соответственно/. Из рис. 5 видно, что с увеличением точности измерения по  $z$  точность измерения по  $y$  быстро ухудшается. Сумма  $(\Delta y^2 + \Delta z^2)$  имеет минимум при  $\operatorname{tg} \theta = 0,45 / 2\theta = 48^\circ$ /. Однако при этом величина  $\Delta y$ , определяющая точность измерения кривизны треков и, следовательно, импульса, в 5,5 раза больше по сравнению с минимальным значением при  $\theta = 0$ . Поэтому в стримерных камерах работают с меньшими стереоуглами. При уменьшении стереоугла до  $17^\circ$  /как в нашем проекте/ сумма  $(\Delta y^2 + \Delta z^2)$ , определяющая точность измерения угла, возрастает только на  $\sim 25\%$ , в то время как  $\Delta y$  умень-



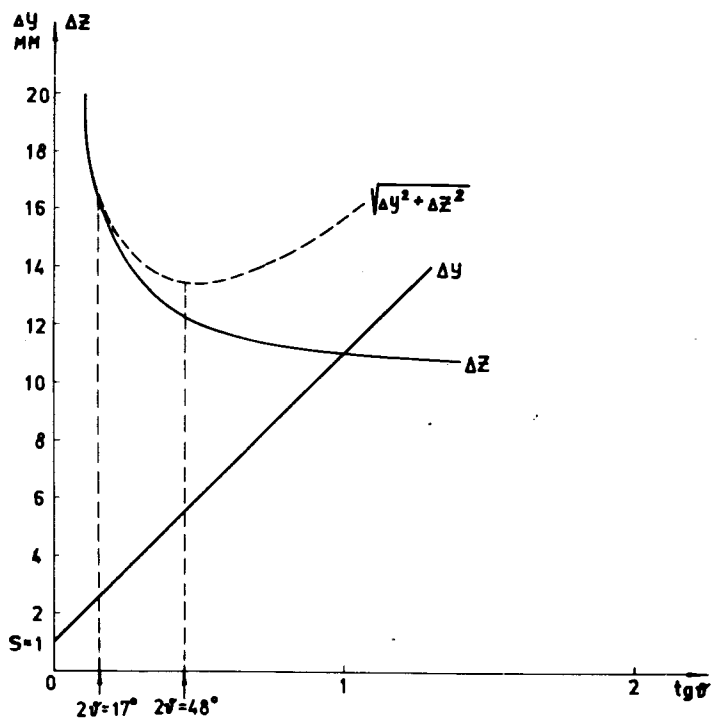


Рис. 5. Зависимости  $\Delta y$  и  $\Delta z$  от величины стереобазы.

шается в два раза по сравнению с величиной при  $2\theta = 48^\circ$ . Кроме того, при уменьшении стереоугла сокращаются размеры мертвых зон на краях камеры и увеличивается прозрачность сеток.

### Приложение 2

#### Оптимизация оптики системы фотографирования стримерных камер

Оптимизация оптической системы установки РИСК должна наилучшим образом совместить два требования:

1/ получить максимальное разрешение в пространстве камеры;

2/ обеспечить возможно большую яркость изображения стримеров на пленке.

Опыт показывает, что для прямого фотографирования без дополнительного усиления светового потока главным является второе требование. В случае усиления светового потока от стримеров с помощью ЭОПов наибольшее значение приобретает требование 1/.

Ниже приводится перечень параметров, используемых при оптимизации.

Размеры чувствительного объема камеры:

$\Delta$  - полная глубина;

$r$  - радиус поля зрения.

Фотографируемые объекты - стримеры:

$s$  - диаметр стримеров.

Оптическая система характеризуется следующими параметрами:

$a$  - расстояние от средней плоскости камеры до передней главной плоскости объектива;

$f$  - фокусное расстояние объектива;

$D/f$  - относительное отверстие объектива;

$R$  - разрешение приемника /пленки

и т.д./.

В нашем случае  $a \approx f$ .

Эти данные определяют следующий набор переменных:

$$\beta = \frac{f}{a - f} = f, a - \quad /1/$$

уменьшение, даваемое оптической системой;

$$u \approx \frac{D}{2a} - \quad /2/$$

апертурный угол в пространстве предмета;

$$u' \approx \frac{D}{2f} = \frac{u}{\beta} - \quad /3/$$

апертурный угол в пространстве изображения;

$$w \approx \frac{r}{a} = \frac{\beta r}{f} \approx w' - \quad /4/$$

угол поля зрения.

## А. Оптимизация системы прямого фотографирования

В случае прямого фотографирования свет от стримера, испущенный в телесном угле  $\sim u^2$ , будет освещать на пленке кружок рассеяния диаметром  $d'$ . Оптимальные условия для регистрации стримера на фотопленке будут достигаться при минимальном значении отношения  $d'/u$ . Кроме диаметра стримера для светосильных объективов, размер  $d'$  будет зависеть сложным образом от параметров  $u$ ,  $\beta$ ,  $w$  и  $\Delta$  из-за aberrаций объективов и дефокусировки. Для  $u' \ll 1$  и  $w \ll 1$  влияние aberrаций можно учесть, используя приближение третьего порядка<sup>3/</sup>. В таком подходе основными источниками уширения изображения являются:

1. Сферическая aberrация. Диаметр пятна, содержащего 70% энергии, равен:

$$d'_1 = \frac{1}{4} f u'^3 S_I. \quad /5/$$

2. Кривизна поля зрения, влияние которой без учета астигматизма сводится к дефокусировке

$$d'_4 = f w^2 u' S_{IV}. \quad /6/$$

3. Дефокусировка, обусловленная не равной нулю глубиной камеры

$$d'_0 = \Delta' u'; \quad \Delta' = \beta^2 \Delta. \quad /7/$$

Остальными источниками уширения - астигматизмом, комой и хроматическими aberrациями - в расчете пренебрегаем, поскольку для современных объективов они хорошо скорректированы. В формулах /5/ и /6/  $S_I$ ,  $S_{IV}$  суть коэффициенты Зейделя для случая бесконечно удаленного объекта /в нашем случае  $a \gg f$ /. Для аэрофото-съемочного объектива *Уран-27*  $S_I = S_{IV} = 0,26$ ; остальные коэффициенты на порядок меньше<sup>3/</sup>. Надо добавить, что для современных светосильных объективов приближения третьего порядка для описания aberrаций недостаточно. Влияние  $u'$  на сферические aberrации ( $d'_1$ )

и  $w'$  на  $d'_4$  переоценивается. Поэтому настоящий расчет следует рассматривать только как оценку нижнего граничного значения для  $u'$  и верхнего граничного значения для  $a$ .

Учитывая размер стримера, а также вклады /5/ ÷ /7/, получим для диаметра изображения следующее выражение:

$$d' = \beta s + \frac{1}{4} f u'^3 S_I + f w'^2 u' S_{IV} + \beta^2 \Delta u'. \quad /8/$$

Поскольку световой поток от стримера  $\sim u^2$ , оптимизация системы прямого фотографирования состоит в нахождении минимума отношения  $d'/u$ . Используя /8/ и /1/, /3/, /4/, получим:

$$\frac{d'}{u} = \frac{s}{u'} + \frac{1}{4} s u'^2 S_I + \frac{r^2}{a} S_{IV} + \beta \Delta. \quad /9/$$

Из соотношения /9/ следует существование оптимума по переменным  $u'$  и  $a$ , не зависящего от  $\beta$ :

$$a = \frac{2r}{u'} \sqrt{\frac{S_{IV}}{S_I}}, \quad /10/$$

$$u'^3 = \frac{2s}{a S_I}. \quad /11/$$

Отсюда

$$u'^2 = \frac{s}{r \sqrt{S_I} \cdot S_{IV}}, \quad /12/$$

$$a = 2 \frac{r^{3/2} \cdot S_{IV}^{3/4}}{s^{1/2} \cdot S_I^{1/4}}. \quad /13/$$

В предельном случае для стримера диаметра  $s = 1$  мм на краю поля зрения /  $r = 90$  см / получим

$$u' \geq 1/15,$$

$$a \leq 27 \text{ м.}$$

Поскольку расстояние  $a = 5$  м уже выбрано и по техническим причинам не может быть сделано большим, получим по формуле /11/ нижнее граничное значение апертуры:

$$u' \geq 1/8,7.$$

Объектив Уран-27 с максимальным относительным отверстием  $D/f \approx 2u' = 1/2,5$  удовлетворяет этому условию.

Из соотношения /9/ следует, что оптимальное значение уменьшения  $\beta$  равно нулю. Однако это недопустимо с точки зрения требуемого разрешения в камере /условие /1//, поскольку при  $\beta \rightarrow 0$  разрешающая способность приемника становится доминирующим фактором. Разумно требовать, чтобы

$$\beta \Delta \lesssim \frac{1}{2} \left( \frac{s}{u'} + \frac{1}{4} a u'^2 S_I + \frac{r^2}{a} S_{IV} \right). \quad /14/$$

С учетом разрешения приемника изображению на пленке будет соответствовать объект в камере диаметром

$$d = s + \frac{1}{4} a u'^3 S_I + \frac{r^2}{a} u' S_{IV} + \beta \Delta u' + \frac{1}{\beta R} \quad /15/$$

/слагаемое  $\frac{1}{\beta R}$  учитывает разрешение приемника/. Отсюда следует, что  $d$  будет минимально при

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\Delta R u'}}. \quad /16/$$

Условие /16/, однако, означает, что  $d$  имеет минимум только на верхней и нижней границах фотографируемого объема, в то время как разрешение в середине ухудшается. Кроме того, выигрыш, полученный при выполнении условия /16/, мал, если условие /14/ удовлетворяется, т.е. дефокусировка меньше продольных aberrаций. Поэтому практически для выбора  $\beta$  достаточно выполнения условия /14/ и неравенства

$$\beta > \frac{1}{\sqrt{\Delta R u'}}. \quad /16a/$$

В нашем случае  $R = 30$  л/мм,  $\Delta = 80$  см и  $u' = 1/8$ , так что оценка /16a/ дает  $\beta > 1/55$ . С другой стороны, в соотношении /14/ правая сторона равна  $\sim 3$  см, откуда  $\beta < 1/30$ . Таким образом, выбранное нами уменьшение  $\beta = 1/50$  удовлетворяет обеим границам /14 и 16a/.

## Б. Фотографирование с помощью ЭОПов

В этом случае оптимизация производится с помощью условия /1/. При этом относительное отверстие уменьшается и разрешение объектива в пределе определяется только дифракцией света. Расчет в рамках волновой оптики<sup>/3/</sup> показывает, что диаметр изображения точки, содержащего по условию 84% световой энергии, равен:

$$d' = \frac{\lambda}{u'} \quad / \quad \lambda = 0,6 \text{ мкм} - \text{длина волны света}/, \quad /17/$$

а протяженность области резкого изображения по оси из условия сохранения в изображении  $\geq 72\%$  световой энергии суть

$$\Delta' = \frac{\lambda}{u'^2}. \quad /18/$$

Тогда требуемая глубина резкости в камере  $\Delta = \beta^2 \Delta'$  определяет предельные значения параметров  $u'$  и  $d'$  следующим образом:

$$u' = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{\lambda}{\Delta}}, \quad /19/$$

$$d' = \beta \sqrt{\lambda \cdot \Delta}. \quad /20/$$

Соответствующие значения в пространстве предмета независимы от  $\beta$  и равны:

$$u = \sqrt{\frac{\lambda}{\Delta}}, \quad /21/$$

$$d = \sqrt{\lambda \cdot \Delta}. \quad /22/$$

$\beta$  можно определить, исходя из условия /2/, поскольку яркость пропорциональна

$$\frac{u^2}{d'^2} = \frac{1}{\beta^2 \Delta^2}, \quad /23/$$

т.е.  $\beta$  следует брать как можно более малым. С другой стороны, чтобы не потерять разрешение, должно быть

$$\beta(s+d) \geq \frac{1}{R}. \quad /24/$$

Отсюда следует

$$\beta \geq \frac{1}{R(s+\sqrt{\lambda \cdot \Delta})}, \quad /25/$$

где для  $R$  и  $s$  используются минимальные значения:  $R = 20$  л/мм и  $s = 1$  мм. При  $d = \sqrt{\lambda \cdot \Delta} = 0,7$  мм для оптимального уменьшения получим оценку  $\beta \geq 1/37$ . Выбранные нами значения  $\beta = 1/40$  для варианта с электромагнитными ЭОПами и  $\beta = 1/50$  для варианта с электростатическими ЭОПами по техническим причинам /фиксированный размер фотокатодов ЭОПов, ограниченное число ЭОПов/ оказались меньше полученной выше оценки. Однако в пределах точности наших оценок это различие несущественно.

#### Литература

1. В.А. Давиденко, Б.А. Долгошеин, В.К. Семенов, С.В. Соменов. ЖЭТФ, 55, 426 /1968/.
2. V. Eckart. DESY 70/60; Lett. Nuovo Sim., 1, 997 (1971).
3. Д.С. Волосов. Фотографическая оптика. Искусство, Москва, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 января 1975 года.