

3480

Эн. Чит. зала

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P11 - 3480



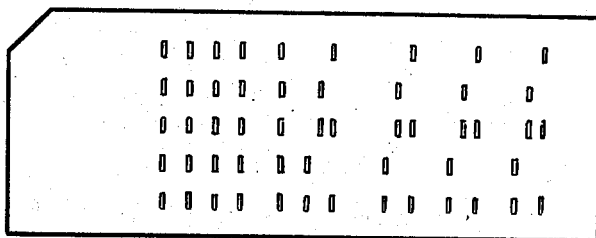
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ  
И АВТОМАТИЗАЦИИ

Н.Н. Говорун, Г.А. Емельяненко, Н.Ф. Маркова,  
В.И. Мороз, В.И. Никитина, И.С. Саитов,  
А.П. Стельмах, Г.Н. Тентюкова

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ  
ДЛЯ БОЛЬШИХ КАМЕР

(вариант "1-6")

1967.



**Объединенный институт  
ядерных исследований  
ЛВТА**

**Н.Н. Говорун, Г.А. Емельяненко, Н.Ф. Маркова,  
В.И. Мороз, В.И. Никитина, И.С. Сайтов,  
А.П. Стельмах, Г.Н. Тентюкова**

**ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ  
ДЛЯ БОЛЬШИХ КАМЕР**

(вариант "1-6")

## О Г Л А В Л Е Н И Е :

Стр.

§ 1. Назначение программы . . . . .	5
§ 2. Схема программы . . . . .	8
Блок 1. Переход в систему координат, связанную с оптическими осями (оптическую систему). Компенсация деформации пленки . . . . .	8
Блок 2. Восстановление пространственных координат точек трека . . . . .	10
Блок 3. Вычисление магнитного поля в точках камеры . . . . .	11
Блок 4. Определение параметров трека в нулевом приближении . . . . .	12
Блок 5. Точное определение параметров трека . . . . .	15
§ 3. Проверка программы . . . . .	18

## § I. Назначение программы

Проведение физических экспериментов методикой пузырьковых камер требует выполнения большого объема расчетов по обработке измерений с пленки. Эти расчеты удобно разбить на 3 этапа:

1. Геометрическая реконструкция события.
2. Идентификация каналов реакций.
3. Накопления и статистическая обработка идентифицированных событий.

Указанная обработка реализована в ОИЯИ в виде системы программ, составленных для ЭВМ М-20, специально соединенной для этого с машиной МИНСК-2, которая используется для приема и накопления на магнитной ленте информации с измерительных полуавтоматов. Сама обработка ведется на машинах М-20 и БЭСМ-3М.

В настоящее время завершается создание третьего поколения системы программ обработки <sup>х/</sup>.

Работа первой из этих программ - программы геометрической реконструкции - кратко излагается в настоящем докладе.

Созданная в ЛВТА ОИЯИ новая программа геометрической реконструкции треков для пузырьковых камер учитывает неоднородность магнитного поля в камере, ионизационные потери, многократное рассеяние и тормозное излучение /последнее - для электронов и позитронов/.

---

<sup>х/</sup> Описание первой системы обработки экспериментальных данных изложено в специальном сборнике [1], изданном в 1961 г.

Второе поколение нашей системы обработки данных с пузырьковых камер описано в серии препринтов [2-11], изданных в 1963-1966 г.г.

Программа рассчитана на обработку материалов с  
2-метровой пропановой камеры,  
1-метровой пропановой камеры,  
1-метровой жидководородной камеры  
и может быть легко настроена для любой другой камеры, близкой к указанным по конструкции.

С учётом особенностей конструкций пузырьковых камер нашего Института, в программе геометрической реконструкции считается, что оптические оси стереофотокамер параллельны между собой и перпендикулярны поверхностям раздела оптических сред. Отклонения от перпендикулярности осей средам считаются малыми и учитываются при введении реперных крестов. /Программа рассчитана на число реперных крестов от 3 до 30/.

Учитывая, что камеры в ОИЯИ заполнены жидким водородом, пропаном и возможно заполнение их пропан-фреоновыми смесями, в алгоритме программы учтены как ионизационные потери, так и многократное рассеяние.

Измерения магнитного поля в больших камерах показали, что имеется заметная его неоднородность, доходящая до 20 %; поэтому в программе учитывается реальное поле в камере, которое задается в виде таблицы для трех компонент поля, с возможностью учета симметрии поля.

Для определения параметров трека строится функционал  $\chi^2$ , учитывающий матрицу многократного рассеяния. В функционал входит рассчитанная траектория - интеграл уравнения Лоренца в реальном магнитном поле с учетом потерь. Хороший выбор начального приближения позволяет ограничиться только одной итерацией по Ньютону при окончательном определении параметров, обращающих в минимум  $\chi^2$ .

Программа рассчитана на обработку событий с числом треков не более 15, сфотографированных стереофотоаппаратом с числом объективов не более 6.

Для удобства физиков топология события /число  $\nu^0$  частиц,  $\gamma$  -квантов, остановок частиц и т.д./ задается в виде, принятом в Дубне во всех ранее действовавших геометрических программах.

Для экономии времени на вычислительной машине и удобства работы, программа написана блоками в машинном коде в системе ИС-2 для машин М-20, БЭСМ-3М, БЭСМ-4.

Настройка программы для обработки материала с определенной камеры осуществляется введением специальной таблицы констант.

Программа построена так, что ее легко использовать в работе *on-line* измерительных полуавтоматов ПУОС с ЭВМ БЭСМ-3М или БЭСМ-4.

Программа составлена группой сотрудников ЛВТА и ЛВЭ с участием математиков из Института Атомной физики в Алма-Ате.

Схема программы "I-6" представлена на рис. I.

Рассмотрим работу каждого из основных блоков программы геометрической реконструкции.

Блок № I

Переход в систему координат, связанную с оптическими осями /оптическую систему/. Компенсация деформации пленки

Переход в оптическую систему  $/x, y/$  от системы координат  $/\xi, \eta/$  измерительного прибора осуществляется по формулам поворота и сдвига с линейной деформацией по осям  $x$  и  $y$ .

$$x = K_x (\xi \cos \varphi - \eta \sin \varphi) + x_0$$

$$y = K_y (\xi \sin \varphi + \eta \cos \varphi) + y_0$$

Коэффициенты преобразования

$K_x$  } деформация пленки по осям  $x$  и  $y$ ,

$K_y$  }

$\varphi$  - угол поворота при переходе от системы координат измерительного прибора к оптической системе координат;

$x_0, y_0$  - сдвиг координат

определяются методом наименьших квадратов, используя измеренные координаты реперных крестов и их истинное положение в оптической системе координат.

Проведение измерения на пленках показали, что деформация вдоль и поперек рулона пленки различна, что и учтено введением двух разных коэффициентов.

Программа позволяет использовать в качестве реперных крестов как кресты, нанесенные внутри объема камеры, так и кресты на прижимном стекле фотоаппарата. Следует отметить, что использование реперных крестов внутри объема камеры является предпочтительным, т.к. при этом повышается точность восстановления пространственных координат.

В программе предусмотрена проверка качества измерения реперных крестов с тем, чтобы исключить ошибочное определение приведенных выше коэффициентов преобразования.

Подробное описание алгоритма этого блока дано в [12].



Восстановление пространственных координат точек трека

Восстановление пространственных координат точек, измеренных на треке, производится всегда по двум оптимальным / для данного трека / стереопроециям, которые определяются при просмотре.

Для восстановления пространственных координат соответствующих точек используются формулы

$$Z = \frac{B_n - B_L - (X_L \varphi_L - X_n \varphi_n)}{X_L \varphi_{1L} - X_n \varphi_{1n}}$$

$$X = Z X_L \varphi_{1L} + X_L \varphi_L + B_L$$

/2-1/

$$Y = \frac{Y_L + Y_n}{(Z \varphi_{1L} + \varphi_L)^{-1} + (Z \varphi_{1n} + \varphi_n)^{-1}}$$

которые получены из метода максимума правдоподобия .

Здесь приняты обозначения, которые ясны из рис. 2.

функции  $\varphi(z)$  и  $\varphi_r(z)$ , описывающие оптику, могут быть заданы в произвольном виде. Они могут быть получены или в результате изучения фотографий тест-объектов, или из какой-либо модели оптической системы.

Восстановление пространственных координат несоответствующих точек производится в два этапа:

1. Определяются на правом снимке координаты  $(X_n Y_n)$  квази-соответствующих точек, как это показано на рис. 3.
2. По формулам /2-1/ определяются пространственные координаты.

Указанный алгоритм используется с 1963 г. в массовом счете в Дубне при обработке материалов с пропановой и водородной камер.

Подробное описание алгоритма и программы дано в препринте [14].

### Блок № 3

#### Вычисления магнитного поля в точках камеры

Магнитное поле в больших камерах практически невозможно сделать постоянным по всему объему, поэтому в программу введен специальный блок, вычисляющий магнитное поле в точках трека. Исходные значения магнитного поля измеряются в точках  $\langle X, Y, Z \rangle$  и задаются для каждой точки в виде трех величин  $H_x, H_y, H_z$ .

Программа рассчитана не более чем на 320 точек; точность записи поля 1 гаусс.

Если магнитное поле имеет одну или две плоскости симметрии, то в программе предусмотрена возможность задать поле только в части камеры, а на остальной объем его распространить закон симметрии.

Магнитное поле в каждой точке трека вычисляется линейной интерполяцией, исходя из ближайших точек таблицы магнитного поля.

#### Блок № 4

##### Определение параметров трека в нулевом приближении

Для оптимального определения оценок параметров  $\rho, \beta, \operatorname{tg} \alpha$  частицы, которое производится в "Блоке № 5", необходимо получить возможно более точное значение этих параметров без больших затрат времени на ЭЕМ, что и выполняется в "блоке № 4".

Здесь и далее обозначено:

$\rho$  - импульс частицы в начальной точке,

$\beta$  - угол между проекцией вектора импульса на плоскость  $XOY$  и осью  $X$ ,

$\operatorname{tg} \alpha$  - тангенс угла между треком и плоскостью  $XOY$ .

Импульс определяется исходя из средней кривизны параболы, аппроксимирующей проекцию трека, с учетом ионизационных потерь и неоднородности магнитного поля, как это показано ниже.

Интегрируя уравнение движения в неоднородном магнитном поле с учетом торможения, мы получаем зависимость между углом поворота и плоской дугой в виде разложения

$$\beta = \beta' s + \frac{1}{2} \beta'' s^2 + \frac{1}{6} \beta''' s^3,$$

где производные от  $\beta$  по  $s$  /  $\beta', \beta'', \beta'''$  / получены из уравнения Лоренца и являются функциями от  $\rho, \rho', \vec{H}, \vec{H}'$ .

Траектория может быть записана в виде

$$Y(s) = \int_0^s \sin \beta ds$$
$$X(s) = \int_0^s \cos \beta ds.$$

Перейдя в систему координат рассчитанной траектории трека и аппроксимируя эту траекторию параболой вида

$$y = a(x - \frac{L}{2})^2 + c,$$

где  $L$  — расстояние между началом и концом траектории, получим из условия минимума функционала  $Q^2$

$$Q^2 = \int_0^{s_K} [y(s) - a(x(s) - \frac{L}{2})^2 - c]^2 ds$$

следующее выражение для  $a$ :

$$a = \left\{ \frac{1}{\beta'} - \frac{\beta''}{(\beta')^2} s_K + \left[ \frac{(\beta'')^2}{(\beta')^3} - \frac{6}{7} \frac{\beta'''}{(\beta')^2} - \frac{3}{56} \beta' \right] s_K^2 \right\}.$$

С другой стороны, аппроксимируя методом наименьших квадратов измеренные точки такой же параболой в системе координат трека, получим:

$$a_3 = \frac{(N+1) \sum_{i=0}^N y_i (x_i - \frac{L}{2})^2 - \sum y_i \sum (x_i - \frac{L}{2})^2}{(N+1) \sum_{i=0}^N (x_i - \frac{L}{2})^4 - \left[ \sum (x_i - \frac{L}{2})^2 \right]^2}.$$

Приравнявая  $a = a_3$ , получим

$$a_3 = a = F(\rho, \rho', \vec{H}, \vec{H}', s_K).$$

Разрешая это выражение относительно  $\rho$ , будем иметь

$$\rho = \rho_3 + \left[ \frac{0,15}{\cos^2 \alpha} (H'R_3 + \frac{1}{\cos \alpha} \frac{BD}{H} + 2B \sin \alpha) - \frac{1}{2 \cos \alpha} \left( \frac{d\rho}{ds} \right) \right] s_K +$$

$$+ \frac{0,3}{7 \cos^2 \alpha} \left[ \frac{R_3}{\cos \alpha} H'' - \frac{10}{3} \frac{d^2 \rho}{ds^2} + 3 \operatorname{tg} \alpha \beta' - \frac{2 \sin \alpha}{R_3} D \right]$$

$$+ \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \frac{BH'}{H} + \frac{1}{\cos^2 \alpha} \frac{B'D}{H} + \frac{2}{\cos^2 \alpha} \frac{BD'}{H} + \frac{3}{8} \frac{\cos \alpha}{R_3} H] s^2,$$

где

$$P_3 = \frac{0,3R_3}{\cos \alpha}$$

$$R_3 = \frac{1}{2a_3}$$

$$H = (H_x \cos \beta + H_y \sin \beta) \operatorname{tg} \alpha + H_2$$

$$H' = \left[ \left( \frac{d}{ds} H_x \cos \beta + \frac{d}{ds} H_y \sin \beta \right) \right] \operatorname{tg} \alpha - \frac{dH_2}{ds}$$

$$B = H_y \cos \beta - H_x \sin \beta$$

$$B' = \left( \frac{d}{ds} H_y \right) \cos \beta - \left( \frac{d}{ds} H_x \right) \sin \beta$$

$$D = H_x \cos \beta + H_y \sin \beta$$

$$D' = \left( \frac{d}{ds} H_x \right) \cos \beta + \left( \frac{d}{ds} H_y \right) \sin \beta.$$

Указанная формула позволяет определить  $P$  с систематической ошибкой, не превышающей 2 % в самых неблагоприятных случаях.

$\operatorname{tg} \alpha$  определяется методом наименьших квадратов из условия аппроксимации измеренных точек на плоскости  $(z, s)$  прямой вида  $z = z_0 + s (\operatorname{tg} \alpha)$ .

$\beta$  в системе трека определяются по формуле

$$\beta = -\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{L}{2(R_3 + c)}.$$

Подробное изложение алгоритма этого блока дано в препринте [15].

Точное определение параметров трека

уравнение Лоренца в тормозящей среде можно записать в виде

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{e}{c} [\vec{v}\vec{H}] + \frac{\vec{P}}{P} \frac{dP}{dt}.$$

Перейдя к переменным  $P, \alpha, \beta, s$ , будем иметь:

$$\frac{d\alpha}{ds} = \frac{e}{pc} (H_y \cos\beta - H_x \sin\beta)$$

$$\frac{d\beta}{ds} = \frac{e}{pc} [-H_z + (H_x \cos\beta + H_y \sin\beta) \operatorname{tg}\alpha].$$

интегрируя эти уравнения в реальном магнитном поле с начальными значениями параметров

$$P_{\text{нал}} = \hat{P} + \Delta P$$

$$\beta_{\text{нал}} = \hat{\beta} + \Delta\beta$$

$$(\operatorname{tg}\alpha)_{\text{нал}} = \operatorname{tg}\hat{\alpha} + \Delta\operatorname{tg}\alpha$$

$$y_{\text{нал}} = \hat{y} + \Delta y$$

$$z_{\text{нал}} = \hat{z} + \Delta z$$

и удерживая только линейные члены по искомым поправкам  $\Delta P, \Delta\beta, \Delta\operatorname{tg}\alpha, \Delta y, \Delta z$ ,

будем иметь следующие выражения для проекций траектории на плоскость

XOY

$$y_{(s)} = y_0 + y_{(s)} \Big|_{\beta_0, P_0, y_0}^{\wedge \wedge \wedge} + \frac{\partial y}{\partial \beta} \Big|_{\beta_0, P_0, y_0}^{\wedge \wedge \wedge} \Delta\beta + \frac{\partial y}{\partial P} \Big|_{\beta_0, P_0, y_0}^{\wedge \wedge \wedge} \Delta P + \Delta y_0.$$

и на плоскость  $Z\beta$

$$Z(s) = Z_0 + \Delta Z_0 + Z(s) \Big|_{\alpha_0, \hat{\rho}_0, \hat{z}_0} + \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha_0, \hat{\rho}_0, \hat{z}_0} \Delta \alpha,$$

где

$\left. \begin{matrix} y_0, y \\ z_0, z \end{matrix} \right\}$  оптимальная оценка и экспериментально измеренные координаты I-ой точки трека.

Искомые поправки определяются из условия минимума функционалов

$$\chi_{xy}^2 = (\bar{y} - \bar{y}_0)(G + D_y E)^{-1}(\bar{y} - \bar{y}_0)$$

$$\chi_z^2 = (\bar{z} - \bar{z}_0)(G + D_z E)^{-1}(\bar{z} - \bar{z}_0),$$

где

$G$  - матрица многократного рассеяния,

$D_y$  - дисперсии измерительных ошибок координат,

$\bar{X}, \bar{Z}$  - векторы, определяющие точки теоретич. кривой,

$\bar{X}_0, \bar{Z}_0$  - векторы, определяющие точки измер. кривой.

Максимальная систематическая ошибка указанной процедуры, возникающая из-за замены при вычислениях интегралов суммами и других упрощающих вычисления приближений, составляет не более 0,1 % от номинальной величины импульса.

Параметры трека определяются для массы той частицы, которую указал физик при просмотре. Если идентификация не указана, то счет ведется в предположении 3-х масс -  $P, \pi, K$ .

Для обработки очень коротких или идущих под очень большим углом к плоскости  $XOY$  треков имеется простой алгоритм. Направление трека определяется по крайним точкам, а импульс, если частица остановилась, — по пробегу. Для останавливающихся в камере достаточно длинных треков импульс определяется по пробегу, а углы — по уже изложенной процедуре при фиксированном импульсе.

Определенный блок в программе предназначен для обработки электрона. В нем осуществлен алгоритм, ранее разработанный Лабораторией ядерных проблем и ЛВТА для 1-метровой пропановой камеры.

Этот алгоритм описан в препринте [16].



### § 3 Проверка программы

Для проверки программы геометрической реконструкции была составлена специальная программа-генератор фиктивных треков. Исходными данными для этой программы-генератора являются:

1. Вектор-импульс частицы в начальной точке.
2. Координаты начальной точки.
3. Магнитное поле в камере.
4. Характеристика среды - тормозная способность.
5. Характеристики оптической системы.
6. Дисперсии измерительных ошибок и многократного рассеяния.

Т.о. мы можем построить трек любой длины и любого направления без учета или с учетом измерительных ошибок и многократного рассеяния, вводимых методом Монте-Карло.

Первая серия проверок была проведена на треках, сгенерированных без учета измерительных ошибок и многократного рассеяния.

Эта проверка показала, что:

1. Начальное приближение восстанавливает импульсы с ошибкой, не превышающей 2 % в наиболее неблагоприятных случаях.
2. Алгоритм, использованный в блоке точного определения параметров трека, вполне линеен по  $\alpha$  и  $\beta$  в широких пределах / 0,1 радиана / даже в условиях неоднородного магнитного поля / до 25 % / и потерь импульса частицы / до 50 % /. По импульсу алгоритм линеен в области не менее 2 % от номинальной величины при указанных выше неоднородности магнитного поля и величине потерь.

Абсолютное значение импульса восстанавливается алгоритмом с точностью не хуже чем 0,1 %.

Вторая серия проверок - статистическое испытание.

На 76 сгенерированных в пропане треках метровой длины при  $P = 800 \frac{\text{Нзл}}{\text{с}}$  с учетом измерительных ошибок и многократного рассеяния было определено среднее значение восстановленного импульса, которое оказалось равным

$$799,8 \pm 1,8$$

что говорит об устойчивости алгоритма в условиях помех.

Третья серия испытаний. Совместная работа блоков 4 и 5.

1. Были сгенерированы треки протонов с импульсами 800, 1500 и 3000  $\frac{\text{Нзл}}{\text{с}}$  в пропановой камере с учетом ошибок по 16 треков на каждый импульс /всего 48/, которые обсчитывались по программе нулевого приближения /Блок № 4/ и далее по точному алгоритму /Блок № 5/.

Во всех случаях разница между параметрами, определенными в нулевом приближении и результатами точного алгоритма не выходила из области линейности точного алгоритма.

2. Проводилась проверка средних значений величин  $\chi^2_{xy}$  и  $\chi^2_z$ , которые оказались равными своим теоретическим значениям.

Мы считаем, однако, что проверку программы следует продолжить, и количество тестовых треков должно быть доведено до 1000, как это было сделано Солмитцем при пуске программы геометрической реконструкции для группы Альвареца.

Т.к. алгоритмы, заложенные в первых двух блоках, ранее использовались в массовом счете, то нет необходимости подвергать их столь тщательной проверке. Однако следует учитывать, что точность восстановленных координат, определяющая в конечном счете точность измерений в камере, определяется не только качеством алгоритмов, но и точностью, с какой найдены константы оптической системы стереофотоаппарат - камера.

## Л И Т Е Р А Т У Р А :

1. Е.Н.Кладнищкая. Препринт ОИАИ, 796, Дубна, 1961.
2. В.Ф.Вишневецкий и др. Препринт ОИАИ, Р-1468, Дубна, 1963.
3. О.В.Благонравова и др. Препринт ОИАИ, 2005, Дубна, 1965.
4. Н.А.Буздавина и др. Препринт ОИАИ, 2095, Дубна, 1965.
5. В.Г.Гришин и др. Препринт ОИАИ, Р-2277, Дубна, 1965.
6. Н.Н.Говорун и др. Препринт ОИАИ, № 1102, 1962.
7. Р.М.Джабар-Заде и др. Препринт ОИАИ, № 1957, 1965.
8. З.М.Иванченко и др. Препринт ОИАИ, № Р-2399, 1965.
9. А.Д.Макаренкова и др. Препринт ОИАИ, № 2917, 1966.
10. А.Ф. Лукьянцев и др. Препринт ОИАИ, № Р-1982, 1965.
11. О.В.Благонравова и др. Препринт ОИАИ, № 1959, 1965.
12. В.А.Загинайко, В.Н.Шигаев. Препринт ОИАИ, 2527, Дубна, 1965.
13. Н.Ф.Маркова, В.И.Мороз. Отчет ОИАИ, Б2-2918, Дубна, 1966.
14. И.М.Иванченко и др. Препринт ОИАИ, Р-2889, Дубна, 1966.
15. Г.А.Емельяненко и др. Препринт ОИАИ, Р-2829, Дубна, 1966.
16. Ю.А.Будагов и др. Препринт ОИАИ, 2668, Дубна, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 августа 1967 года.

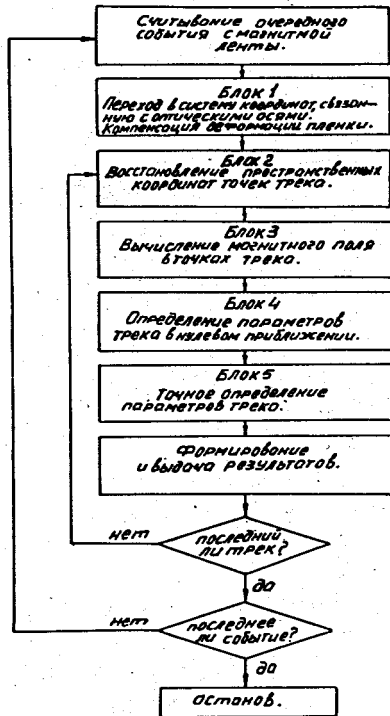
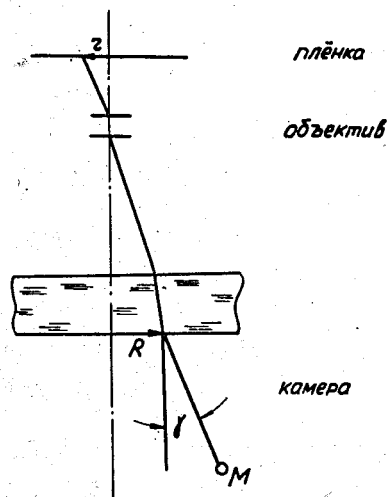


Схема программы геометрической реконструкции для больших камер (вариант 1-б)

Рис. 1



Проектирование пространственной точки  $M$  на кадр.

$$R(z) = z \varphi(z)$$

$$\operatorname{tg} \delta = z \varphi'(z)$$

Рис. 2

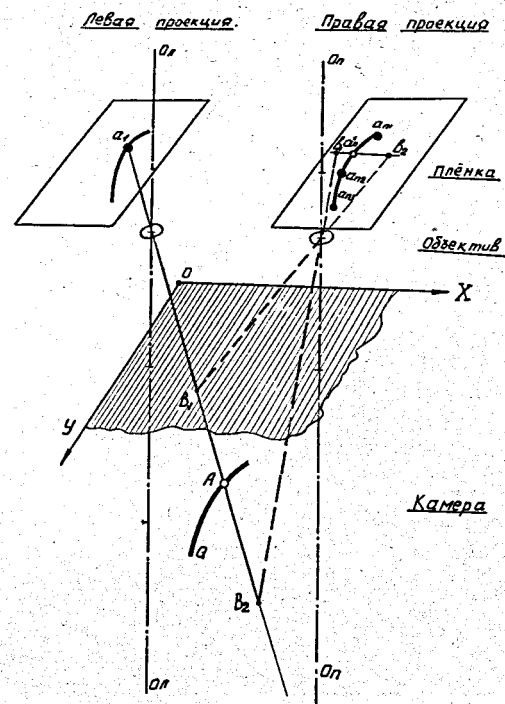


Рис. 3

Схема определения квазисоответствующей точки

- $O_L$  и  $O_P$  - оси левой и правой стереокамер
- $XOY$  - нижняя поверхность верхнего стекла камеры
- $a_L$  - измеренная точка на левой проекции трека  $Q$
- $a_{P1}, a_{P2}, a_{P3}$  - измеренные точки на правой проекции трека  $Q$
- $B_1, B_2$  - прямая, все точки которой проектируются в точку  $A_L$  на левой проекции
- $b_1, b_2$  - линия, являющаяся проекцией  $B_1, B_2$  на правый кадр; иначе, образ точки  $A_L$  на правом кадре
- $a'_P$  - точка, квазисоответствующая  $a_L$ ;  $a'_P$  лежит на пересечении  $b_1, b_2$  с проекцией трека, точнее, на пересечении  $b_1, b_2$  с параболой, аппроксимирующей точки  $a_{P1}, a_{P2}, a_{P3}$ .
- $A$  - пространственная точка на треке  $Q$ , которая проектируется в  $a_L$  и  $a'_P$ .  $a_L$  - измерено,  $a'_P$  - находится расчетом.