

В. П. Дроняев, В. П. Сурин

МЕТОДИКА ЮСТИРОВКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
СИСТЕМЫ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ БВК-205 ИТЭФ

Москва 1971 г.

А Н Н О Т А Ц И Я

В настоящей работе рассматриваются особенности фотографической системы пузырьковой камеры ЖВК-205, изложены требования, предъявляемые к юстировке и определению параметров системы фотографирования, описана методика юстировки и определения параметров этой системы.

A b s t r a c t

The paper considers the description of the photographing system of the 205 cm liquid hydrogen bubble chamber, gives the requirements of adjusting and determination of parameters of the photographing system, describes the methods of adjusting and determination of the parameters of this system.

Известно, что точность измерения импульсов и углов частиц, регистрируемых пузырьковыми камерами, определяет возможность выделения наблюдаемого эффекта даже в условиях удовлетворительной статистики. Одним из источников ошибок измерения параметров события является всевозможные погрешности системы фотографирования. Вопросам калибровки узлов системы фотографирования, определения ее параметров, оценки погрешностей фотографической системы, учета некоторых искажений, вносимых этой системой посвящено ряд работ [1,2,3,4]. Способы решения этих вопросов в какой-то мере связаны с особенностями конструкции пузырьковой камеры и фотографической системы, со способом обработки данных, получаемых на пузырьковой камере. Поэтому, переходя к изложению методики калибровки и определения параметров системы фотографирования 2-метровой КВК [5,6], имеет смысл кратко описать эту систему.

Стерефотоаппарат имеет три фотокамеры, расположенные на общей плите из нержавеющей стали. Расстояние между оптическими осями фотокамер основных стереопар равно $B = 480$ мм. Средний масштаб фотографирования $M = 0,1$. На рис. I изображена оптическая схема фотокамеры. В фотокамерах установлены объективы Руссар-плазмат с фокусным расстоянием $f = 200$ мм. Зеркало 2 располагается под углом 45° к оптической оси объектива. Наличие этих зеркал в отличие

от фотокамер без зеркал [7] позволяет с помощью юстировки восстанавливать параллельность оптических осей, которая может нарушаться при поворотах плиты фотоаппарата. В отличие от фотокамер, описанных в [7], в данных фотокамерах отсутствуют прижимные стеклянные плоскопараллельные пластины. Необходимая плоскостность пленки при фотографировании обеспечивается вакуумными прижимами.

Для обработки событий с КВК-205 предполагается использовать программу АСП [8], в которую внесены незначительные изменения (основное изменение - учет наклона иллюминатора камеры на $4^{\circ}30'$). В соответствии с требованиями этой программы производились юстировка фотографической системы и определение ее параметров. Требование параллельности поверхностей прижима пленки в случае фотокамер с зеркалом заменяется требованием параллельности оптических изображений прижимных рамок фотокамер в зеркалах. Фотокамера с зеркалом полностью эквивалентна фотокамере без него за исключением того, что при некоторых расчетах необходим учет замены правой системы координат на левую. В дальнейшем для простоты будет рассматриваться, где это возможно, фотокамера без зеркала. Прямую, проходящую через центр преломления перпендикулярно плоскости прижимной рамки, будем называть оптической осью фотокамеры. Точку пересечения оптической оси фотокамеры с плоскостью прижимной рамки будем называть главной точкой фотокамеры.

Была проведена оценка точности, с которой нужно выполнить юстировку узлов системы фотографирования и определить ее геометрические параметры. Приведем оценки допустимых погрешностей основных параметров системы.

Допустимая ошибка в определении главной точки фотокамеры

$$\Delta x = \frac{\Delta z B M}{2H z}; \quad \Delta z = \pm 5 \text{ мк}$$

Допустимая ошибка в определении фотограмметрического фокуса (т.е. расстояния между центром проекции и плоскостью прижима фотопленки)

$$\Delta R = \frac{z R}{H}; \quad \Delta R = \pm 15 \text{ мк}$$

Допустимая ошибка в определении расстояния между оптическими осями фотокамер

$$\Delta B = \frac{z B}{H}; \quad \Delta B = \pm 40 \text{ мк}$$

Допустимая непараллельность между поверхностью защитных стекол на крышке вакуумного кожуха и плоскостью прижимной рамки

$$\Delta \theta_1 \sim \frac{\Delta z}{t_1}; \quad \Delta \theta_1 = \pm 20'$$

Допустимая ошибка в определении угла наклона иллюминатора камеры

$$\Delta \theta_2 \sim \frac{\Delta z}{t_2}; \quad \Delta \theta_2 = \pm 4'$$

В приведенных формулах приняты следующие обозначения:

$f = 220 \text{ мм}$ — фотограмметрический фокус;

$B = 480 \text{ мм}$ — расстояние между оптическими осями фотокамер;

$H = 400 \text{ мм}$ — глубина рабочей области камеры;

$M = 0,1$ — масштаб фотографирования;

$t_1 = 30 \text{ мм}$ — толщина защитных стекол;

$t_2 = 150 \text{ мм}$ — толщина иллюминатора;

$\Delta z = 0,08 \text{ мм}$ — допустимая погрешность в определении длины вертикального отрезка в камере.

Юстировка стереофотоаппарата начинается с выставления передних главных плоскостей объективов всех фотокамер в одной плоскости. Для этой цели были измерены расстояния от переднего и заднего фокусов объективов до их посадочных поверхностей с точностью 0,1 мм. Далее проводилась фокусировка фотокамер на такую плоскость в камере, чтобы расфокусировка изображений точек на дне камеры и нижней стороне иллюминатора была одинакова. Расстояние до этой плоскости вычисляется по формуле

$$Z = \frac{2 z_1 z_2}{z_1 + z_2}$$

где z_1 и z_2 - соответственно расстояния по оси Z до нижней поверхности иллюминатора и до дна камеры. Расстояние, на которое нужно сфокусировать фотокамеры на воздухе, нужно определять с учетом всех сред камеры. Поэтому для вычисления z_1 и z_2 брались выражения

$$z_1 = d_1 + d_2 \frac{1}{n_2}$$

$$z_2 = d_1 + d_2 \frac{1}{n_2} + H \frac{1}{n_3}$$

где d_1 - расстояние от объективов до иллюминаторов;
 d_2 - толщина иллюминатора; H - глубина камеры;
 n_2 и n_3 - показатели преломления стекла и водорода соответственно.

Фокусировка производилась параллельным перемещением зеркала. Резкость изображения в плоскости прижимной рамки контролировалась с помощью микроскопа.

Чтобы выставить изображения поверхностей прижимных рамок в зеркалах в параллельных плоскостях, снимается объектив, к прижимной рамке прикладывается плоско-параллельная

оптическая стеклянная пластина и перпендикулярно ее поверхности выставляется автоколлиматор АКГ-250. Поворотом зеркала получается совмещение в автоколлиматоре двух перекрестий, соответствующих отражениям от стеклянной пластины и от зеркала, установленного горизонтально по уровню на расстоянии от объектива

$$d = \frac{z+f}{2}$$

где z - расстояние съемки, при котором получается максимальная резкость изображения; $f = 200$ мм - фокусное расстояние объектива. Выбор расстояния d будет ясен из дальнейшего изложения. Сниманная операция выполняется последовательно для каждой фотокамеры, взаимная параллельность изображений прижимных рамок в поворотном зеркале достигается за счет того, что выставляются относительно в взаимнопараллельных плоскостях.

Существует ряд способов для определения положения главной точки фотокамеры. Автоколлимационный способ с компенсирующей пластиной, предложенный в [9], непригоден для данных фотокамер по конструктивным соображениям. Метод с отвесами, описанный в [10], дает ошибку в определении положения главной точки 20-30 мк. Вообще говоря, положение главной точки можно определить с помощью фотографирования реперных меток, но точность такого способа также невелика. В данной работе определение положения главной точки фотокамеры основывается на ранее предложенном авторами этой статьи методе [11], который применен в данной работе для фотокамеры с зеркалом. Оптическая схема этой процедуры изображена на рис. 2. Световой пучок автоколи-

матора 4, прошедший через фотопластину 5, отражается от зеркала 2 и, пройдя через объектив 3, собирается в фокусе объектива, т.е. в фокусе будет находиться изображение А креста автоколлиматора. Мнимое изображение Б креста А в зеркале 6, расположенном на расстоянии d от объектива, будет находиться на расстоянии z , при котором получается максимальная резкость изображения, на оптической оси фотокамеры. Его изображение С объективом в плоскости фотопластины является главной точкой фотокамеры. Это уменьшенное в $\frac{f}{M} = 10$ раз изображение автоколлимационного креста экспонируется вместе с крестами внутренней ориентации на фотопластину. Вообще говоря, это изображение главной точки фотокамеры должно получаться на фоне первичного пучка автоколлиматора. Расчеты и опыт показали, что освещенность изображения главной точки значительно больше, чем даваемый первичным лучом и выделить его путем подбора экспозиции не представляет труда.

Для определения главной точки снимается стеклянная пластина, крепится объектив, к прижимной рамке прикладывается фотопластина с прозрачным эмульсионным слоем (например типа ВР) и экспонируются прижимные кресты и главная точка. Ширина перекрестий полученного изображения изображения главной точки ~ 4 мк. Координаты полученного изображения главной точки на фотопластине были измерены на микроскопе УИМ-2Г. Способ описанного способа определяется качеством изготовления оптических элементов: зеркала, плоскопараллельной пластины, точностью автоколлиматора, микроскопа и уровня. При использовании автоколлиматора АКГ-250 с ценой деления $2''$, уровня с ценой деления $4''$, зеркала и плоскопараллельной пластины с погрешностями $4''$

получается точность определения положения главной точки фотокамеры 2-3 мк.

Нужно сказать, что при определении геометрических констант стереофотоаппарата выбирались методы, давшие наибольшую точность для данной конструкции фотоаппарата. Если для определения положения главной точки наибольшую точность дает описанный выше способ, то для определения фотограмметрических фокусов фотокамер (т.е. Z - координат центров проекции в оптической системе координат), для определения X, Y - координат центров объективов в оптической системе координат (они непосредственно связаны с расстояниями между оптическими осями фотокамер) более целесообразен метод фотографирования реперных меток, различные варианты которого изложены в [2,3]. В данной работе были применены такие варианты метода фотографирования реперных меток, которые приводят к достаточно простым математическим выражением (например, системы линейных уравнений), чтобы составление программы для расчетов на ЭВМ не составляло особого труда.

Для определения фотограмметрических фокусов фотокамер достаточно сфотографировать плиту с реперными метками последовательно в двух положениях, при которых поверхность плиты перпендикулярна оптическим осям фотокамер и замерить расстояние между ними. Вычисление фотограмметрических фокусов производится по формуле

$$R = \frac{L M_1 M_2}{M_1 - M_2}$$

где L - расстояние между двумя положениями плиты;
 M_1, M_2 - масштабы фотографирования для этих положений.

Для определения X, Y - координат объективов и крестов внутреннего ориентирования в оптической системе координат

достаточно сфотографировать плиту с реперными метками в одной плоскости, перпендикулярной оптическим осям фотокамер. Выведем выражения для вычисления этих констант, для этого введем следующие системы координат

1) (x_0, y_0) - оптическая система координат; ее начало совмещено с главной точкой одной из фотокамер; плоскость (x_0, y_0) совпадает с плоскостью прижима фотопленки этой фотокамеры ось x_0 выбрана так, чтобы y_0 - координата главной точки другой фотокамеры была равна нулю, оси выбираются так, чтобы получилась левая прямоугольная система координат.

2) (x_l, y_l) - системы координат обмера фотопластин;
 l - номер фотокамеры.

3) (x'_l, y'_l) - системы координат, оси которых параллельны осям (x_l, y_l) , а начало совмещено с главной точкой соответствующей фотокамеры.

$$\begin{pmatrix} x'_l \\ y'_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_l^* \\ y_l^* \end{pmatrix}; \quad l = 1, 2, 3 \quad (1)$$

где x_l^*, y_l^* - координаты главной точки l -фотокамеры

4) (x''_l, y''_l) - системы координат, оси которых параллельны осям координат (x_l, y_l)

$$\begin{pmatrix} x''_l \\ y''_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_l & \sin \alpha_l \\ -\sin \alpha_l & \cos \alpha_l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_l \\ y'_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_l & \beta_l \\ -\beta_l & \delta_l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_l \\ y'_l \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$l = 2, 3$$

5) всем описанным системам координат соответствуют системы координат в плоскости плиты с реперами. Их будем обозначать (X_l, Y_l)

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \end{pmatrix} = \frac{1}{M_l} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix}; \quad l=1,2,3 \quad (3)$$

где M_l - масштаб фотографирования.

В плоскости плиты с реперными метками будем иметь картину, изображенную на рис. 3. Из рис. 3 видно, что (X_2, Y_2) , (X_3, Y_3) связаны с (X_1, Y_1) соотношением

$$\begin{pmatrix} X_l'' \\ Y_l'' \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_1' \\ Y_1' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}; \quad l=2,3 \quad (4)$$

где B_x, B_y - соответственно x, y - координаты объектов в системе координат (X_1', Y_1') .

Используя выражения (1), (2), (3), (4), нетрудно получить выражение, связывающее константы фотоаппарата с измеренными на фотопластине координатами изображений реперных точек

$$\frac{1}{M_l} \begin{pmatrix} \delta_l; \beta_l \\ -\beta_l; \delta_l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_l - x_l^* \\ y_l - y_l^* \end{pmatrix} - \frac{1}{M_l} \begin{pmatrix} x_l - x_l^* \\ y_l - y_l^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}; \quad l=2,3 \quad (5)$$

Полученное выражение пригодно для фотокамер без зеркал. Учет замены левой системы координат на правую для фотокамеры с зеркалом приводит к следующему выражению

$$\frac{1}{M_l} \begin{pmatrix} \delta_l; \beta_l \\ -\beta_l; \delta_l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_l - y_l^* \\ x_l^* - x_l \end{pmatrix} - \frac{1}{M_l} \begin{pmatrix} y_l - y_l^* \\ x_l^* - x_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}; \quad l=2,3 \quad (6)$$

Получено матричное уравнение относительно неизвестных B_x, B_y, δ, β . Ему соответствует система двух линейных уравнений относительно этих неизвестных. Для решения этой системы уравнений недостаточно использования одной реперной метки, а нужно использовать хотя бы две. Тогда получаются две системы линейных уравнений относительно неизвестных (B_x, δ, β) и (B_y, δ, β) соответственно. Для увеличения точности определения величин B_x, B_y, δ, β имеет смысл использовать большее количество реперных меток. Решение полученных в этом случае двух переопределенных систем линейных уравнений, проводится методом наименьших квадратов.

После того, как определены параметры фотоаппарата, можно вычислить параметры, используемые программой обработки АСП. Нахождение координат крестов внутреннего ориентирования в системе координат (x'_1, y'_1) производится по формуле (7)

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_u; B_u \\ -B_u; f_u \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_u - y_u^* \\ x_u^* - x_u \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}; \quad u=2,3 \quad (7)$$

где x_u, y_u - измеренные координаты крестов в (x, y) - системах.

Переход к оптической системе координат осуществляется поворотом от (x'_1, y'_1) к (x_0, y_0) на угол δ

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{B_x}{B_y}$$

Для выполнения описанной программы использовалась стеклянная плита размером $400 \times 600 \times 150$ мм³, специально изготовленная в ЛОМО. Плоскостность ее поверхности $\sim 5''$. На по-

верхности этой плиты нанесено 96 реперных крестов координаты которых замерялись на координатно-расточном станке с точностью $\pm 0,01$ мм . .

Для повышения точности определения параметров стереофотоаппарата плита с метками фотографировалась в трех параллельных плоскостях. Значения R, B_x, B_y, γ, B для всех фотокамер и стереопар были получены усреднением для всех плоскостей. Вычисления производились на ЭВМ М-20. Получены следующие значения параметров стереофотоаппарата

фотокамера № 1

$$R_1 = (221,83 \pm 0,04) \text{ мм}$$

фотокамера № 2

$$R_2 = (221,79 \pm 0,03) \text{ мм};$$

$$B_{y2} = -(0,31 \pm 0,03) \text{ мм}; \quad B_{x2} = -(479,88 \pm 0,02) \text{ мм}$$

$$B_2 = (-10,8 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}.$$

фотокамера № 3

$$R_3 = (221,21 \pm 0,04) \text{ мм}$$

$$B_{y3} = -(480,29 \pm 0,02) \text{ мм}; \quad B_{x3} = -(0,79 \pm 0,01) \text{ мм}$$

$$B_3 = (33,2 \pm 0,8) \cdot 10^{-4} \text{ мм}.$$

Параметры γ для всех фотокамер в пределах требуемой точности могут быть приняты равными 1. Параметры R_i определены менее точно по сравнению с другими параметрами. Это связано с недостаточно большим расстоянием между двумя положениями фотографируемой плиты с метками.

С целью проверки методики калировки и определения параметров стереофотоаппарата было проведено дополнительное фотографирование плиты с метками в двух положениях, при которых фотографируемая поверхность перпендикулярна оптическим осям фотокамер. Расстояние между этими положениями плиты

измерялось с помощью концевых мер с точностью $\pm 0,01$ мм и равнялось $412,8$ мм. Ошибки в определении координат фотографируемой точки за счет погрешностей в измерениях на фотопластине должны составлять для Z -координат $\pm 0,25$ мм, для X, Y -координат - $\pm 0,05$ мм. Вычисление с помощью полученных параметров Z -координат меток на фотографируемой поверхности, расстояния между двумя положениями плиты, расстояний между метками в одной плоскости, показало, что ошибка в определении Z -координаты составляет $\pm 0,1$ мм, ошибке в X, Y -координатах $\pm 0,02$ мм, т.е. эти ошибки по существу определяются ошибками измерений на фотопластине. Вычисления совпадают для разных стереопар с той же точностью.

После того, как стереофотоаппарат был отлажен, для пересчета топографии поля магнита камеры из системы координат измерения магнитного поля в оптическую систему координат были сфотографированы метки, положение которых известно в системе координат измерения магнитного поля.

Выставление люковых стекол на крышке кожуха параллельно плоскости прижима пленки и измерение угла наклона иллюминатора производилось при помощи автоколлиматора АКТ-250 и оптического квадранта КО-1М с точностью $\pm 30''$. Расчет и измерения показали, что при откачке кожуха и конуса и охлаждении камеры имеет место прогиб крышки кожуха $\sim 0,2$ мм. По этой причине выставление люковых стекол на крышке кожуха и постановка фотоаппарата на рабочее место производилось в то время, когда камера находится в рабочем режиме.

Для определения расстояния до иллюминатора в оптической системе координат фотографировались метки на верхней поверхности иллюминатора.

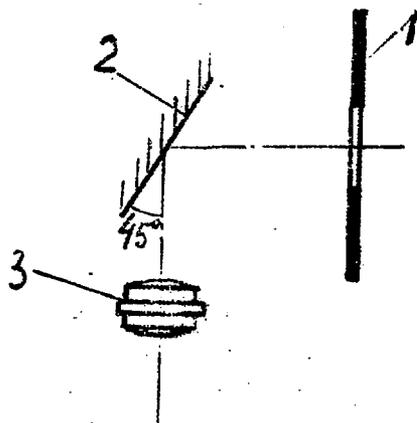
К настоящему времени с помощью описанной системы фотодирования отснято около 200 тысяч фотографий событий в жидководородной пузырьковой камере, в настоящий момент ведется работа по введению параметров камеры в программу обработки событий АСП и подготовка к обработке событий.

В заключение авторы выражают свою признательность заведующему лабораторией доктору физико-математических наук, профессору С.Я.Никитину за внимание к работе, В.Ф.Турову, взявшего на себя труд прочесть рукопись, коллективу механиков во главе с В.А.Бочаровым за помощь в работе, коллективу группы просмотра и обработки за проведение измерений.

Работа поступила
в печать 14.XII-70 г.

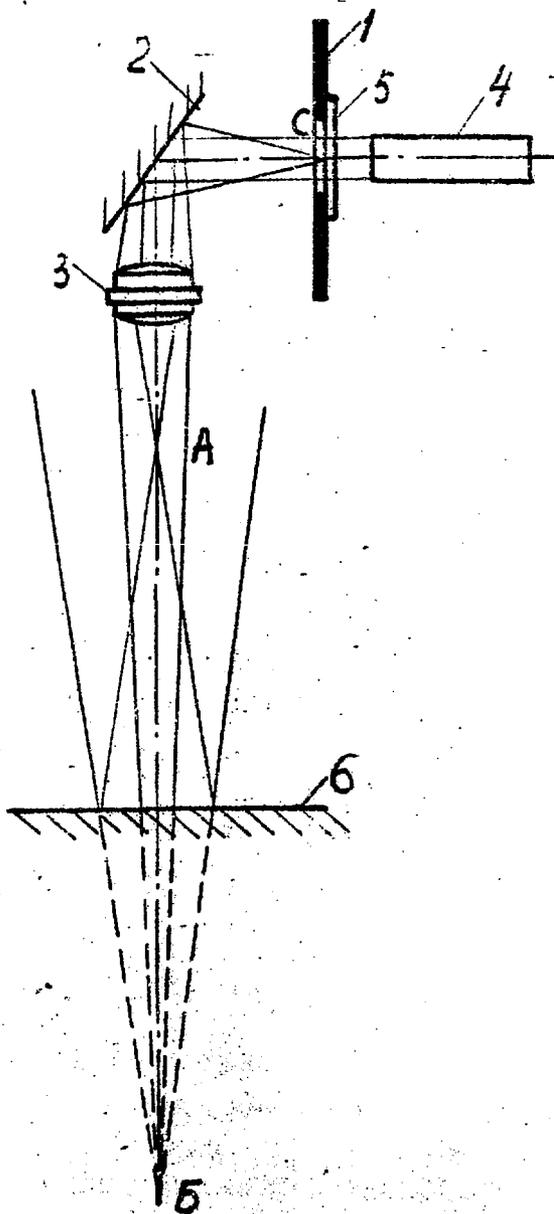
Л И Т Е Р А Т У Р А

- I. Е.М.Андреев и др. Препринт ОИЯИ, 1966 г.
№ Р-2727 Дубна.
2. *F. Veghacsom TC Program Upgrade CERN 1968*
3. В.Г.Иванов. Препринт ОИЯИ 1966 г. № 2646 Дубна
4. В.Г.Иванов ПТЭ № 6, 66, 1966 г.
5. Ю.Д.Алешин и др. Материалы рабочего совещания по технике пузырьковых камер стр. 39, 1969 г. № 13-4466 Дубна.
6. Ю.Д.Алешин и др. препринт ИТЭФ 1969 г. № 689 Москва.
7. Ю.А.Будагов и др. ПТЭ № 1,61,1967 .
8. Математическая лаборатория. Препринт ИТЭФ 1966 г. № 428 Москва.
9. Д.Т.Пуряев. Авторское свидетельство № 137284
Бюллетень № 3, 1959 г.
10. Диссертация Г.К.Клигер ИТЭФ, 1968 г.
11. В.П.Дроняев, В.П.Сурин. Авторское свидетельство
№ 258633 Бюллетень № 1, 1970 г.



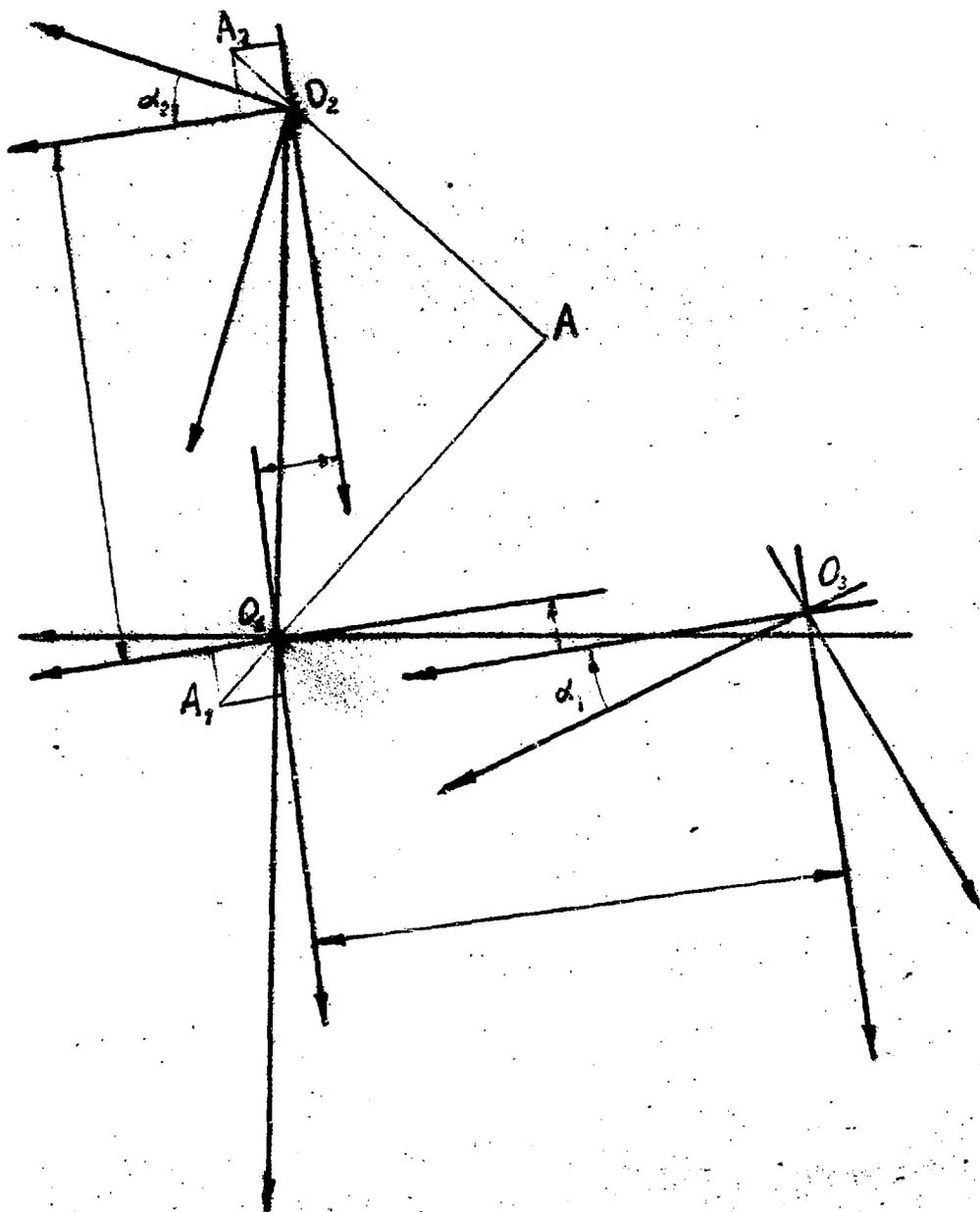
- 1. Прижимная рамка
- 2. Зеркало
- 3. Объектив

Рис.1. Оптическая схема фотокамеры.



- 1. Прижимная рамка
- 2. Зеркало
- 3. Объектив
- 4. Автоколлиматор
- 5. Фотопластина
- 6. Зеркало

Рис.2. Оптическая схема нахождения главной точки фотокамеры.



A — фотографируемая точка

O_1 O_2 O_3 — точки пересечения оптических осей фотокамер с фотографируемой поверхностью.

A_1, A_2 — изображения на пленке т. A .

Рис. 3. Взаимоположения введенных систем координат и фотографируемой точки в плоскости пленки.

Цена 7 коп.

Т-05167

ИТЭФ Заказ 2042 М-16 Тираж 220
Отг. за выпуск В. П. Суриц