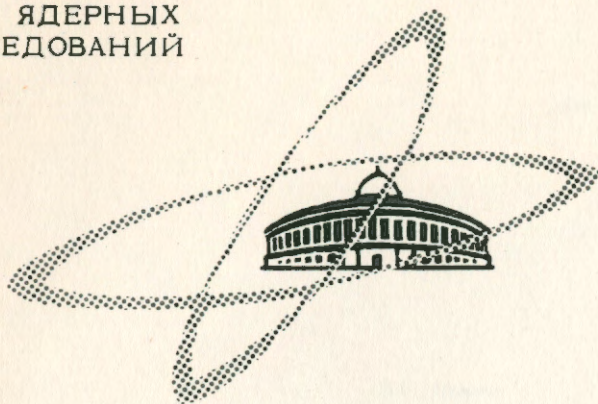


ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2846



В.Г. Иванов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ  
ПО РЕПЕРНЫМ ТОЧКАМ, НАХОДЯЩИМСЯ  
В ЕЕ РАБОЧЕМ ОБЪЕМЕ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1966

2646

В.Г. Иванов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ  
ПО РЕПЕРНЫМ ТОЧКАМ, НАХОДЯЩИМСЯ  
В ЕЕ РАБОЧЕМ ОБЪЕМЕ

Научно-техническая  
библиотека  
ОИЯИ

## 1. Введение

Фотографирование треков в пузырьковых камерах обычно производится через несколько сред с различными показателями преломления (воздух, стекла, рабочая жидкость и т.д.).

Для точного восстановления пространственной картины фотографируемых событий необходимо знать параметры оптической системы камеры с погрешностями, не большими 0,2-0,5 мм для толщины сред и  $1-3 \cdot 10^{-3}$  для показателей преломления.

Совершенно очевидно, что в большинстве случаев нельзя измерить толщины всех сред, через которые производится съемка с указанной выше точностью. Кроме того, значения показателей преломления ряда жидкостей, используемых для заполнения пузырьковых камер, известны с недостаточной точностью. Измерение же показателей преломления этих жидкостей в рабочих условиях требует создания сложной и громоздкой аппаратуры.

В связи с этими обстоятельствами представляется целесообразным рассмотреть методику определения параметров оптической системы камеры по реперным точкам, расположенным в ее объеме.

Такая методика была разработана для определения параметров оптической системы метровой пропановой пузырьковой камеры Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ<sup>1/</sup> и может использоваться для определения параметров любой трековой камеры, в которой оптические оси объективов перпендикулярны границам раздела сред, через которые производится фотографирование.

## 2. Методика вычисления пространственных координат

Фотографирование треков в метровой пропановой пузырьковой камере производится через воздух, воду, стекла и пропан объективами, оптические оси которых перпендикулярны поверхностям раздела этих сред (рис. 1).

Пространственные координаты треков вычисляются по формулам<sup>/2,3/</sup>

$$X = \frac{Bx}{x + x' \cdot y/y'} \quad (1)$$

$$Y = \frac{By}{x + x' \cdot y/y'} \quad (2)$$

$$Z = \left( \frac{B \cdot r}{x + x' \cdot y/y'} - d_0 \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{d_1 \cdot \sin \beta}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \beta}} - \frac{d_2 \cdot \sin \beta}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \beta}} \right) \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}}{\sin \beta} \quad (3)$$

Здесь  $x$ ,  $y$  и  $x'y'$  — координаты соответствующих точек на снимках стереопары;  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  — радиус-вектор изображения точки на снимке;  $d_0$  — расстояние от передней узловой точки объектива до верхнего стекла камеры;  $d_1$  — толщина стекла ( $d_1 = d'_1 + d''_1$ );  $d_2$  — толщина воды;  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n$  — показатели преломления стекла, воды и пропана;  $\beta$  — функция радиус-вектора  $r$ ;  $B$  — база съемки.

В связи с тем, что при обмере случаев ядерных взаимодействий на полуавтоматах /4/ на снимках стереопары измеряются, как правило, координаты несоответствующих точек, то для нахождения соответствующих точек используется очевидное равенство

$$Z = Z' \quad (4)$$

Выражение для  $Z'$  получается из (3) путем замены  $x \rightarrow x'$ ,  $y \rightarrow y'$ ,  $x' \rightarrow x$ ,  $y' \rightarrow y$ ,  $\beta(r) \rightarrow \beta(r')$ .

### 3. Влияние погрешностей параметров оптической системы камеры на точность вычисления пространственных координат

Для оценки влияния погрешностей в значениях параметров оптической системы камеры на точность вычисления пространственных координат рассмотрим выражение для  $\Delta Z$ , полученное путем дифференцирования 3.

$$\begin{aligned} \sum_1 |\Delta Z_1| = & \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}}{\sin \beta} \Delta R + \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}}{\cos \beta} \Delta d_0 + \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \beta}} \Delta d_1 + \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \beta}} \Delta d_2 + \\ & + \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}}{(n^2 - \sin^2 \beta)^{3/2}} d_1 \cdot n_1 \cdot \Delta n_1 + \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}}{(n_2^2 - \sin^2 \beta)^{3/2}} d_2 \cdot n_2 \Delta n_2 + Z \frac{n}{n^2 - \sin^2 \beta} \Delta n \end{aligned} \quad (5)$$

В таблице 1 приведены значения коэффициентов при  $\Delta d_0$ ,  $\Delta d_1$ ,  $\Delta d_2$ ,  $\Delta n_1$ ,  $\Delta n_2$ ,  $\Delta n$  и  $\Delta R$  для следующих значений параметров:  $d_0 = 20$  мм,  $d_1 = 120$  мм,  $d_2 = 875$  мм,  $Z = 185$  мм,  $n = 1,23$ ,  $n_1 = 1,5183$ ,  $n_2 = 1,3270$ .

Из таблицы 1 легко вычислить погрешности, с которыми нужно знать параметры оптической системы камеры при заданном значении  $\Delta Z$ . Так, например, если потребовать, чтобы при  $\beta = 20^\circ$  величина каждого слагаемого, входящего в выражение 5, не превышала 0,1 мм, то из таблицы 1 получаем следующие допустимые значения погрешностей:  $\Delta d_0 \leq 0,08$  мм;  $\Delta d_1 \leq 0,12$  мм;  $\Delta d_2 \leq 0,11$  мм;  $\Delta n_1 \leq 1,5 \cdot 10^{-3}$ ;  $\Delta n_2 \leq 1,10^{-3}$ ;  $\Delta n \leq 2 \cdot 10^{-4}$ .

В связи с тем, что в большинстве случаев такие параметры, как  $d_0$ ,  $d_2$  и  $n$ , нельзя измерить заранее с указанной выше точностью, рассмотрим методику их определения по координатам изображений реперных точек на снимках стереопары.

### 3. Вычисление параметров оптической системы камеры по координатам изображений реперных точек

Выход формул для вычисления параметров оптической системы камеры по координатам изображений реперных точек на снимках стереопары не представляет затруднений, если положение реперных точек в объеме камеры фиксировано.

Рассмотрим, например, реперные точки, нанесенные на поверхности верхнего стекла, отделяющего пропан от воды (рис. 1). В этом случае  $Z = Z' = 0$ ,  $d_1 = d'_1$  и из выражений (3) и (4) следует:

$$d_2 = R_0 \cdot \frac{\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \beta}}{\sin \beta}; \quad d'_2 = R'_0 \cdot \frac{\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \beta'}}{\sin \beta'} \quad (6)$$

Из равенства  $d_2 = d'_2$  получаем:

$$n_2 = \frac{(R_0^2 - R_0'^2) \cdot \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \beta'}{R_0^2 \cdot \sin^2 \beta' - R_0'^2 \sin^2 \beta} \quad (7)$$

Здесь

$$R_0 = \frac{B \cdot r}{x + x' \cdot y/y'} - d_0 \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{d_1 \cdot \sin \beta}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \beta}} \quad (8)$$

$$R'_0 = \frac{B \cdot r'}{x' + x' \cdot y'/y'} - d'_0 \cdot \operatorname{tg} \beta' - \frac{d_1 \cdot \sin \beta'}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \beta'}} \quad (8)$$

Показатель преломления рабочей жидкости  $n$  выражается через координаты изображений точки, расположенной в рабочем объеме камеры, следующей формулой:

$$n^2 = \frac{(R_1^2 - R'_1)^2 \cdot \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \beta'}{R_1^2 \cdot \sin^2 \beta' - R'^2 \cdot \sin^2 \beta} \quad (9)$$

где

$$R_1 = \frac{B \cdot r}{x + x' \cdot y'/y'} - d_0 \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{d_1 \cdot \sin \beta}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \beta}} - \frac{d_2 \cdot \sin \beta}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \beta}}$$

$$R'_1 = \frac{B \cdot r'}{x' + x' \cdot y'/y'} - d'_0 \cdot \operatorname{tg} \beta' - \frac{d_1 \cdot \sin \beta'}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \beta'}} - \frac{d_2 \cdot \sin \beta'}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \beta'}} \quad (10)$$

Толщину слоя воздуха  $d_0$  можно вычислить по формуле:

$$d_0 = \left( \frac{B \cdot r}{x + x' \cdot y'/y'} - \frac{d \cdot \sin \beta}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \beta}} - \frac{d \cdot \sin \beta}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \beta}} \right) \operatorname{ctg} \beta \quad (11)$$

где  $x$ ,  $y$ ,  $x'$  и  $y'$  — координаты изображений реперной точки, расположенной на поверхности рабочей жидкости ( $Z = 0$ ).

Таким образом, для вычисления параметров оптической системы камеры по реперным точкам необходимо, чтобы последние были расположены в трех различных горизонтальных плоскостях: на поверхности стекла ( $d'_1$ ), в плоскости  $Z = 0$  и в рабочем объеме камеры.

В таблице 2 приведены точности вычисления параметров по формулам (8)–(9) в зависимости от  $X$ -ых и  $Y$ -ых координат реперной точки и ошибок измерения ( $\Delta x$  и  $\Delta y$ ) координат соответствующих точек. Из таблицы 2 видно, что:

1. Ошибки в значениях параметров, обусловленные погрешностями метода вычислений (первые пять строк таблицы), малы и практически не влияют на точность их вычисления при  $\Delta x$  и  $\Delta y \geq 1$  микрона.

2. Чем дальше реперные точки отстоят от базы съемки ( $00'$  на рис. 1), тем точнее могут быть вычислены значения параметров.

3. Погрешности вычисления ряда параметров в несколько раз превышают допустимые значения, если ошибки измерений координат изображений реперных точек  $\geq 5$  микрон.

#### 5. Методика экспериментального подбора параметров

##### оптической системы камеры

В связи с тем, что часть параметров оптической системы камеры ( $d_0$ ,  $d_1$  и т.п.) в ряде случаев нельзя определить с нужной точностью ни путем прямых измерений, ни по координатам изображений отдельных реперных точек, рассмотрим методику экспериментального подбора этих параметров по реперным точкам, расположенным в различных горизонтальных плоскостях.

На возможность экспериментального подбора параметров указывают выражения 3–5 и данные, приведенные в таблице 1. Из этой таблицы видно, что все параметры можно разбить на три группы.

К первой группе относятся толщины сред ( $d_0$ ,  $d_1$  и  $d_2$ ). Ошибки в значениях толщин смещают  $Z$ -ую координату на величину, определяемую в основном значениями соответствующих погрешностей и практически не зависящую от угла зрения  $\beta$ . Таким образом, параметры этой группы можно использовать для компенсации смещений  $Z$ -ой координаты.

Ко второй группе относятся показатели преломления стекла и воды ( $n_1$  и  $n_2$ ). Смещение  $Z$ -ой координаты из-за ошибок в этих величинах зависит также и от  $\beta$ , хотя и не очень сильно. Так, например, при  $\Delta n_2 = 0,001$  постоянное смещение  $Z$  около 0,5 мм, а разброс в значениях этой координаты вследствие зависимости  $\frac{\partial Z}{\partial n_2}$  от  $\beta$  около 0,2 мм.

К третьей группе относится показатель преломления рабочей жидкости  $n$ . Погрешность в  $n$  смещает  $Z$ -ую координату на величину, зависящую не только от  $\Delta n$  и  $\beta$ , но также и от  $Z$ .

Таким образом, значения толщин и показателей преломления сред, через которые производится съемка, за исключением  $n$ , можно подобрать из условий:

$$d_2 = d'_2 = \text{const} \quad \text{или} \quad Z = Z' = 0.$$

Рассмотрим методику подбора этих величин по реперным точкам, расположенным на поверхности стекла ( $d_1 = d'_1 = \text{const}$ ), для метровой пропановой пузырьковой камеры. В этом случае по координатам изображений реперных точек на снимках двух стереопар вычислялись  $d_{21}$ ,  $d'_{21}$  и их среднее значение  $\bar{d}_2$ .

$$\bar{d}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n d_{2i} + \sum_{i=1}^n d'_{2i}}{2n} \quad (12)$$

здесь  $n$  — число реперных точек. По полученному таким способом значению  $\bar{d}_2$  для каждой стереопары подбирались величины  $d_0$  и  $d'_0$ , исходя из того, что равенство

$$\bar{d}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} d_{2i}}{n_k} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} d'_{2i}}{n_k} = \frac{\sum_{i=1}^{n_m} d_{2i}}{n_m} = \frac{\sum_{i=1}^{n_m} d'_{2i}}{n_m} \quad (13)$$

должно выполняться с точностью, не меньшей 0,1 мм.

Результаты этих вычислений приведены в таблицах 3 и 4. Из таблицы 3 легко получить, что среднеквадратичный разброс

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_2 - \frac{d_{2i} + d'_{2i}}{2})^2}{n-1}} \quad (14)$$

а следовательно, и погрешность в  $Z$ -ой координате, обусловленная ошибками в толщинах и показателях преломления сред, составляет 0,7 мм при соответствующей ошибке измерений  $\sigma_{d_2} = \sigma_z = 0,8$  мм.

Аналогичным способом можно подобрать параметры по реперным точкам, расположенным на поверхности рабочей жидкости или в рабочем объеме камеры, если только известны координаты их изображений на снимках стереопары.

### З а к л ю ч е н и е

Применение методики подбора параметров оптической системы пузырьковой камеры по реперным точкам позволяет:

1. Существенно снизить требования к точности измерения толщин и показателей преломления сред, через которые производится съемка.
2. Компенсировать погрешности в одних параметрах за счет других и благодаря этому определять  $Z$ -ые координаты точек треков с погрешностями, в несколько раз меньшими, чем ошибки измерения толщин.
3. Контролировать постоянство параметров оптической системы камеры в ходе всей экспозиции.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность В.П.Джелепову за полезные обсуждения, Д. Каутской и Е. Гераскину за проведение вычислений на электронно-счетной машине.

### Л и т е р а т у р а

1. А.В. Богомолов, Ю.А. Будагов, А.Т. Василенко, В.П. Джелепов, Н.И. Дьяков, В.Г. Иванов, В.С. Кладницкий, В.И. Лепилов, Ю.Ф. Ломакин, В.И. Москалев, В.Е. Фляган, Т.И. Шетет, П.В. Шляпников. ПТЭ, № 1, 61 (1964).
2. Ю.А. Александров, Г.С. Воронов, В.М. Горбунков, Н.Б. Делоне, Ю.И. Нечаев. Пузырьковые камеры. Москва. Атомиздат, 1963.
3. Е.Н. Кладницкая. Материалы совещания по методике пузырьковых камер, Препринт ОИЯИ 798, Дубна, 1961, стр. 5-10.
4. Ю.А. Каржавин, И.В. Чувило, С.С. Кириллов, В.Д. Инкин, И.А. Голутвин, В.Д. Неустроев, В.Д. Степанов, Б.П. Тулаев, И.В. Колесов, В.Я. Алмазов, Ю.П. Прокофьев, И. Шивагл. ПТЭ, № 5, 54 (1963).

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 марта 1966 г.

Таблица 1

Значения коэффициентов при  $\Delta R$  ,  $\Delta d_0$  ,  $\Delta d_1$  и т.д.  
в выражении для  $\Delta z$  при различных углах зрения  $\beta$

$\beta$	$\frac{\partial z}{\partial R}$	$\frac{\partial z}{\partial d_0}$	$\frac{\partial z}{\partial d_1}$	$\frac{\partial z}{\partial d_2}$	$\frac{\partial z}{\partial n_1}$	$\frac{\partial z}{\partial n_2}$	$\frac{\partial z}{\partial n}$
10°	7,01	1,24	0,81	0,93	64,8	479,2	153,6
20°	3,46	1,26	0,80	0,92	66,8	501,6	162,8
30°	2,25	1,30	0,79	0,91	69,7	541,9	179,5
40°	1,63	1,37	0,76	0,90	73,7	600,1	207,2

Таблица 2

Точность определения параметров оптической системы  
камеры по координатам изображений реперных точек

$\Delta x = \Delta y$	X	Y	$\Delta d_2$	$\Delta n_2$	$\Delta n$
мм	мм	мм	мм		-
0,000	150	150	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-4}$
0,000	250	250	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-4}$
0,000	300	300	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-4}$
0,000	350	350	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
0,001	150	150	0,68	0,0012	0,006
0,001	250	250	0,41	0,0007	0,003
0,001	300	300	0,17	0,0003	0,001
0,001	350	350	0,10	0,0001	0,001
0,002	150	150	2,0	0,0036	0,018
0,002	250	250	1,2	0,0021	0,011
0,002	300	300	0,5	0,0010	0,004
0,002	350	350	0,3	0,0005	0,002
0,005	150	150	5,4	0,0095	0,048
0,005	250	250	3,3	0,0058	0,030
0,005	300	300	1,4	0,0020	0,011
0,005	350	350	0,8	0,0014	0,006

Таблица 3

Значения  $d_2$ , вычисленные по координатам изображений реперных точек на снимках двух стереопар

I стереопара				III стереопара			
До подбора $d_0$		После подбора $d_0$		До подбора $d_0$		После подбора $d_0$	
$d_2$	$d_2'$	$d_2$	$d_2'$	$d_2$	$d_2'$	$d_2$	$d_2'$
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
643,8	642,3	643,6	641,9	644,9	643,4	645,2	643,9
643,6	644,5	643,5	644,1	644,2	643,2	644,4	643,8
643,0	644,2	642,8	643,7	643,6	643,1	643,9	643,7
643,3	645,3	643,1	644,9	643,1	643,1	643,4	643,7
643,5	642,1	643,4	641,6	643,4	643,1	643,7	643,6
642,1	643,1	642,0	642,7	642,8	642,8	643,1	643,3
642,7	643,1	642,6	642,7	642,8	642,1	643,1	642,7
641,9	645,0	641,8	644,6	642,1	641,8	642,4	642,3
644,3	642,6	644,2	642,1	641,7	642,0	642,0	642,6
643,7	642,7	643,6	642,2	643,0	642,7	643,2	643,3
642,7	643,3	642,5	642,9	641,9	642,2	642,2	642,7
642,9	643,3	642,8	642,8	641,8	641,5	642,1	642,1
643,1	643,5	643,0	643,0	641,2	641,8	641,5	642,4
				640,6	641,9	641,0	642,5
				644,2	642,0	644,5	642,5
				642,6	642,1	642,8	642,7
				642,7	642,4	643,0	643,0

Таблица 4

Измеренные и подобранные значения  $d_0$  и  $d_0'$  для двух стереопар

I стереопара				III стереопара			
Измеренные		Подобранные		Измеренные		Подобранные	
$d_0$	$d_0'$	$d_0$	$d_0'$	$d_0$	$d_0'$	$d_0$	$d_0'$
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
34,80	34,60	34,90	34,94	34,60	35,80	34,40	35,40



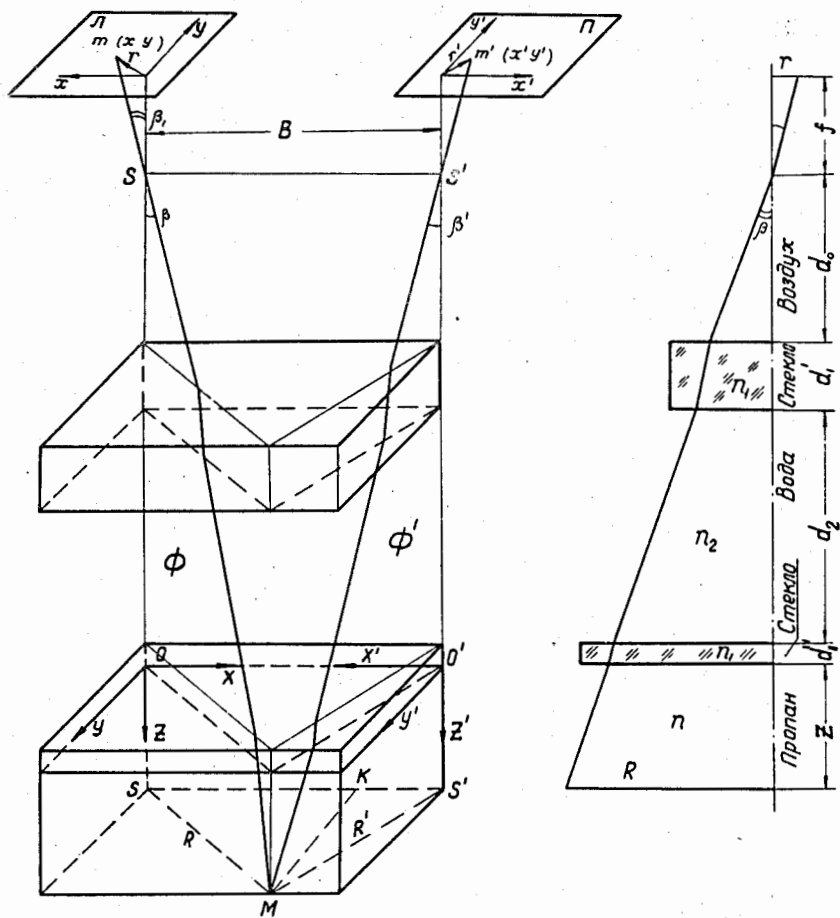


Рис. 1. Оптическая схема метровой пропановой пузырьковой камеры.