

2051

Экз. чит. зала

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2051



Е.М.Андреев, Л.С.Вертоградов, В.Г.Иванов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ФОТООБЪЕКТИВОВ "ГИДРО-РУССАР-4", ИСПОЛЗУЕМЫХ
ДЛЯ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ ТРЕКОВ В МЕТРОВОЙ
ПРОПАНОВОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ ОИЯИ

1965

2051

Е.М.Андреев, Л.С.Вертоградов, В.Г.Иванов

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ФОТООБЪЕКТИВОВ "ГИДРО-РУССАР-4", ИСПОЛЬЗУЕМЫХ
ДЛЯ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ ТРЕКОВ В МЕТРОВОЙ
ПРОПАНОВОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ ОИЯИ

Направлено в ПТЭ

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

Фотообъективы "Гидро-Руссар -4"/1/ были рассчитаны и изготовлены в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) специально для съемки следов частиц в метровой пропановой пузырьковой камере Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ^{2/}. Фотографирование треков производится через воздух, стекла, воду и пропан шестью од- нотипными объективами. На предметных стеклах объективов (рис. 1) выгравированы кресты, определяющие в плоскости изображения геометрический центр - точку o и координатную систему $хоу$, в которой одна из осей ($ох$) совпадает с базой фотографиро- вания, а другая ($оу$) - перпендикулярна ей. Для каждого объектива также были измерены зависимости $\beta(\rho)$, где β - угол между оптической осью и главным луч- ком из некоторой пространственной точки, а ρ - радиус-вектор ее изображения. Изме- рения были проведены в ЛИТМО для пяти различных ориентаций ρ (рис. 1) на уста- новке, обычно используемой для исследования дисторсии объективов^{1/}. Точности изме- рения β и ρ составляли соответственно 5 сек и 1 мкм. Результаты этих измерений использовались нами для вычисления тех характеристик объективов, знание которых необходимо для восстановления пространственной картины фотографируемых событий^{3/}:

- 1) координат оптических осей в плоскости изображения (Δx , Δy) (рис. 1);
- 2) средних зависимостей $\bar{\beta}(\rho)$;
- 3) фокусных расстояний объективов f .

1. Вычисление координат оптических осей

В связи с тем, что при изготовлении объективов могут иметь место небольшие от- клонения параметров оптической системы от расчетных, их реальные характеристики также могут несколько отличаться от идеальных. Это проявляется, в частности, в том, что оптическая ось может не совпадать с геометрической.

Рассмотрим в связи с этим разности между измеренными значениями углов β по различным направлениям, соответствующим одинаковым ρ_i (значения радиус-векторов ρ_i отсчитывались от геометрического центра объектива). Очевидно, что когда отли- чие реального объектива от расчетного заключается только в несовпадении оптической и геометрической осей, величины этих разностей должны оставаться либо постоянными, либо слабо меняющимися функциями ρ . Конкретный вид зависимости этих разностей от ρ определяется функцией $\beta(\rho)$.

Для получения данных о положении оптических осей для каждого объектива были вычислены в зависимости от ρ значения следующих трех разностей: $\Delta\beta_1 = \beta_I - \beta_V$, $\Delta\beta_2 = \beta_I - \beta_{III}$ и $\Delta\beta_3 = \beta_V - \beta_{III}$ где I, III и V означают, соответственно,

первое, третье и пятое направления, указанные на рис. 1. Величины этих разностей прямо пропорциональны координатам оптической оси в плоскости изображения (точка o' на рис. 1).

Результаты этих вычислений для трех объективов представлены на рис. 2, из которого видно, что:

для первого объектива все три разности остаются примерно постоянными для любых значений ρ ;

для второго — постоянна только одна из трех разностей ($\Delta\beta_3$);

для третьего — ни одна из трех разностей не остается постоянной для $\rho > 30$ мм.

Таким образом, все исследуемые объективы можно разбить на следующие три группы:

- 1) симметричные в пределах всего поля зрения;
- 2) симметричные в пределах половины поля зрения;
- 3) несимметричные для $\rho > 30$ мм.

Как было отмечено ранее, постоянство разностей $\Delta\beta_i$ указывает на смещение оптического центра объектива относительно геометрического. Рассмотрим величину этого смещения у одного из объективов. Для этого с помощью интерполяции измеренных зависимостей $\beta(\rho)$ были вычислены значения радиус-векторов (ρ_I^i , ρ_{III}^i и ρ_V^i), соответствующих одинаковым β_i . Из таблицы 1, где приведены результаты этих вычислений, видно, что точка o' , равноудаленная от концов радиус-векторов — ρ , соответствующих одинаковым β , смещена относительно точки o приблизительно на 15 мкм.

Таблица 1

Значения радиус-векторов ρ , соответствующих одинаковым значениям углов β

β	ρ_I мм	ρ_{III} мм	ρ_V мм	$\frac{\rho_I - \rho_V}{2}$ мм	$\rho_{III} - \frac{\rho_I + \rho_V}{2}$ мм
$5^{\circ}40'18''$	10,005	9,997	9,999	+0,003	-0,005
$11^{\circ}17'56''$	20,012	19,997	19,999	+0,007	-0,008
$16^{\circ}51'43''$	30,009	29,995	29,999	+0,005	-0,009
$22^{\circ}16'59''$	40,015	39,995	39,997	+0,009	-0,011
$27^{\circ}34'25''$	50,016	49,997	49,999	+0,009	-0,010
$35^{\circ}11'12''$	65,025	64,996	64,996	+0,015	-0,014

В связи с тем, что оптические оси объективов не совпадают с геометрическими, истинные значения углов между главными лучами из пространственных точек и оптической осью β^* несколько отличаются от измеренных β . Учитывая, однако, то обстоятельство, что это смещение мало, можно считать оптическую ось параллельной геометрической, то есть пренебречь изменением угла β при переходе от одного начала отсчета к другому, и в этом приближении найти координаты нового центра (точка o' , рис. 1 и 3).

Из рис. 3 легко получить, что выражение, связывающее β и β^* , имеет следующий вид:

$$\operatorname{tg} \beta = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2} + 2\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 \left(\frac{r}{R}\right) - 2\left(\frac{r}{R}\right) \frac{\Delta x \rho_x + \Delta y \rho_y}{r^2} \operatorname{tg} \beta^* \quad (1)$$

Учитывая, что $\Delta r \ll r$, получаем:

$$\operatorname{tg} \beta = \sqrt{1 - 2\left(\frac{r}{R}\right) \frac{\Delta x \rho_x + \Delta y \rho_y}{r^2}} \operatorname{tg} \beta^* \quad (2)$$

где M — плоскость предметов, m — плоскость изображений, o и o' — точки пересечения геометрической и оптической осей с плоскостью изображения, $\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ — радиус-вектор точки o' относительно точки o , ρ и r — радиус-вектора изображения пространственной точки A относительно o и o' , K и K' — передние узловые точки объектива на геометрической и оптической осях.

Так как углы β^* должны зависеть только от величины радиус-векторов, то каждому значению β^* в плоскости изображения соответствует окружность с центром в точке o' . Последняя является также центром окружности, проходящей через концы радиус-векторов r_i ($i = I - V$), соответствующих одинаковым значениям β^* . В связи с этим можно построить следующий итерационный процесс. Полагая сначала $\Delta r = 0$, получаем, что $\beta^* = \beta$, и для нахождения координат точки o' ($\Delta x^{(1)}$, $\Delta y^{(1)}$) достаточно вычислять значения $\rho_I^{(1)}$, $\rho_{III}^{(1)}$ и $\rho_V^{(1)}$ для одного и того же β , так как тогда:

$$\Delta x^{(1)} = \rho_{III}^{(1)} - \frac{\rho_I^{(1)} + \rho_V^{(1)}}{2}; \quad \Delta y^{(1)} = \frac{\rho_I^{(1)} - \rho_V^{(1)}}{2} \quad (3)$$

Найденные таким способом $\Delta x^{(1)}$ и $\Delta y^{(1)}$ подставляются в (2) для вычисления первого приближения углов $\beta^{*(1)}$, по которым затем вычисляется новое приближение для координат точки o' и т.д. Процесс должен повторяться до тех пор, пока разность между двумя последующими значениями координат точки o' не окажется меньше 1 мкм.

В таблице 2 приведены вычисленные таким способом координаты центров симметрии трех рассмотренных ранее объективов при различных значениях ρ . Из этой таблицы видно, что для первого объектива разброс отдельных значений Δx и Δy относительно среднего не превышает 3-4 мкм, а для двух остальных он в несколько раз больше и, кроме того, наблюдается заметный рост Δx и Δy с увеличением ρ .

В связи с этим при вычислении средних значений $\overline{\Delta x}$ и $\overline{\Delta y}$ отбирались только те точки зависимостей $\beta(\rho)$, которые соответствовали симметричным областям объективов. Если при определении координат точки o' не учитывать асимметрию объективов, то не только возрастают ошибки в $\overline{\Delta x}$ и $\overline{\Delta y}$, но и сами средние значения заметно отличаются от истинных. Это видно из таблицы 3, где приведены

Таблица 2

Координаты центров симметрии трех объективов для различных значений ρ

№ объек- тива	Δx , мкм	Δy , мкм	Δx , мкм	Δy , мкм	Δx , мкм	Δy , мкм
10	+5	-6	-2	-2	0	-3
20	+8	-7	+2	-6	+4	0
30	+7	-10	+9	-10	+10	+6
40	+11	-5	+17	-10	+5	+16
50	+11	-11	+16	-23	+4	+24

средние значения координат точки o' ($\overline{\Delta x}$ и $\overline{\Delta y}$) и их ошибки δ_x и δ_y , которые вычислялись по всем результатам измерений (I и II столбцы) и только в пределах симметричных областей (III и IV столбцы).

2. Вычисление средних зависимостей $\beta^*(r)$ и фокусных расстояний объективов

Вычисление средних зависимостей $\beta^*(r)$ производилось в следующей последовательности. Сначала по формуле (2) производился пересчет измеренных углов β к новому центру, затем с помощью квадратичной интерполяции эти результаты приводились к значениям r , кратным пяти, которые и усреднялись.

Таблица 3
Координаты оптических осей

Номер объектива	Координаты оптических осей			
	I	II	III	IV
1	8 ± 3	-7 ± 2	8 ± 3	-7 ± 2
2	8 ± 6	-8 ± 6	0 ± 2	0 ± 2
3	4 ± 2	7 ± 7	0 ± 2	-2 ± 1
4	-6 ± 3	-8 ± 2	-6 ± 3	-8 ± 2
5	-9 ± 6	9 ± 8	-4 ± 1	-0 ± 1
6	10 ± 2	-1 ± 1	10 ± 2	-1 ± 1
7	13 ± 4	-8 ± 3	8 ± 1	-7 ± 1
8	21 ± 9	-7 ± 5	10 ± 1	-3 ± 1
9	10 ± 5	-6 ± 3	4 ± 1	-3 ± 1

Очевидно, что качество объектива будет характеризоваться разбросом отдельных значений $\beta_i^*(r)$ относительно средних $\beta^*(r)$.

$$\delta \beta_i = \beta^*(r) - \beta_i^*(r). \quad (4)$$

В таблице 4 приведены значения $\delta \beta_i^*(r)$ для трех объективов, упоминавшихся ранее. Если предположить, что для первого объектива разброс обусловлен только ошибками измерений и вычислений, то максимальное значение средней ошибки в углах β $\delta \bar{\beta} = 8$ сек. Для двух других объективов $\delta \bar{\beta} = 18$ и 23 сек, соответственно. То есть асимметричный характер зависимости $\beta(r)$ в этих случаях заметно превышает ошибки измерений.

В виду того, что из шести применяемых для съемки объективов у четырех используется только половина поля зрения, для последних усреднение можно производить только по трем направлениям (I, II, III или III, IV, V). В таблице 5 приведены средние значения $\delta \bar{\beta}$, полученные при усреднении по всему полю зрения и его половинам.

Таблица 4

Величины разностей $\delta \bar{\beta}$ в сек для трех объективов в зависимости от r

Номер объек- тива	Величины разностей $\delta \bar{\beta}$ в сек для трех объективов в зависимости от r														
	1	2		3		4		5		6		7		8	
r (в мм)	$\delta \beta_I$	$\delta \beta_{II}$	$\delta \beta_{III}$	$\delta \beta_{IV}$	$\delta \beta_V$	$\delta \beta_I$	$\delta \beta_{II}$	$\delta \beta_{III}$	$\delta \beta_{IV}$	$\delta \beta_V$	$\delta \beta_I$	$\delta \beta_{II}$	$\delta \beta_{III}$	$\delta \beta_{IV}$	$\delta \beta_V$
5	+8	-6	+11	-1	-13	-7	+13	-3	-4	0	-4	+10	-5	0	-2
10	-3	+1	-1	+12	-7	+2	+12	-6	-5	-4	+6	+9	+4	-10	-10
15	-5	0	+1	+12	-8	+2	+16	-5	-4	-9	+5	+12	-2	-8	-9
20	-5	+3	+1	+11	-8	+4	+20	-1	-8	-16	-2	+8	+6	-4	-7
25	-2	+1	-3	+9	-3	+10	+18	-0	-13	-16	0	-3	+7	-3	-3
30	-1	0	-3	+9	-3	+2	+11	+12	-9	-16	-11	-9	+10	0	+10
40	-8	+3	-1	0	+5	+5	+21	+5	+7	-40	-24	-7	+11	+15	+6
45	+1	+7	-9	+4	-5	+5	+16	+19	-2	-37	-36	-18	+8	+18	+29
50	0	+4	-7	+3	-2	+9	+23	+23	-4	-53	-42	-27	+7	+25	+35
55	-9	+7	-10	+7	+6	+20	+34	+13	0	-65	-42	-33	+9	+27	+37
65	-3	+7	-2	-3	+1	+25	+50	-22	+10	-65	-66	-49	0	+44	+69
70		-12		+12			+29		-29			-59		+59	+50
75		-14		+14			+34		-34			-68		+68	
80		-13		+12			+38		-38			-78		+78	
85		-7		+7			+42		-42			-92		+92	

Таблица 5
Средние значения $\delta\beta$ в сек

Об- ласть усреднения	Номер объектива	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I-V	направления	5	18	23	13	27	6	7	17	13
I, II, III	'	5	8	11	13	6	6	7	7	4
III, IV, V	'	5	14	7	3	16	6	7	15	12

Из таблицы 5 видно, что для симметричных областей объективов средняя ошибка в значениях углов β^* не превышает 7-8 сек, что соответствует погрешности в Z-ой координате $\leq 0,3$ мм для углов зрения $\geq 10^\circ$. Для несимметричных объективов эта ошибка достигает 25-30 сек, а соответствующие погрешности в Z-ых координатах возрастают в 3-4 раза.

Фокусные расстояния объективов f вычислялись по обычной формуле^{1/}

$$f = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{r_i}{\operatorname{tg} \beta_i^*} \quad (6)$$

Результаты этих вычислений приведены в таблице 6, из которой видно, что реальные фокусные расстояния отличаются от расчетного (95,6 мм) на 2,0-3,5 мм, а разница между максимальным и минимальным значением f равна 1,5 мм.

Таблица 6
Реальные фокусные расстояния объективов

Номер объектива	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f в мм	98,12	98,01	98,30	97,71	97,70	97,56	98,39	98,36	98,95

3. Выводы

В результате исследования фотообъективов "Гидро-Руссар" было установлено, что:

1. Оптические оси в большинстве случаев не совпадают с геометрическими, положения которых указываются на предметных стеклах объективов специальными перекрестиями (точка о на рис. 1). Величины этих смещений больше, чем ошибки измерений, но не превышают 20 мкм.

2. Фокусные расстояния в зависимости $\beta(r)$ различных объективов отличаются от

расчетных, в связи с чем при точном вычислении пространственных координат фотографируемых событий нужно для каждого объектива использовать экспериментальные, а не расчетные характеристики.

3. У некоторых объективов наблюдаются отклонения от симметричного хода в зависимостях $\beta^*(r)$, т.е. β^* зависит не только от величины r , но и от его ориентации в плоскости изображения.

4. Средние ошибки в значениях углов β^* для симметричных объективов 7-8 сек, а для несимметричных 25-30 сек.

Учет отмеченных выше обстоятельств при выборе объективов для фотографирования рабочего объема метровой пропановой камеры позволяет уменьшить погрешности в Z-ых координатах, возникающие за счет несовершенства объективов, до вполне приемлемых значений $\leq 0,3$ мм для углов зрения $\geq 10^\circ$.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность В.П.Джелелову за инициативу в постановке данной работы и постоянную помощь и Э.М.Лившиц за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. М.М.Русинов. Фотограмметрическая оптика. Москва. Геодезиздат, 1962.
2. А.В.Богомолов, Ю.А.Будагов, А.Т.Василенко, В.П.Джелелов, Н.И.Дьяков, В.Г.Иванов, В.С.Кладницкий, В.И.Лепилов, Ю.Ф.Ломакин, В.И.Москалев, В.Б.Флягин, Т.И.Шетет, П.В.Шляпников. ПТЭ, №1, 81 (1964).
3. Ю.А.Александров, Г.С.Воронов, В.М.Горбунков, Н.Б.Делоне, Ю.И.Нечаев. Пузырьковые камеры. Москва. Атомиздат; 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 марта 1965 г.

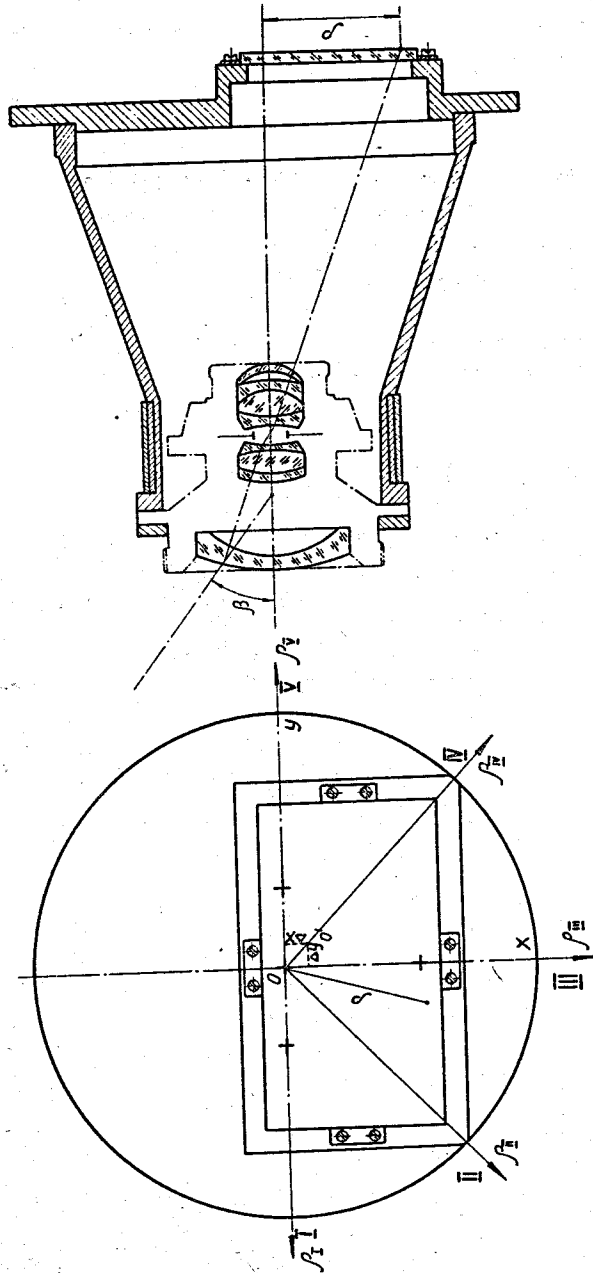


Рис. 1. Схема фотообъектива "Гидро-Руссар".

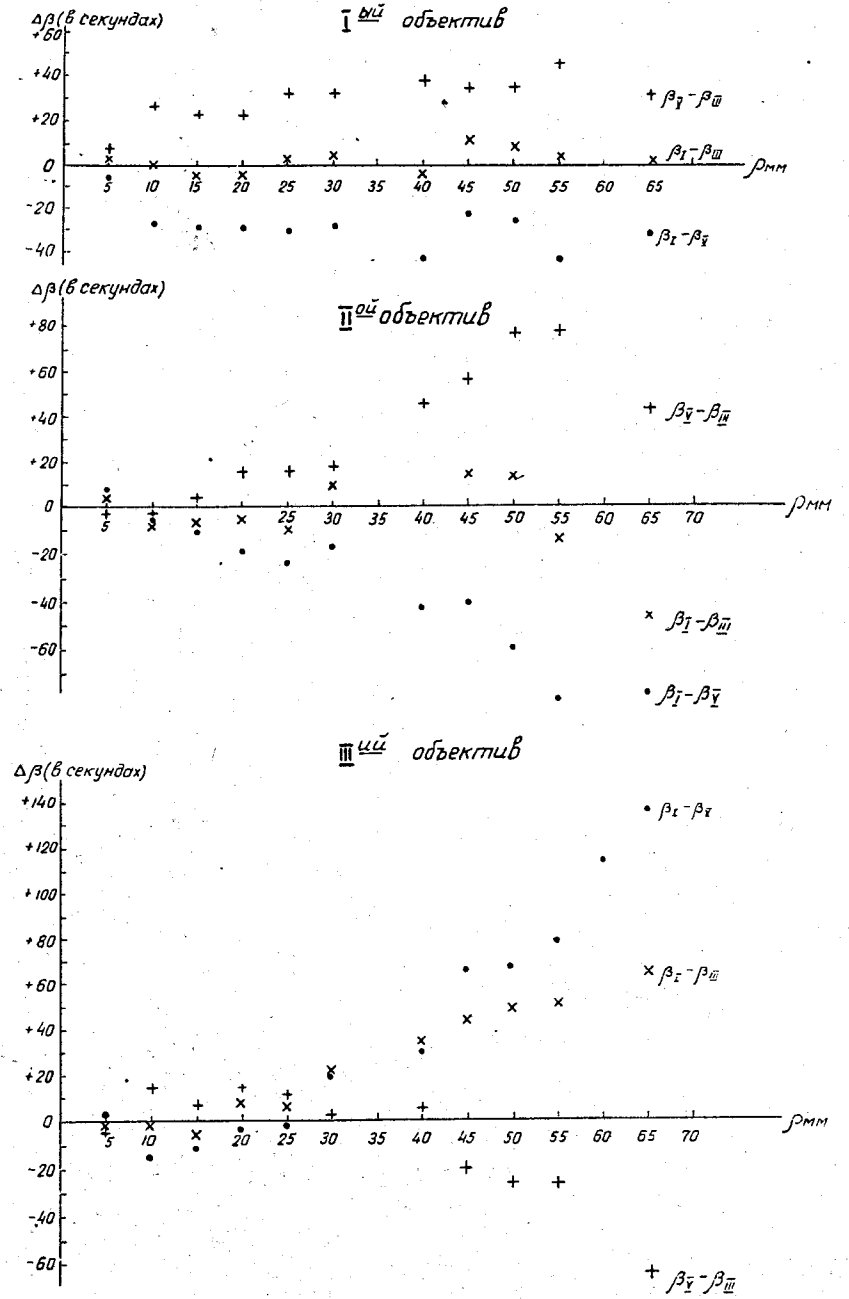


Рис. 2. Зависимости $\Delta\beta$ от ρ для трех объективов.

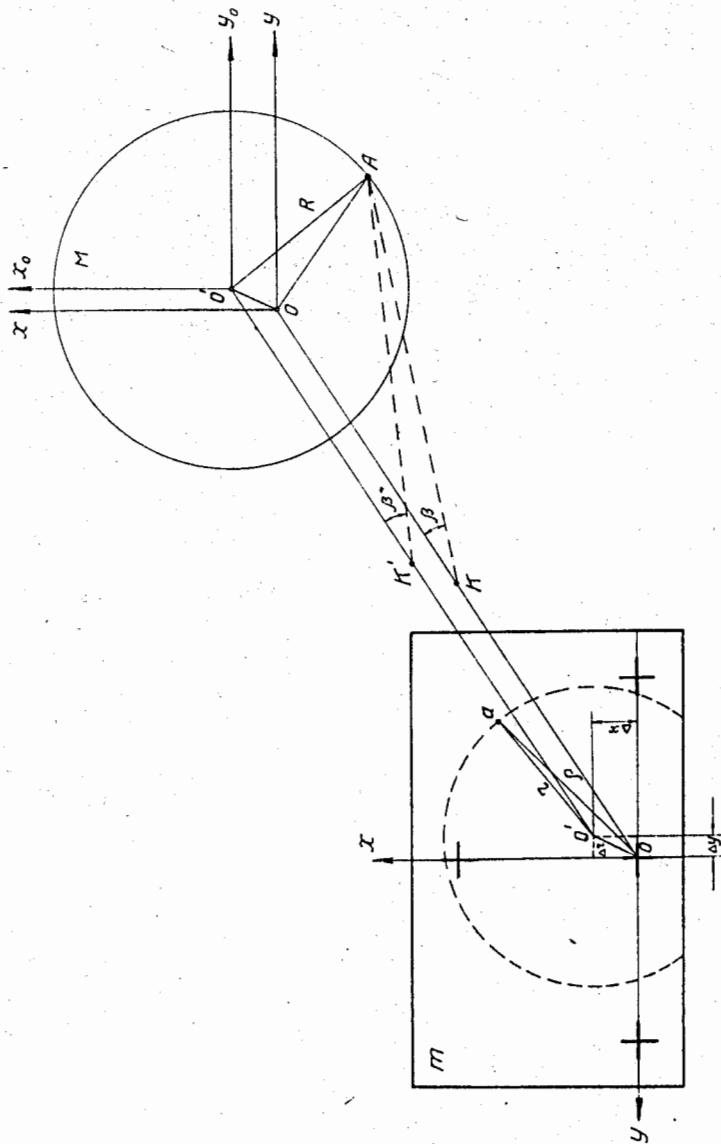


Рис. 3. К выводу соотношения между β и β^* .