

И.Г. Половцев

### О ПОГРЕШНОСТЯХ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПО МЕТОДУ РОНКИ

В работе анализируется чувствительность метода Ронки к ошибке волнового фронта.

Представлены соотношения, показывающие, что метод Ронки с визуальным считыванием теневой картины не обеспечивает контроль оптических деталей высшей категории качества. Произведена оценка чувствительности метода нуль-теста Ронки к положению экрана и плоскости наблюдения теневой картины.

Очень часто для оценки качества оптической системы нужен оперативный, не требующий громоздкой оснастки и простой в интерпретации способ контроля. С подобной ситуацией встречается и экспериментатор, пытающийся подобрать подходящие компоненты для макетирования оптической системы, и оптик, изготавливающий оптическую деталь.

Метод Ронки [1] полностью удовлетворяет изложенным требованиям. Причем существует ряд модификаций, позволяющих применить его для контроля как сферических — метод решетки Ронки, так и асферических волновых фронтов — метод нуль-теста Ронки или криволинейного экрана. Несмотря на распространенность метода Ронки, в литературе отсутствует исчерпывающая информация о его чувствительности и устойчивости к параметрам. В настоящей работе предпринята попытка оценить возможности этой методики.

Сущность метода Ронки поясняется на рис. 1.

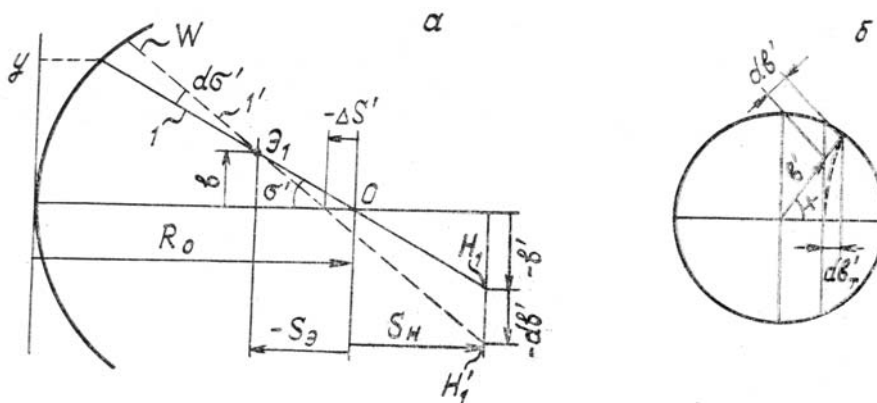


Рис. 1. Сущность метода Ронки: *a* — схема контроля по методу Ронки; *б* — искривление полос теневой картины

Пусть точка  $O$  — фокус волнового фронта  $W$ . На пути пучка лучей установлен экран Ронки на расстоянии  $S_3$  от фокуса  $O$ . В плоскости, находящейся на расстоянии  $S_n$  от точки  $O$ , производится наблюдение теневой картины, представляющей проекционное изображение экрана. Если контролируемый волновой фронт — сферический, то экран Ронки представляет собой решетку прямых параллельных линий, и проекционное изображение этой решетки также будет состоять из прямых параллельных линий. Если в проекционном изображении наблюдается искривление линий тени, то это значит, что волновой фронт  $W$  имеет отступление от сферичности — волновую aberrацию  $N_y$ , которая приводит к тому, что зоны у волнового фронта имеют различные фокусы  $O_y$ , т.е. имеет место продольная сферическая aberrация  $\Delta S'(y)$ . Величина искривления связана с  $\Delta S'(y)$ , а следовательно, с  $N(y)$ .

При контроле асферических волновых фронтов линии экрана Ронки (криволинейного экрана) искривлены таким образом, что в плоскости наблюдения теневой картины проекционное изображение состоит из прямых линий. Следовательно, криволинейный экран компенсирует своей кривизной искривление теневой картины, связанное с  $\Delta S'(y)$ , в этом смысле криволинейный экран в зарубежной литературе называют нуль-тестом Ронки. Если в проекционном изображении нуль-теста наблюдается искривление линий теневой картины, то это следует отнести к отступлениям волнового фронта от номинальной формы, т.е. асферический фронт имеет волновую aberrацию.

Из вышеизложенного нетрудно видеть, что обе модификации метода Ронки должны иметь одинаковую чувствительность к волновой aberrации  $N(y)$ , при идентичных условиях наблюдения теневой картины. Но устойчивость к условиям наблюдения (т.е. к погрешности обеспечения  $S_3$  и  $S_n$  будет различной, поскольку для решетки погрешность установки экрана и плоскости наблюдения теневой

вой картины не имеет значения, а для криволинейного экрана это приведет к нарушению компенсации кривизны и вызовет искривление теневой картины, которое может быть отнесено за счет аберраций  $N(y)$  и скажется на результатах контроля.

Пусть луч  $l$  проецирует точку  $\mathcal{E}_1$  экрана, находящуюся на высоте  $b$  в точку  $H_1$ , находящуюся в плоскости теневой картины на высоте  $b'$ .

Если волновой фронт  $W$  имеет волновую аберрацию  $N$ , то через точку  $\mathcal{E}_1$  пройдет уже не луч  $l$ , а какой-то  $l'$  — довольно близкий к  $l$  (при достаточно малой величине волновой аберрации) и пересекающий оптическую ось не в точке  $O$ , а в другой, отстоящей от нее на величину продольной сферической аберрации  $\Delta S'$ . Из рис. 1 запишем:

$$\begin{aligned} -S_3 &= b \operatorname{tg} \sigma', \\ -b' &= (-S_3 + S_{II}) \operatorname{tg} \sigma' - b, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma'$  — апертурный угол зоны, через которую проходит луч  $l$ . Дифференцируя эти соотношения, получим:

$$\Delta S' = -dS_3 = -\frac{bd\sigma'}{\sin^2 \sigma'}; \quad (2)$$

$$db' = \frac{S_{II} - S_3}{\cos^2 \sigma'} d\sigma'. \quad (3)$$

Из (1), (2) и (3) имеем:

$$db' = \Delta S' \cdot \operatorname{tg} \sigma' \left( \frac{S_{II}}{S_3} - 1 \right). \quad (4)$$

Соотношение (4) дает возможность определить  $db'$  — отклонение тени от прямой линии.

Предположим, что волновая аберрация  $N$  мала, следовательно, [2] можно воспользоваться соотношением:

$$\Delta S' = \frac{\partial(N)}{\partial y} \cdot \frac{R}{\operatorname{tg} \sigma'}, \quad (5)$$

где  $R$  — радиус кривизны волнового фронта.

Из (4) и (5) получим

$$db' = -\frac{\partial(N)}{\partial y} \cdot R \cdot \left( \frac{S_{II}}{S_3} - 1 \right). \quad (6)$$

Если

$$N(y) = \frac{A_0}{2} \left( 1 + \cos 2\pi \frac{y - y_0}{T} \right),$$

где  $A_0$  — амплитуда;  $y_0$  — координата вершины дефекта на волновом фронте;  $T$  — его период, то

$$\left( \frac{\partial N}{\partial y} \right)_{\max} = \frac{\pi A_0}{T}.$$

Отсюда — максимальное отклонение тени от прямой линии

$$db'_{\max} = \left| \frac{\pi A_0}{T} \cdot R_0 \cdot \left( \frac{S_{II}}{S_3} - 1 \right) \right|. \quad (7)$$

Проекция искривления линии  $db'_r$  на горизонтальную ось (см. рис. 1, б) может быть определена из соотношения:

$$db'_r = db' \cdot \cos \chi,$$

где  $\chi$  — угол наклона к горизонтальной оси.

Поскольку максимальное искривление наблюдается у коротких линий, близких к краю детали, то  $\cos\chi \approx 1$ , отсюда

$$db' \approx db'_r.$$

Необходимо отметить, что при использовании соотношения (7) для оценки ошибки волнового фронта (см, рис. 2) следует принять:

$$T = \begin{cases} 2D & \text{— для общей ошибки,} \\ d & \text{— для зональной ошибки.} \end{cases} \quad (8)$$

(Под общей ошибкой понимается низкочастотная составляющая волновой аберрации, сравнимая со световым диаметром, под зональной — высокочастотная).

$$A_0 = \begin{cases} 2N_{\max} & \text{— для общей ошибки,} \\ N_{\max} & \text{— для зональной ошибки,} \end{cases} \quad (9)$$

где  $D$  — световой диаметр контролируемого волнового фронта;  $d$  — размер зоны, в которой наблюдается искривление линии;  $N_{\max}$  — максимальное отклонение волнового фронта от номинального.

Для проверки соотношения (7) была выполнена серия модельных расчетов по программе «ЭКРАН-У» [3].

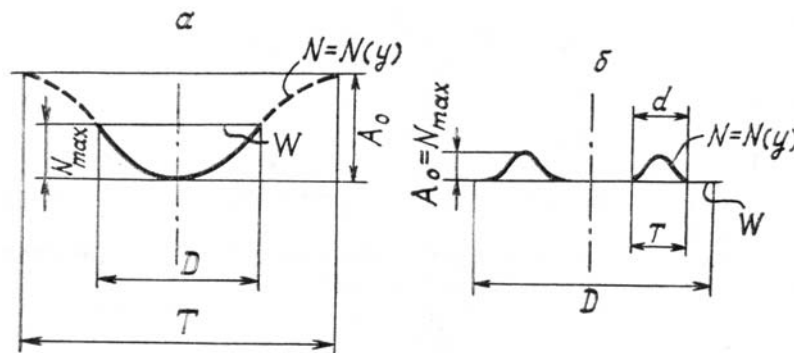


Рис. 2. Схемы, поясняющие соотношения: а — (8), б — (9)

На сферическом зеркале с параметрами  $D/R_0 = 250 \text{ мм}/1000 \text{ мм}$  моделировалась общая ошибка изменением эксцентриситета зеркала  $\varepsilon$  рассчитывались координаты линий теневой картины и вычислялась абсолютная величина проекции отклонения линии тени от прямой  $db'_r$ . Для вычисления  $N_{\max}$  использовалась формула:

$$N_{\max} = 2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \left( \frac{H^2}{2R_0} \right)^2 / 2R_0 \quad [4].$$

По формуле (7) вычислялась величина  $db'$  в предположении, что ошибка косинусоидальная. Результаты представлены в таблице.

**Результаты вычисления абсолютной величины  
искривления теневой картины при общей ошибке  $N_{\max}$   
по программе «ЭКРАН-У» —  $db'_r$  и по соотношению (7)  
для сферического зеркала  $db'_{\max}$**

$\varepsilon$	0,25	0,5	1,0	1,5
$N_{\max}$ (мкм)	4	17	68	85
$db'_{T_{\max}}$ (мм)	0,14	0,51	2,1	4,2
$db'_{\max}$ (мм)	0,093	0,36	1,44	4,2

Сравнение последних двух строк говорит о хорошей корреляции. Имеющиеся различия не очень существенны и ими можно пренебречь (ошибка оценки (7) не превышает 30%). Причины различий следующие:

– разные законы изменения профиля, в одном случае это полином второго порядка, в другом – косинусоидальный;

–  $db'$  – отклонение тени в радиальном направлении, а  $db_T$  – проекция отклонения на ось, перпендикулярную линиям решетки.

При визуальном контроле теневой картины чувствительность методики ограничена способностью человеческого глаза различать искривление линии. По аналогии с дисторсией примем за предел чувствительности методики [5] ошибку, которая приведет к относительному искривлению:

$$\frac{db'_{\max}}{b'} = 3 \%. \quad (10)$$

Поскольку имеем

$$b' = -S_H \cdot \operatorname{tg} \sigma',$$

то с использованием соотношения (7) можно записать:

$$\frac{db'_{\max}}{b'} = \left| \frac{\pi A_0 \cdot R_0}{T \cdot \operatorname{tg} \sigma'} \left( \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_H} \right) \right|. \quad (11)$$

Следовательно, согласно (8), (9) и (11) предельно различимая общая ошибка может быть определена из соотношения:

$$A_0^0 = \left| \frac{0,03}{2\pi} \left( \frac{D}{R_0} \right)^2 \cdot \frac{S_H \cdot S_3}{S_H - S_3} \right|. \quad (12)$$

При контроле по методу Ронки теневая картина может быть сформирована на сетчатке глаза. Хрусталик при этом устанавливается в параксиальном фокусе и аккомодируется на контролируруемую деталь. Следовательно,  $S_H = -R_0$ .

Для этого случая формула (12) трансформируется в соотношение:

$$A_0^0 = \left| \frac{0,03}{2\pi} \cdot \left( \frac{D}{R_0} \right)^2 \cdot S_3 \right|. \quad (13)$$

На рис. 3, а приведены графики зависимости предельно различимой общей ошибки  $A_0^0 = A_0(S_3)$  для разных относительных отверстий.

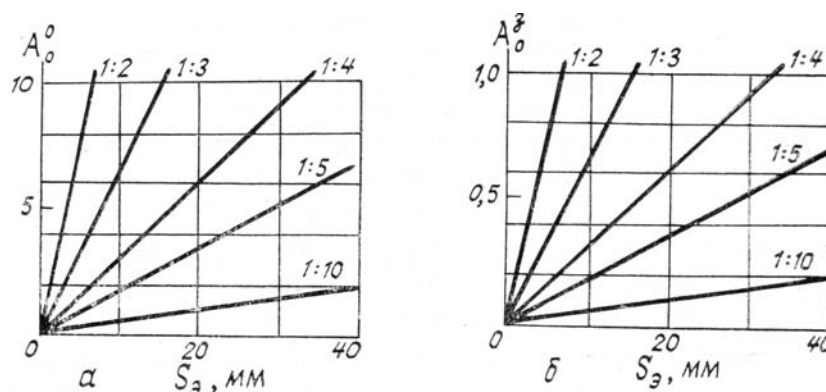


Рис. 3. Зависимость предельно различимой ошибки (а – общей  $A_0^0$ , б – зональной  $A_0^3$ ) волнового фронта от относительного отверстия детали и положения экрана  $S_3$  при контроле глазом, аккомодированным на деталь

Предельно различимая общая ошибка для случая, приведенного в таблице  $D/R_0 = 250/1000$ ;  $S_3 = -40$ ;  $S_H = 70$ , составит:

$$A_0 \approx 8 \text{ мкм},$$

следовательно, предельно различимый эксцентриситет  $\varepsilon \approx 0,35$ .

Оценим возможности метода Ронки для контроля зональных и местных ошибок. Согласно [6] за границу зональных ошибок можно принять  $T = D/10$ . Для этой ошибки, допущенной на краю волнового фронта, т.е.  $\text{tg}\sigma' = D/2R_0$ , можно записать из (10) и (11)

$$A_0^3 = \left| \frac{0,03}{2\pi} \left( \frac{D}{R_0} \right)^2 \cdot 10^{-1} \frac{S_{\text{II}} \cdot S_3}{S_{\text{II}} - S_3} \right|. \quad (14)$$

Соотношение (14) дает величину предельно различимой зональной ошибки с периодом  $T = D/10$ .

При контроле глазом, аккомодированным на деталь, предельно различимая зональная ошибка составит:

$$A_0^3 = \left| \frac{0,03}{2\pi} \cdot \left( \frac{D}{R_0} \right)^2 \cdot 10^{-1} \cdot S_3 \right|. \quad (15)$$

На рис. 3, б приведен график зависимости предельно различимой зональной ошибки  $A_0^3 = A_0(S_3)$  для разных относительных отверстий.

Таким образом, в отличие от [7], из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что метод Ронки при визуальном контроле вряд ли можно считать высококачественным в смысле критерия Рэлея, поскольку он существенно ограничен возможностями человеческого глаза.

Однако чувствительность метода Ронки можно значительно поднять, повысив точность измерения искривления полосы. Понятно, что при этом необходимо прибегнуть к фотоэлектрической обработке теневой картины. Подобное устройство должно быть снабжено бездисторсионным проекционным объективом, формирующим изображение теневой картины в плоскости фотоприемного элемента. Дисторсия объектива должна быть скорректирована (или по крайней мере измерена) с точностью, определяемой чувствительностью устройства к искривлению полос теневой картины.

Предположим, что есть устройство, позволяющее определять искривление полосы с суммарной погрешностью, не превышающей

$$\frac{db'_{\text{max}}}{b'} = 0,1 \%.$$

Следовательно, при радиусе изображения теневой картины  $b' = 8 \text{ мм}$ , разрешающая способность фотоприемника должна быть не хуже  $db' = 8 \text{ мкм}$ .

Если  $S_0 = 4 \text{ мм}$ ,  $S_T = -R_0$  для детали  $D/R_0$ , то предельно различимая общая ошибка в этом случае, согласно (13), имеет значение  $A_0^0 = 0,08 \text{ мкм}$ , что лучше критерия Рэлея. Для выяснения устойчивости метода нуль-теста Ронки к установке плоскости наблюдения обратимся к рис. 4, а.

Из рис. 4, а нетрудно видеть, что при смещении плоскости наблюдения на величину  $dS_{\text{II}}$ , искривление тени (нарушение компенсации кривизны) составит величину

$$-db'_T = \Delta S' \cdot \frac{D}{2R_0} \cdot \frac{dS_{\text{II}}}{S_{\text{II}}},$$

где  $\Delta S'$  — продольная абберация лучей, проходящих через среднюю линию криволинейного экрана и через его край. При сильном искривлении экрана можно считать, что  $\Delta S'$  — величина продольной абберации волнового фронта, формируемого контролируемой деталью.

Следовательно, при смещении плоскости наблюдения на величину  $dS_{\text{II}}$  относительное искривление линии можно определить из соотношения:

$$\frac{db'}{b'} \approx \frac{db'_T}{b'} = - \frac{\Delta S' \cdot \frac{D}{2R_0} \cdot \frac{dS_{\text{II}}}{S_{\text{II}}}}{D/2R_0 \cdot S_{\text{II}}} = \left| \frac{\Delta S' \cdot dS_{\text{II}}}{S_{\text{II}}^2} \right|. \quad (16)$$

При контроле асферического зеркала 2-го порядка [7] справедлива формула

$$\Delta S' = \varepsilon^2 \frac{(D/2)^2}{2R_0},$$

отсюда

$$\frac{db'}{b'} = \epsilon^2 \cdot \frac{(D/2)^2}{2R_0} \cdot \frac{dS_H}{S_H^2}$$

Исходя из соотношения (10), получаем допустимое смещение плоскости наблюдения при контроле асферических зеркал

$$\delta S_H = 3 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2R_0 \cdot S_H^2}{(D/2)^2 \cdot \epsilon^2}$$

В качестве примера определим  $dS'_H$  для параболы  $D/R_0 = 250/1000$  при  $S_H = -R_0$ ,

$$\delta S_H = 4000 \text{ мм.}$$

Более чувствительна схема контроля к малым значениям  $S_H$ . Так, например, для той же параболы при  $S_H = 70$  мм

$$\delta S_H = 24 \text{ мм.}$$

Из рис. 4, б видно, что компенсация кривизны линий теневой картины в плоскости ее наблюдения действительно нарушается при смещении криволинейного экрана.

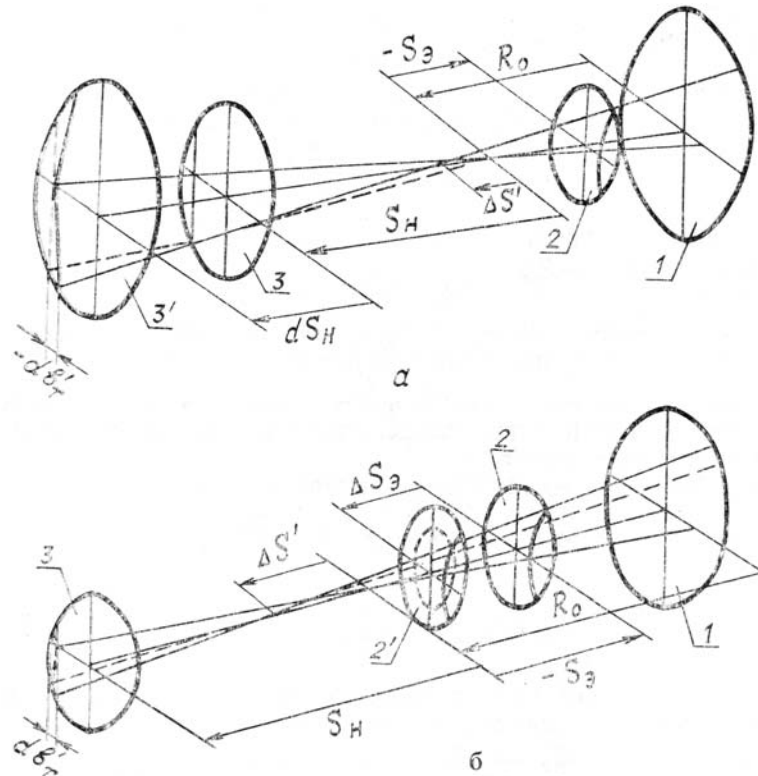


Рис. 4. Чувствительность схемы контроля к смещениям плоскости наблюдения (а), криволинейного экрана (б): 1 — контролируемая деталь; 2 — криволинейный экран; 2' — смещенный криволинейный экран; 3 — плоскость компенсации кривизны экрана; 3' — плоскость наблюдения

Можно записать достаточно очевидное выражение

$$db' \approx \delta S_\theta \cdot D/2R_0 \cdot \frac{S_H - \Delta S'_H}{-S_\theta + \Delta S'_H},$$

отсюда

$$\frac{db'}{b'} = \left| \delta S_\theta \cdot \left( 1 - \frac{\Delta S'_H}{S_H} \right) \cdot \frac{1}{-S_\theta + \Delta S'_H} \right|.$$

При  $S_H \gg \Delta S'_H$ , что как правило, выполняется, и из соотношения (10) допустимое смещение экрана составит

$$\delta S_3 = 3 \cdot 10^{-2} (-S_3 + \Delta S'). \quad (17)$$

Для параболы  $D/R_0 = 250/1000$ , при  $S_3 = -40$  мм,  $\Delta S' = 15,6$  мм

$$\Delta S_3 = 1,6 \text{ мм.}$$

При этом погрешность совмещения светового диаметра криволинейного экрана с границей светового конуса контролируемого фронта имеет вид

$$db' = \delta S_3 \cdot \frac{D}{2R_0} = 0,2 \text{ мм.}$$

Этого вполне можно достигнуть, визуально контролируя совмещение.

Для устройства, позволяющего выполнять количественный контроль по методу Ронки, погрешности установки экрана и плоскости наблюдения  $\delta S_H$  и  $\delta S_3$  не должны превосходить следующих значений:

$$\begin{aligned} \delta S_H &= db' \cdot \left(\frac{D}{2R_0}\right)^{-1}, \\ \delta S_3 &= db' \cdot \frac{S_3}{S_H} \cdot \left(\frac{D}{2R_0}\right)^{-1}. \end{aligned} \quad (18)$$

Соотношения (18) легко получают из рис. 4 и показывают, с какой погрешностью должны быть установлены экран и плоскость наблюдения, если предельно различимое прибором искривление полос составляет значение  $\frac{db'}{b'}$ , что обеспечивает ошибку контроля, амплитуда которой не превосходит  $A_0$ .

Так, например, при  $\frac{db'}{b'} = 0,1\%$  для параболы  $D/R_0 = 250/1000$  мм;  $S_3 = 4$  мм;  $S_T = -R_0$  общая ошибка контроля  $A_0 \leq 0,08$  мкм. Для этого необходимо определить положение криволинейного экрана и плоскости наблюдения теневой картины с погрешностью, не превосходящей

$$\begin{aligned} \delta S_H &= 1 \text{ мм;} \\ \delta S_3 &= 1 \text{ мкм.} \end{aligned}$$

Это уже достаточно жесткое ограничение, которое сложно выполнить.

Таким образом, из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

– чувствительность метода Ронки существенно зависит от схемы контроля, параметров контролируемой детали, качества фотоприемного устройства и может быть оценена по соотношениям (12), (16), (17);

– качественный контроль по методу Ронки является достаточно грубым и может использоваться только на начальных стадиях обработки оптики;

– количественный контроль по методу Ронки может осуществляться и удовлетворять критерию Рэля только при наличии высококачественного фотоприемного устройства, позволяющего обеспечить передачу искривления полос теневое изображение, не превосходящего величины  $\sim 0,1\%$ , при наличии высокой разрешающей способности устройства обработки  $\sim 8$  мкм и средств, обеспечивающих точную установку экрана Ронки.

1. Оптический производственный контроль. /Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение. 1985. С. 221–249.
2. Апенко М. И., Дубовик А. С. Прикладная оптика. М.: Наука. 1971. С. 155–157.
3. Агапов Н. А., Половцев И. Г. //Аппаратура дистанционного зондирования атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР. 1987. С. 128.
4. Справочник оптика-технолога. Л.: Машиностроение. 1975. С. 210–211.
5. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение. 1975. С. 210–215.
6. Проектирование оптических систем /Под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта М.: Мир. 1983. С. 268–269.
7. Попов Г. М. //Изв. КРАО. 1972. Т. XLV. С. 1–7.

СКБ научного приборостроения  
«Оптика», Томск

Поступила в редакцию  
14 июля 1988 г.

#### I. G. Polovtsev. An Error of Ronchy Method Control of Optics.

The wave-front error sensitivity of the Ronchy method is analyzed in the work. The presented correlations show that the Ronchy method with visual readout of a shadow picture does not provide for the high quality optics control. The evaluation of the null-test Ronchy method sensitivity to screen position and to shadow picture observation plane is made.