

## Установка для измерения продольных aberrаций линзовых и зеркальных объективов

*Т.В. Широких, В.Е.Иванов*

*Смоленский филиал «Национального исследовательского университета «МЭИ»*

**Аннотация:** Погрешности оптических поверхностей и в целом оптических систем можно оценить по несовпадению координат реальных и идеальных (рассчитанных) профильных кривых поверхностей; несовпадение нормалей к этой поверхности; различие волновых фронтов в падающем и преломленном (или отраженном) пучках световых лучей и др.

Воспроизводимость оптических поверхностей от образца к образцу и соответствие их расчетной принято оценивать по расхождению фактической и теоретической функций хода световых лучей. Такое расхождение оценивают по aberrограммам оптических систем, которые определяют экспериментально на специальных установках – aberrографах.

В отличие от известных схем для измерения продольных aberrаций только отражателей или только линз, разработанная установка является универсальной, предназначенной для измерения зональных aberrаций зеркальных и линзовых объективов большого диаметра, находящихся применение в световых приборах, концентраторах солнечной энергии, передающих и принимающих оптических системах оптико-электронных приборов.

**Ключевые слова:** aberrометр, aberrограмма, продольная aberrация, линзовый объектив, зеркальный объектив.

Теоретически считается, что все лучи оптических систем параксиальны, т.е. пучок лучей, выходящий из некоторой точки пространства, после прохождения оптической системы собирается в одну точку. Такие лучи называются гомоцентричными [1,2]. На практике это условие выполняется крайне редко. Нарушение гомоцентричности лучей приводит к погрешностям оптических систем, т.е. aberrациям.

В данной работе рассматривается продольная сферическая aberrация – одна из пяти известных в оптике монохроматических aberrаций третьего порядка [3-5]. Она наиболее существенна для зеркальных и линзовых объективов. Особенностью сферической поверхности является то, что ни линза, ни зеркало с такой поверхностью не могут свести параллельный пучок лучей строго в точку. Это связано с тем, что оптическая сила краев такой линзы или зеркала больше, чем в центре. В результате фокусные расстояния для различных зон различны (рис. 1), т.е. для оптической системы не существует

единого фокуса. Разница между фокусными расстояниями для разных зон называется продольной сферической аберрацией.

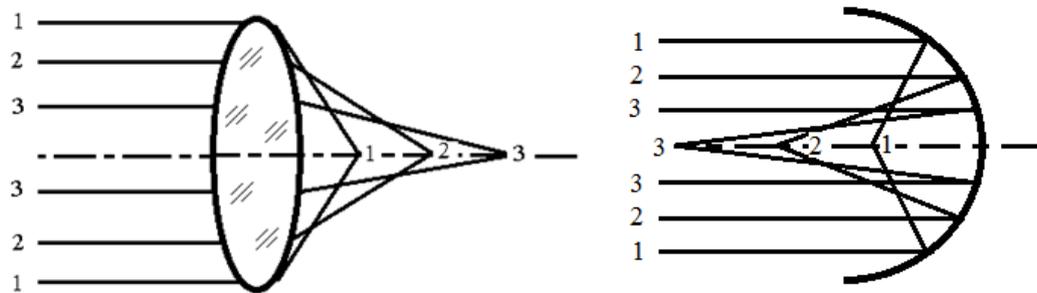


Рис.1 Продольные сферические аберрации объективов

Даже положение оптической системы влияет на величину сферической аберрации. Например, если плоско-выпуклую линзу расположить плоской стороной к предмету, то аберрация возрастет почти в четыре раза по сравнению с положением линзы выпуклой стороной к предмету.

Работоспособность оптического прибора зависит от правильности профиля формы оптических деталей, составляющих оптическую систему. Изменяя погрешности профиля оптических деталей в процессе производства, можно исправить геометрию поверхности на стадии формообразования.

Погрешности оптических поверхностей и в целом оптических систем можно оценить по несовпадению координат реальных и идеальных (рассчитанных) профильных кривых поверхностей; несовпадению нормалей к этой поверхности; различие волновых фронтов в падающем и преломленном (или отраженном) пучках световых лучей и другое.

Воспроизводимость оптических поверхностей от образца к образцу и соответствие их расчетной принято оценивать по расхождению фактической и теоретической функций хода световых лучей. Такое расхождение оценивают по абберограммам оптических систем, которые определяют экспериментально на специальных установках – абберографах.

Наиболее известным является aberрограф Леонова, схема которого приведена на рис.2. Aberрограф предназначен для измерения продольных aberраций отражающих поверхностей концентраторов [6-8].

Работает прибор следующим образом: пучок лучей от лазерного источника 1 попадает в пентапризму 3, откуда направляется параллельно главной оптической оси  $OZ$  на отражающую поверхность концентратора. Отраженный луч света оставляет на фотопленке 4, установленной в оптическом фокусе концентратора, след, и, вследствие перемещения фотопластины, происходит запись отклонения отраженного луча от расчетного фокуса концентратора.

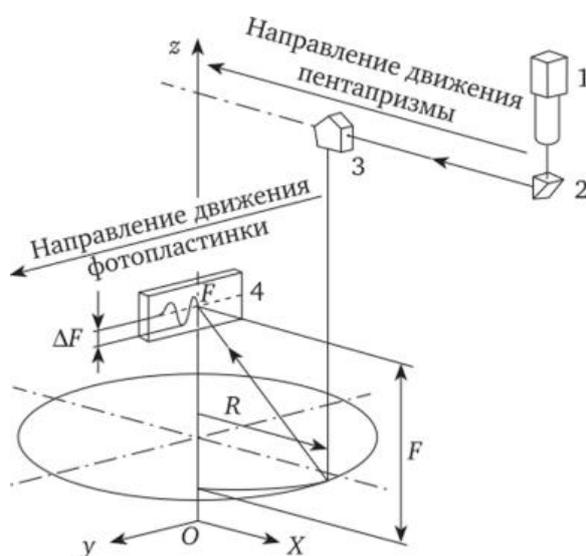
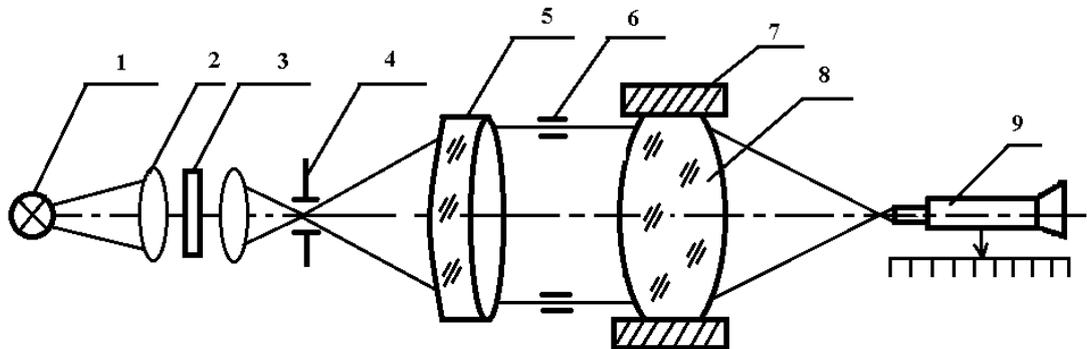


Рис.2. Схема работы aberрографа Леонова

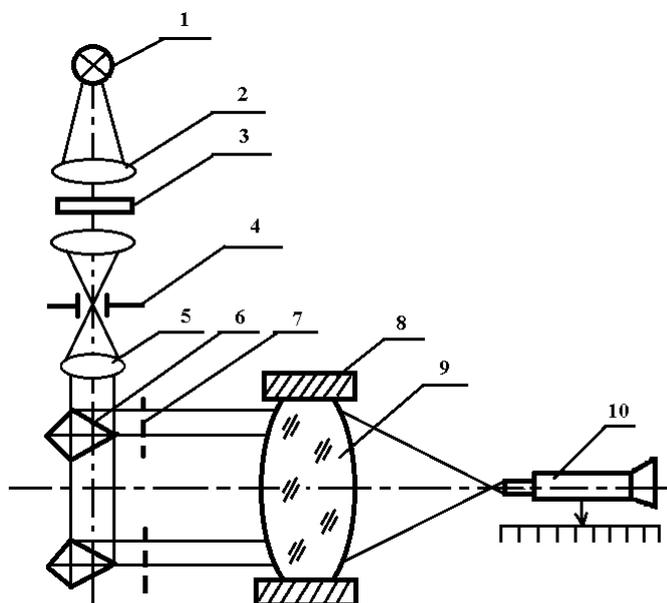
Для измерения продольной сферической aberрации объективов ГОСТ 20826-75 рекомендует использовать две схемы: для короткофокусных объективов с фокусным расстоянием до 3000 мм (рис. 3) и длиннофокусных (рис.4). Измерения производятся на оптической скамье. Метод основан на измерении расстояний вдоль оптической оси объектива между точками пересечения лучей, проходящих через выбранный ряд кольцевых зон входного зрачка. Положение точки пересечения луча с оптической осью определяется

путем совмещения дифракционных картин, каждая из которых образуется в плоскости изображения при прохождении узкого пучка лучей через две щели.



1 - источник света; 2 - конденсор; 3 - светофильтр; 4 - раздвижная щель; 5 - коллиматор; 6 - диафрагма с двумя парами параллельных щелей; 7 - объективодержатель; 8 - испытуемый объектив; 9 – микроскоп

Рис.3 Схема измерения aberrаций короткофокусных объективов



1 - источник света; 2 - конденсор; 3 - светофильтр; 4 - раздвижная щель; 5 - коллиматор; 6 - пентагональный отражатель; 7 - пара параллельных щелей; 8 - объективодержатель; 9 - испытуемый объектив; 10 – микроскоп

Рис.4 Схема измерения aberrаций длиннофокусных объективов

Точность воспроизведения профиля оптических деталей, обеспечение

необходимых световых характеристик является важной составляющей работы оптического прибора [9,10].

Целью данной работы является разработка универсальной установки, предназначенной для измерения зональных aberrаций зеркальных и линзовых объективов большого диаметра, находящих применение в световых приборах, концентраторах солнечной энергии, передающих и принимающих оптических систем оптико-электронных приборов, в отличие от рассмотренных схем для измерения продольных aberrаций или только отражателей, или только линз.

Схема разработанной установки, поясняющая ее принцип действия, приведена на рис.5.

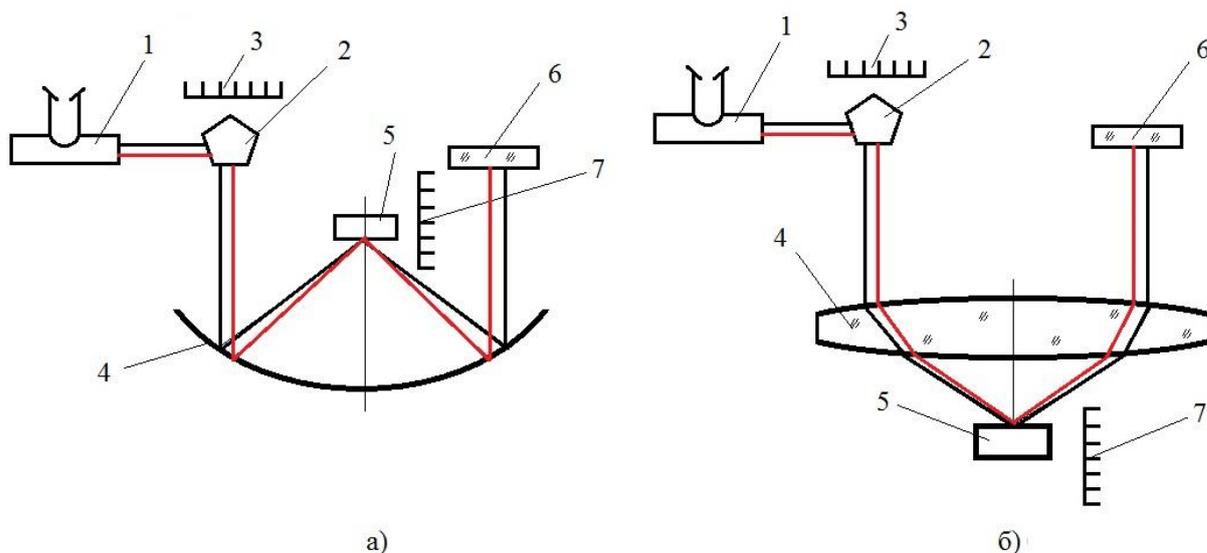


Рис.5. Схема измерений продольной aberrации  
зеркального (а) и линзового (б) объективов

Установка содержит: 1 – автоколлиматор – прибор для измерения малых углов; 2 – пентапризму – призму, сечением которой является пятиугольник. Две грани пентапризмы являются зеркальными; 3- шкалу с ценой деления 0,01 мм; 4 – исследуемый объектив (зеркальный или линзовый); 5 – зеркало, с помощью механического устройства способное поворачиваться на 180°; 6 – плоское зеркало; 7 – шкала, фиксирующая поворот зеркала 5.

Принцип работы установки заключается в следующем: параллельный пучок лучей, формируемый автоколлиматором 1, отклоняется пентапризмой 2 на угол  $90^\circ$  от первоначального направления и направляется на входной зрачок исследуемой оптической системы 4. После отражения (или преломления) световые лучи попадают на зеркало 5, установленное в фокальной плоскости объектива перпендикулярно оптической оси, и направляются на диаметрально симметричную часть оптической системы, а затем на зеркало 6. Это зеркало разворачивает лучи на  $180^\circ$  и направляет обратно по пройденному пути (на рис. 4 красная линия).

Наблюдая при помощи автоколлимационного окуляра тест-объект и его автоколлимационное изображение, перемещением зеркала 5 добиваются их совмещения. При нарушении круговой симметрии исследуемой оптической системы автоколлимация пучка обеспечивается поворотом зеркала 6.

Положение пентапризмы определяют по шкале 3 (координата  $y$ ) с точностью 0,01 мм. Смещение зеркала 5, измеряемое с такой же точностью по шкале 7, определяет продольную aberrацию  $\Delta f'$  исследуемой зоны.

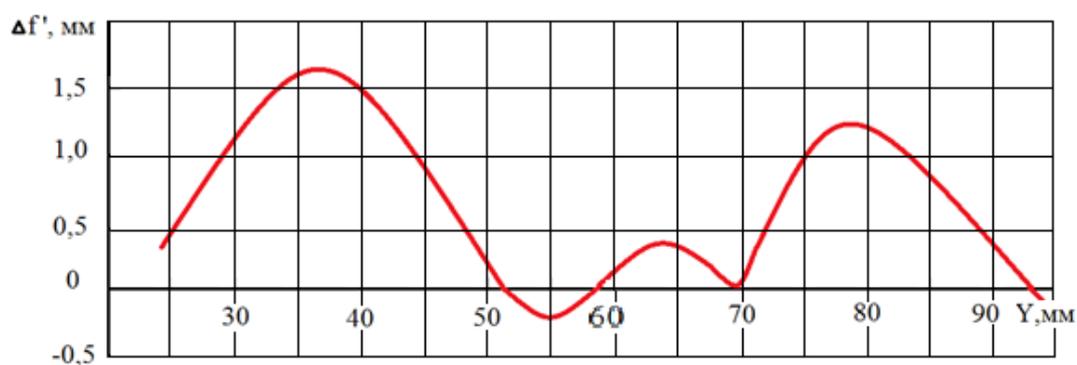


Рис.6. Аберрограмма параболического отражателя

При известном фокусном расстоянии  $f$  объектива значение угловой aberrации зоны рассчитывают по формуле:

$$\Delta\alpha' = \frac{\Delta f' \sin \sigma' \cos \sigma'}{f - \Delta f' \cos \sigma'}$$

где угловая координата зоны  $\sigma' = \arctg \frac{Y}{f}$ . Универсальность установки заключается в том, что способность зеркала 5 поворачиваться на  $180^\circ$  позволяет измерять продольные сферические aberrации и линзовых, и зеркальных объективов.

В качестве примера на рис.6 приведена измеренная aberрограмма параболоидного отражателя диаметром 200 мм с фокусным расстоянием 65 мм.

Данная информация может быть полезна при проектировании световых и оптических приборов.

---

### Литература

---

1. Можаров Г.А. Теория aberrаций оптических систем. - СПб: Издательство «Лань», 2013. - 288 с.
  2. Креопалова Г. В. Исследование и контроль оптических систем. – М.: Машиностроение, 1978. - 224 с.
  3. Костоев А.Т., Огородов Д.В., Данько Д.И. Исследование геометрических факторов зрительной иллюзии, возникающей при оценке расстояний между краями объектов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7770](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7770)
  4. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // IEEE Trans. Image Process. 2004. V. 13. № 4. P. 600–612. URL: [doi.org/10.1109/TIP.2003.819861](https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861)
  5. Berlich R., Stallinga S. Image based aberration retrieval using helical point spread functions // Applied Optics. 2020. V. 59. № 22. P. 6557–6572.
  6. Леонов Б.Г. Aberрограф новой конструкции. Сборник материалов Всесоюзной научно - технической сессии по светотехнике. М., Госэнергоиздат, 1948, с. 10.
  7. Тверьянович Э. В., Мадаев В. В. Испытания параболоидных концентраторов на aberрографе системы Леонова // Гелиотехника. 1974. № 3. С. 28-33.
-

8. Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н., Сазонов В.Н. Оптико-электронная система для измерения сферической аберрации //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана Сер. Приборостроение, 2018, № 6, с.112-122.

9. Красиловский В. Н., Тарнижевский Б. В., Тверьянович Э. В. Установка с секционированным фотоприемником и лазерным излучателем для определения точностных характеристик концентраторов солнечного излучения // Гелиотехника. 1978. № 1. С. 30—35.

10. Явна Д.В. Компьютерное моделирование зрительных механизмов группирования, избирательных к пространственным модуляциям контраста // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2009.

### References

1. Mozharov G.A. Teoriya aberracij opticheskix sistem. [Theory of aberrations of optical systems]. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2013. 288 p.

2. Kreopalova G. V. Issledovanie i kontrol` opticheskix sistem.[ Research and control of optical systems]. M.: Mashinostroenie, 1978. 224 p.

3. Kostoev A.T., Ogorodov D.V., Dan`ko D.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7770

4. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. IEEE Trans. Image Process. 2004. V. 13. № 4. pp. 600–612. URL: doi.org/10.1109/TIP.2003.819861

5. Berlich R., Stallinga S. Applied Optics. 2020. V. 59. № 22. pp. 6557–6572.

6. Leonov B.G. Aberrograf novej konstrukcii [Aberrograph of a new design]. Sbornik materialov Vsesoyuznoj nauchno - texnicheskoj sessii po svetotexnike. M., Gose`nergoizdat, 1948, p. 10.

7. Tver`yanovich E`. V., Madaev V. V. Geliotexnika. 1974. № 3. pp. 28-33.

8. Timashova L.N., Kulakova N.N., Sazonov V.N. Vestnik MGTU im. N.E`. Bauman Ser. Priborostroenie, 2018, № 6, pp.112-122.

---



9. Krasilovskij V. N., Tarnizhevskij B. V., Tver`yanovich E. V. Geliotexnika. 1978. № 1. pp. 30—35.

10. Yavna D.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2009](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2009).