

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ЦЕНТРИРОВАНИЯ ЛИНЗ ИЗ НЕПРОЗРАЧНЫХ В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА МАТЕРИАЛОВ

Николай Юрьевич Никаноров

Новосибирский приборостроительный завод, 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, зам. технического директора по оптическим системам и технологиям, тел. (383)236-77-83, e-mail: distrosya@ngs.ru

Алексей Дмитриевич Артемов

Новосибирский приборостроительный завод, 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, начальник отдела разработки электронных схем, тел. (383)226-46-50, e-mail: alexusnsk@gmail.com

Рассмотрена комбинированная методика центрирования оптических деталей, непрозрачных в видимой области спектра, в процессе результативной обработки оправы. Предлагаемая методика предполагает позиционирование одной из поверхностей линзы с контролем механическим методом, а второй поверхности – оптическим методом (методом коллимации) в плавающем патроне. В статье рассматриваются комбинированная методика центрирования и методика центрирования по двум трубкам Забелина, приводятся сравнительные результаты измерений децентрировок линз в оправках, центрированных данными методами.

Ключевые слова: центрирование линз, коллимационный метод, трубка Забелина, оптические детали для ИК-области спектра, сборка объективов.

COMBINED METHOD OF CENTERING LENSES OF OPAQUE IN THE VISIBLE SPECTRUM OF MATERIALS

Nikolai Y. Nikanorov

Novosibirsk Instrument-Making Plant, 179/2, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia, Deputy Technical Director for Optic Systems and Technologies, phone: (383)236-77-83, e-mail: distrosya@ngs.ru

Alexey D. Artemov

Novosibirsk Instrument-Making Plant, 179/2, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia, phone: (383)226-46-50, e-mail: alexusnsk@gmail.com

The mixed method of optical components which is nontransparent in visual spectral range during frame processing is discussed. The proposed method requires the following: one lens surface is positioned under mechanical control method and another lens surface is positioned under optical control method (collimation method) in floating holder. The article presents the comparison of the mixed method with centration method by two Zabelin tubes, and relative decentering measurements of lenses in frames centered by means of these methods.

Key words: lens centration, collimation method, Zabelin tube, optical components, IR spectral range, objective lenses assembly.

Введение

Одной из основных характеристик любой тепловизионной системы является дальность распознавания, на величину которой, помимо других факторов, напрямую влияют геометрические размеры чувствительного элемента приемника и относительное отверстие объектива. Уменьшение размеров чувствительного элемента и увеличение светосилы повышают дальность распознавания [1, 2]. Совершенствование технологии изготовления фотоприемных устройств, в том числе и неохлаждаемых болометрических матриц, обеспечивает в настоящее время серийное изготовление последних с размером пиксела не более 17 мкм [3, 4]. Кроме того, использование неохлаждаемых фотоприемных устройств снимает ограничение на увеличение апертуры объективов, так как отсутствует необходимость установки охлаждаемых диафрагм. Для наиболее полной реализации температурной и пространственной разрешающей способности указанных фотоприемных устройств необходимо применение объективов с относительным отверстием 1 : 1 и более, позволяющих обеспечить концентрацию энергии на элементе приемника на уровне 0,8. В связи с этим в объективах тепловизионных приборов резко ужесточаются требования к оптическим деталям и их взаимному расположению [5–7].

Одной из особенностей объективов, работающих в области длин волн от 8,0 до 14,0 мкм, является использование для изготовления оптических деталей материалов с большими показателями преломления, чем в видимой области спектра. Если показатели оптического бесцветного стекла имеют значения в пределах от 1,5 до 2,0, то у селенида цинка и халькогенидных стекол показатели преломления в рабочей области составляют от 2,4 до 2,8, а у германия – 4,0 [8–11].

Помимо этого, с целью обеспечения большой светосилы и высокого коэффициента пропускания оптические системы линзовых объективов тепловизионных приборов состоят из сферических и асферических линз, у которых отношение диаметра линзы к радиусу ее преломляющей поверхности может достигать более, чем 1 : 1.

Сочетание больших показателей преломления материалов и крутых радиусов линз приводит к тому, что центрирование линз в процессе сборки становится одним из определяющих факторов, влияющих на качественные характеристики изготавливаемых объективов [12–14].

Обзор существующих методов центрирования

Несмотря на то, что процесс центрирования оптических деталей, как в процессе изготовления, так и в процессе их сборки в изделия, является одной из важнейших составляющей технологического процесса, в литературе этому вопросу уделяется недостаточное внимание.

Одной из немногих работ на данную тему является диссертация Буй Динь Бао, в которой приведен анализ методов центрирования линз и линзовых систем [15].

Одним из распространенных способов сборки объективов, содержащих подвижные компоненты, обладающих высокими требованиями к центровке оптических деталей, работающих в широком интервале температур, в условиях серийного производства является насыпная сборка оптических деталей, вклеенных в оправы. При использовании данного метода осевое смещение линз и межлинзовые расстояния обеспечиваются за счет результативной обработки оправ линз, предварительно изготовленных с припуском на обработку, в номинальный размер в плавающем патроне. При этом для совмещения оптической оси оптической детали с осью вращения шпинделя используются различные модификации автоколлимационных методов [16–19].

Однако в работе [15] не представлены, по крайней мере, явно – методы центрирования линз из материалов, непрозрачных в видимой области спектра.

Традиционно на предприятии для центрирования в оправе деталей из германия и халькогенидных стекол использовался автоколлимационный метод с применением двух трубок Забелина (рис. 1, а). Одна из трубок Забелина поз. 1 устанавливалась в пиноль задней бабки токарного станка и была предназначена для получения автоколлимационного изображения C_B (рис. 1, б) от поверхности «Б» линзы поз 3.

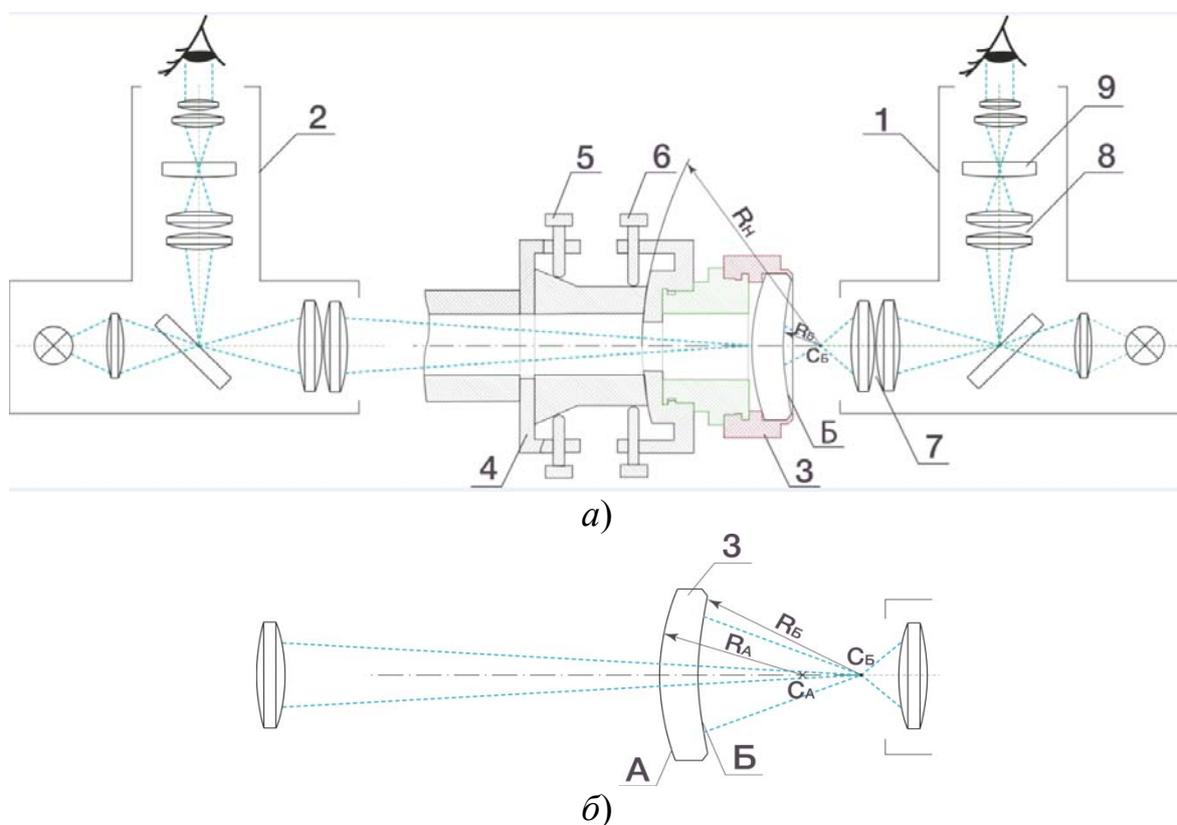


Рис. 1. Схематическое изображение метода центрирования линзы, непрозрачной в видимой области спектра, с применением двух трубок Забелина

Вторая трубка поз. 2 (рис. 1, а) устанавливалась на передней бабке и через отверстие в шпинделе станка и центрировочного патрона поз. 4 строила автоколлимационное изображение C_A (рис. 1, б) поверхности «А» линзы поз. 3. В процессе центрирования с помощью двух трубок Забелина необходимо с помощью винтов поз. 5, 6 (рис. 1, а) устранить биение автоколлимационных изображений. Вид поля зрения трубки Забелина представлен на рис. 2, где 1 – изображение марки автоколлимационного устройства, 2 – сетка микроскопа, 3 – изображение автоколлимационной точки, полученной от одной из поверхностей центрируемой линзы. Смещение изображения автоколлимационной точки получено при вращении шпинделя станка. Цель центрирования состоит в том, чтобы совместить изображение марки автоколлимационного устройства и изображения автоколлимационной точки, полученной от соответствующей поверхности.

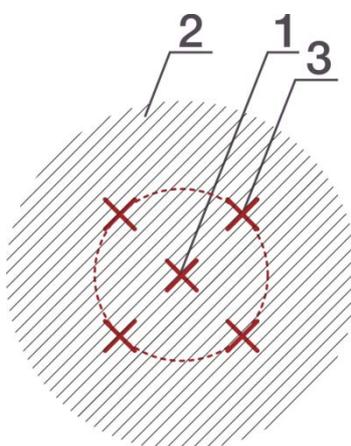


Рис. 2. Вид поля зрения трубки Забелина

При автоколлимационных измерениях значения децентрировки определяются по величине окружности, описываемой изображением автоколлимационной точки в плоскости изображения проекционного объектива поз. 7 (рис. 1, а) трубки Забелина при вращении детали, установленной в центрировочном патроне. Далее, изображения этой окружности с помощью объектива микроскопа поз. 8 с линейным увеличением 7,86 крат переносятся в плоскость измерительной сетки, по которой и осуществляется измерение значения децентрировки. Так как в основе работы трубки Забелина используется проекционный принцип, то цена деления сетки, расположенной в плоскости изображения объектива микроскопа, изменяется в зависимости от положения автоколлимационных точек относительно переднего фокуса объектива.

Цена деления сетки микроскопа рассчитывается, исходя из положения изображения автоколлимационной точки по следующей формуле:

$$C_i = (C_0 \cdot f_{об}) / (4z' \cdot \beta_M), \quad (1)$$

где C_i – текущее значение цены деления; C_0 – расстояние между штрихами сетки (равно 0,1 мм); $f_{об}$ – фокусное расстояние объектива (равно 30 мм); β_m – линейное увеличение объектива микроскопа (равно 7,83); z' – расстояние между точкой заднего фокуса объектива переменного увеличения и маркой сетки автоколлимационного устройства, которое можно вычислить по следующему соотношению:

$$z' = f_{об}^2 / z, \quad (2)$$

где z – расстояние от торца оправы трубки Забелина до изображения автоколлимационной точки.

Для трубки Забелина, установленной на передней бабке токарного станка, расстояние z составляет $850 \pm RA$, где RA – радиус поверхности A . Если поверхность вогнутая, то величина радиус вычитается, для выпуклой поверхности величина радиуса прибавляется.

Из анализа выражения (1) следует, что для случая установки трубки Забелина в переднюю бабку станка чувствительность метода, определяемая ценой деления сетки, снижается как минимум на порядок (для $R_A \ll 850$ мм) по сравнению с размещением трубки Забелина в задней бабке станка.

Этим обстоятельством и обусловлен основной недостаток данного метода. При позиционировании любых выпуклых поверхностей и вогнутых поверхностей с радиусами менее 60 мм с использованием трубки Забелина, установленной на передней бабке токарного станка, происходит резкое падение точности. Это вызвано тем, что расстояние до автоколлимационных точек становится более чем 800 мм. Так как система проекционная, то величина окружности, описываемая изображением автоколлимационной точки в пространстве предметов, перенесется в плоскость марки трубки Забелина с увеличением, значение которого обратно пропорционально расстоянию от торца оправы до изображения автоколлимационной точки. При этом цена деления микроскопа составляет не менее 50 мкм (для случая, когда $R_A \ll 850$ мм) в плоскости автоколлимационной точки измеряемой поверхности. В то время как при позиционировании поверхности B (рис. 1, б) по трубке Забелина, установленной в задней бабке, цена деления отсчетного устройства оставляет от 3 до 10 мкм для автоколлимационной точки этой поверхности.

Комбинированный метод центрирования

Для повышения точности центрирования с обеспечением одинаковой точности позиционирования обеих поверхностей линз предлагается комбинированный метод контроля положения оптической оси оптической детали при результативной обработке оправы.

Для его реализации было разработано и изготовлено специальное контрольно-юстировочное устройство (КЮУ), включающее в себя:

- гиперспектральный линзовый коллиматор, работающий в области от 0,4 до 9,0 мкм;
- матричное фотоприемное устройство, чувствительное в области длин волн от 8,0 до 12,0 мкм;
- персональный компьютер для визуализации процесса измерения и вычисления параметров децентрировки.

Использование данного КЮУ позволяет центрировать в проходящем свете оптические детали, непрозрачные в видимой области спектра, при этом точность контроля децентрировки увеличивается в три раза для такого материала как германий. Это подтверждается тем, что при переходе от разнотолщинности по краю детали к значению децентрировки учитывается показатель преломления материала центрируемой линзы [12]:

$$C = f'(n-1) \cdot \Delta t / D, \quad (3)$$

где C – значение децентрировки в мм; f' – заднее фокусное расстояние центрируемой линзы; n – показатель преломления материала линзы; Δt – значение разнотолщинности по краю; D – диаметр линзы, на котором задается измерение разнотолщинности.

Использование только оптического метода для позиционирования детали в плавающем патроне недостаточно, так как при этом не определено положение базовой поверхности. Поэтому процесс позиционирования разделили на два этапа.

На первом этапе поверхность Б (рис. 1 б) позиционировалась с применением механического способа контроля положения оси вращения, а именно, исключая биение поверхности линзы, контролируемое индикаторной головкой с погрешностью менее 0,01 мм на границе светового диаметра, за счет перемещения плавающей части центрировочного патрона поз. 4 винтами поз. 5 (рис. 1, а) в плоскости, перпендикулярной оси вращения шпинделя станка.

Вторым этапом позиционирования линзы является совмещение оси поверхности А (рис. 1, б) оптической детали с осью вращения шпинделя станка, с помощью поворота плавающей части центрировочного патрона винтами поз. 6 (рис. 1, а) по сферической поверхности. Параллельный пучок лучей, выходящий из гиперспектрального коллиматора, установленного на передней бабке центрировочного станка, фокусируется линзой на матрицу фотоприемного устройства, установленного в задней бабке станка. Наклон поверхности А центрируемой линзы контролируется по диаметру траектории изображения коллимационной точки, образуемой при вращении шпинделя станка, на матрице фотоприемного устройства. Для визуализации процесса используется монитор персонального компьютера.

Для процесса центрирования было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее:

- визуализировать изображение коллимационной точки и прорисовывать траекторию его перемещения при вращении шпинделя станка;

- для уменьшения погрешности, обусловленной дискретностью отсчетов, вычислять энергетический центр изображения коллимационной точки и обеспечить субпиксельное разрешение при его определении;
- вычислять значение децентрировки по заданным параметрам центрируемой линзы.

Сравнение полученных результатов

Для подтверждения правильности выбора метода центрирования были проведены сравнительные измерения децентрировки линз, отцентрированных двумя способами: первый – по двум трубкам Забелина (изготовлены раньше), второй – с использованием разработанного КЮУ. Требования к центрировке линз, указанные в конструкторской документации, составляли 0,01 мм.

Измерения производились с помощью разработанного КЮУ. Для установки проверяемых линз использовалась специальная оправка, у которой за одну установку изготавливались базовые поверхности – посадочный диаметр и опорный торец. Радиальное и осевое биения опорных поверхностей проверялись с помощью индикатора часового типа, и их значения не превышали 3 мкм.

Сравнительные результаты центрирования приведены в таблице.

Сравнительные результаты центрирования

Детали, центрированные с применением КЮУ		Детали, центрированные по двум трубкам Забелина	
№ детали	Децентрировка мм	№ детали	Децентрировка мм
1	0,02	7	0,52
2	0,03	8	0,53
3*	0,08	9	1,00
85	0,01	11	0,16
92	0,02	12	0,35
88	0,01	13	0,11
90	0,01	14	0,09
31	0,01	15	0,09
		16	0,32
		17	0,21

*Деталь центрировалась только по коллимации без выставления первой стороны с помощью индикатора.

Из деталей, отцентрированных с использованием КЮУ, были собраны 12 объективов. После сборки были проведены измерения частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) объективов на установке Image Master Universal компании Trioptics GmbH [20]. Измерения ЧКХ проводились для широкого осевого пучка в двух взаимно перпендикулярных сечениях, в которых ЧКХ приобретает наибольшее и наименьшее значения.

Так как в процессе изготовления и сборки оптическая система объектива из-за погрешностей центрирования приобретает некоторую децентрированность, то в изображении осевой точки к сферической аберрации и хроматизму положения изображения добавляются такие аберрации как кома, астигматизм и кривизна изображения осевого пучка в децентрированной системе [21]. Это приводит к тому, что изображение осевой точки становится асимметричным и появляются различия в значениях ЧКХ, измеренной в центре поля зрения по разным сечениям. Для краткости далее это различие в значениях ЧКХ назовем «осевым астигматизмом» и будем характеризовать коэффициентом осевого астигматизма ν , определяемым по формуле

$$\nu = (N_T - N_S) / N_T, \quad (4)$$

где N_T – значение ЧКХ для частоты 30 штрихов/мм в меридиональной плоскости; N_S – значение ЧКХ для частоты 30 штрихов/мм в сагиттальной плоскости.

По результатам измерения ЧКХ для собранных объективов был вычислен коэффициент осевого астигматизма. Этот же коэффициент вычислялся и для объективов, изготовленных ранее, детали для которых центрировались с использованием двух трубок Забелина.

На рис. 5 приведены графики распределения значений коэффициента осевого астигматизма от общего количества проверенных объективов. Кривая для объективов, собранных из линз, центрированных с применением комбинированного метода, показана зеленым цветом; кривая для объективов, собранных из линз, центрированных с использованием двух трубок Забелина, – красным.

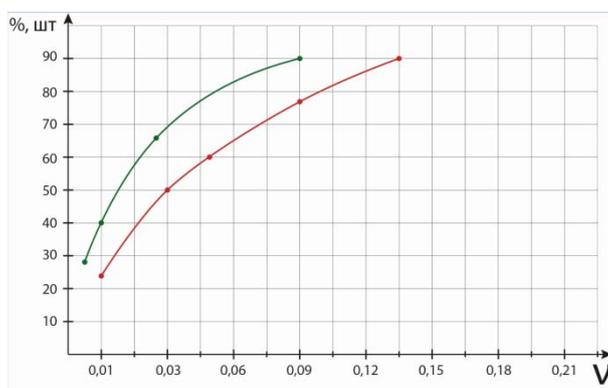


Рис. 4. Распределение количества объективов (в процентах от общего количества) в зависимости от значения коэффициента осевого астигматизма

Результаты измерений подтверждают, что в объективах, линзы которых центрировались с применением разработанного КЮУ, достигнута меньшая разница в значениях ЧКХ для центра поля зрения в меридиональной и сагиттальной плоскостях, что свидетельствует о более качественном устранении осевого астигматизма, обусловленного децентрировкой и наклоном линз.

Заключение

Использование комбинированного метода центрирования при результирующей обработке линз, вклеенных в оправу, позволяет повысить точность центрирования для линз с крутыми радиусами. Кроме того, разработанное КЮУ позволяет измерять значение децентрировки линзы после изготовления посадочных поверхностей. В отличие от метода с использованием двух трубок Забелина в комбинированном методе центрирования точность позиционирования поверхностей не зависит от радиуса преломляющей поверхности, а определяется ценой деления индикаторной головки, используемой для позиционирования первой поверхности, а также точностью определения энергетического центра коллимационного изображения на матрице фотоприемного устройства, используемого в КЮУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Учебное пособие для приборостроительных вузов. – 2 изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1983. – 696 с.
2. Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н. Реализация общетехнических и специальных требований при разработке малогабаритных тепловизионных приборов наблюдения и прицелов // Приборы – 2018. – № 1. – С. 43–50.
3. Матрицы тепловизионные [Electronic resource]. – Mode of access <http://npoamb.ru/catalog/matritsy/dld640/>.
4. Неохлаждаемые болометрические матрицы [Electronic resource]. – Mode of access <http://astrohn.com/wp-content/uploads/2019/02/naumov-ivk-09-mikrobolometry-2019.pdf>.
5. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М. : ЛОГОС, 2004. – 444 с.
6. Сенник Б. Н., Бельский А. Б., Потелов В. В. Современные тенденции в оптических технологиях, применяемых для улучшения выходных характеристик оптических и оптико-электронных систем // Оптический журнал. – 2009. – № 8. – С. 5–13.
7. Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. Исследование объективов для малогабаритных тепловизионных приборов с позиции модели двухкомпонентного объектива // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 245–261.
8. Зверев В. А. Оптические материалы / В. А. Зверев, Е. В. Кривоустова, Т. В. Точилина. – СПб. : НИУ ИТМО, 2009. – 244 с.
9. Оптические материалы и технологии / под ред. Н. К. Павлычевой. – Казань : Казанский гос. техн. ун-т им. А. П. Туполева, 2008. – 484 с.
10. ГОСТ 3514–94. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия.
11. Каталог оптических стекол SCHOTT [Electronic resource]. – Mode of access https://www.schott.com/d/advanced_optics/ab87a849-a666-4d91-bbfb-9cc578442ebe/1.0/schott-optical-glass-pocket-catalog-march-2014-rus.pdf.
12. Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения. – Л. : Машиностроение, 1989 – 234 с.
13. Мальцев М. Д. Расчет допусков на оптические детали. – М. : Машиностроение, 1974. – 168 с.
14. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов : учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2015. – 560 с.

15. Буй Динь Бао. Анализ и разработка методов центрирования линз и линзовых систем : дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2016.
16. Станция для центрирования линз в оправках ATS-200 компании Trioptics GmbH [Electronic resource]. – Mode of access <https://www.trioptics.com/products/alignment-turning-stations/ats-200/>.
17. Латыев С. М. Конструктивные и технологические методы обеспечения центрировки линзовых систем / С. М. Латыев, Д. М. Румянцев, П. А. Курицын // Оптический журнал. – 2013, № 3. – С. 92–96.
18. Ефремов А. А., Законников В. П., Подобрянский А. В., Сальников Ю. В. Сборка оптических приборов : учебник для средних профессионально-технических училищ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1983. – 319 с.
19. Справочник технолога-оптика / под ред. М. Н. Окатова. – СПб. : Политехника, 2004. – 680 с.
20. Установка Image Master Universal компании Trioptics GmbH [Electronic resource]. – Mode of access <https://www.trioptics.com/products/mtf/imagemasterrd-line/imagemasterr-universal/>.
21. Губель Н. Н. Аберрации децентрированных систем. – Л. : Машиностроение, 1975. – 272 с.

© Н. Ю. Никаноров, А. Д. Артемов, 2019