
КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

УДК 681.4.07

С. М. ЛАТЫЕВ, Буй Динь БАО

МЕТОДЫ ЦЕНТРИРОВКИ ЛИНЗ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены причины возникновения децентрировок линз в объективах, а также технологические и конструктивные методы их уменьшения и компенсации влияния на качество изображения.

Ключевые слова: центрировка линз и линзовых систем, компенсация децентрировок линз.

Децентрировки линз в оптических системах, особенно в объективах, существенно ухудшают качество создаваемого изображения. Наиболее значительное влияние они оказывают на величину такой аберрации, как „кома“. Выявление этой и других аберраций при сборке объективов обычно осуществляется по дифракционному изображению точечной диафрагмы.

На рис. 1 представлены схемы контроля качества изображения, формируемого фото- и микрообъективами, по дифракционному изображению точечной диафрагмы (а, б), а также виды дифракционных изображений при отсутствии и наличии различных аберраций (в—е).

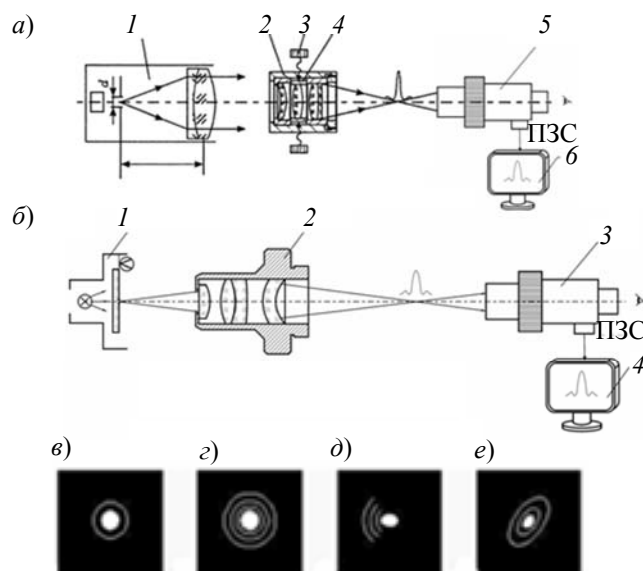


Рис. 1

Так, на рис. 1, а приведена схема контроля качества изображения, создаваемого фотообъективом 2, с помощью коллиматора 1, имеющего точечную диафрагму диаметром d , видеокамеры 5 и монитора 6. Компенсация влияния децентрировок осуществляется перемещением компонента 4 юстировочным винтом 3. Диаметр точечной диафрагмы коллиматора определяется из выражения

$$d \leq 120'' f' 5 \cdot 10^{-6} / D, \quad (1)$$

где f' — фокусное расстояние объектива коллиматора, D — диаметр входного зрачка фотообъектива.

Схема контроля качества изображения, создаваемого микрообъективом 2, по узлу 1 с точечной диафрагмой приведена на рис. 1, б (здесь 3 — видеокамера, 4 — монитор). Диаметр точечной диафрагмы в этом случае определяется исходя из дифракционной разрешающей способности контролируемого микрообъектива:

$$d \leq \lambda / (2A), \quad (2)$$

где λ — длина волны света, A — числовая апертура микрообъектива.

Изображение, представленное на рис. 1, б показывает присутствие в объективе комы, возникающей из-за технологических погрешностей изготовления и сборки его элементов.

Рассмотрим погрешности, возникающие в оптических и механических деталях и узлах объективов.

Одной из причин появления децентрировок является децентрировка собственно линз при их изготовлении. Под децентрировкой линзы в общем случае понимается смещение центра(ов) кривизны рабочей(их) поверхности(ей) относительно базовой оси линзы или перпендикулярность плоской рабочей поверхности линзы к ее базовой оси. Децентрировка задается позиционным допуском, разнотолщинностью по диаметру линзы или биением плоской поверхности [1]. Децентрировка линзы может привести при сборке к ее децентрировке относительно базовой оси оправы или корпуса объектива.

При склейке линз возникает децентрировка склейки, обусловленная децентрировкой склеиваемых компонентов, клиновидностью слоя клея, смещениями и наклонами приклеиваемой линзы относительно базовой оси склейки. При изготовлении оправы для линзы (склейки) также возникают погрешности, которые могут привести к децентрировке линзы относительно базовой оси оправы. Как правило, это погрешности расположения „гнезда под линзу“ (несоосность, биения, погрешности формы поверхностей и их шероховатость) относительно базовой оси оправы. В результате при креплении линзы (или склейки линз) в оправе такими способами, как приклеивание, завальцовка, резьбовое кольцо и др. [2] возникает ее децентрировка из-за погрешностей линз и оправ, а также радиальных смещений и наклонов линзы в посадочном зазоре.

Рассмотрим эти погрешности на примере соединения линзы с оправой приклеиванием. На рис. 2, а представлена упрощенная конструкция крепления в оправе плосковыпуклой линзы, а на рис. 2, б — двояковыпуклой. В первом случае требуется, чтобы центр кривизны сферической поверхности F линзы находился на базовой оси EA оправы (образованной ее базовыми поверхностями A и E), а плоская поверхность линзы была ей перпендикулярна. Однако из-за децентрировки самой линзы, наклона (биения) опорного фланца G оправы и его шероховатости, смещения линзы в зазоре посадки по диаметру D_1 и эксцентриситета отверстия $\varnothing D_1$ относительно базовой оси указанные требования не выполняются.

Во втором случае (см. рис. 2, б) требуется, чтобы центры кривизны обеих рабочих поверхностей линзы лежали на базовой оси оправы. Здесь смещение центров кривизны возникает из-за децентрировки самой линзы, наклона опорного фланца G , погрешности формы (грата) торцевой кромки, образованной поверхностью фланца G и отверстием $\varnothing D_2$ оправы, эксцентриситета отверстия $\varnothing D_2$ относительно базовой оси оправы и разворота (наклона) линзы в пределах зазора посадки по диаметру D_1 .

Переход от соединения по схеме, приведенной на рис. 2, а, к соединению по схеме рис. 2, б осуществляется при выполнении следующего условия:

$$D_2 / (2R_B) \geq \mu, \quad (3)$$

где μ — коэффициент трения материалов оправы и линзы, R_B — радиус опорной поверхности линзы (см. [2]).

Заметим, что не параллельность поверхности L оправы относительно базовой поверхности A не влечет за собой децентрировку данной линзы, но может в дальнейшем привести к наклону другого линзового узла, который сопрягается с этой поверхностью. Все перечисленные погрешности носят векторный характер, поэтому характеризуются не только величиной, но и направлением (азимутом разворота, вокруг базовой оси).

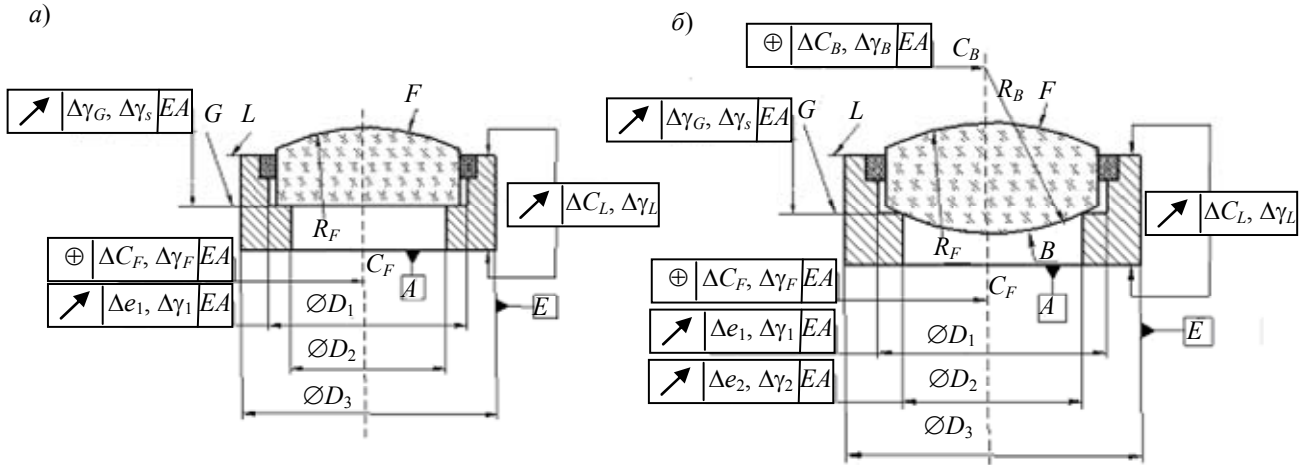


Рис. 2

Уменьшение этих погрешностей и компенсация их влияния на качество изображения при сборке линзы и оправы возможны путем юстировки линзы в оправе (при сдвиге или наклоне ее в увеличенном зазоре посадки относительно базовой оси оправы в процессе закрепления) либо результативной обработки наружных поверхностей оправы в номинальный размер с использованием в качестве базы оптической оси закрепленной линзы [2].

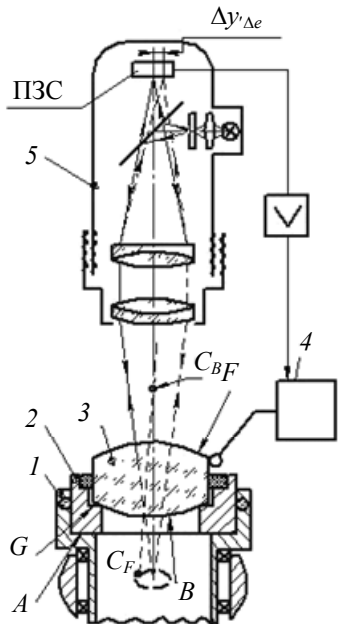


Рис. 3

Автоматизированное оборудование, имеющееся в настоящее время, позволяет осуществлять эти операции. Например, фирма TRIOPTICS (Германия) производит автоматизированную станцию OptiCentric [3], которая осуществляет центровку линзы 3 при ее вклейке в оправу 2 быстроотвердевающим клеем под действием ультрафиолетового излучения: см. рис. 3, здесь 1 — патрон (цанга) для крепления оправы, 4 — автоматизированный манипулятор для смещения линзы, 5 — автоматизированный автоколлиматор.

Недостаток этой и подобных станций заключается в том, что здесь производится центровка только одной поверхности линзы. Поэтому если опорный торец G не перпендикулярен базовой оси оправы или отверстие $ØD_2$ (для случая, подчиняющегося условию (3)) выполнено эксцентричным к базовой оси, то вторая (опорная) поверхность линзы остается децентрированной. Например, если опорный торец G имеет наклон (биение) на угол $Δφ$, то центр кривизны C_B поверхности B будет смещен относительно базовой оси оправы на величину

$$ΔC_B ≈ (R_B - h) Δφ,$$

где h — стрелка прогиба поверхности линзы при опоре на торец G .

Данные факторы обуславливают необходимость минимизации указанных погрешностей поверхности G и отверстия $ØD_2$ при изготовлении оправы. Кроме того, существенное влияние на точность центровки поверхности B имеет несоосность $Δe$ внутреннего диаметра патрона относительно оси его вращения в аэростатических подшипниках: $ΔC_B = Δe$.

На рис. 4, а, б соответственно представлены фотоизображение станции OptiCentric и конструкция проекционного объектива для рентгеновской аппаратуры, клейка и центрировка линзовых компонентов 1—7 которого осуществлены на этой станции, что позволило существенно повысить производительность сборки объектива и в ряде случаев исключить необходимость его юстировки для компенсации остаточных децентрировок компонентов.

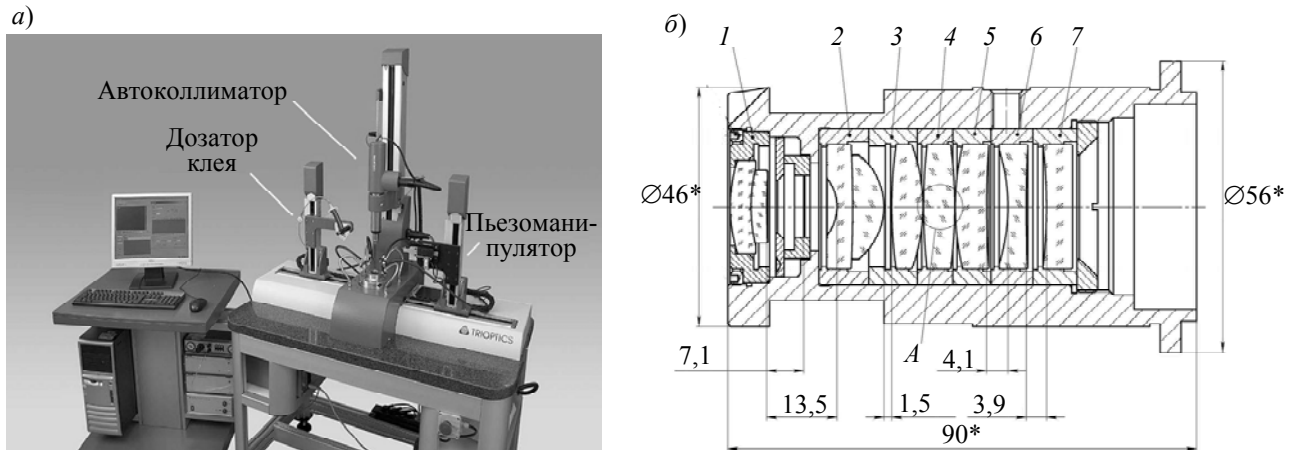


Рис. 4

Результативная обработка наружных поверхностей оправы позволяет получить более высокую точность центрировки линзы. Обработка осуществляется на специализированных станках (станциях), некоторые из которых снабжены также трехкоординатными измерительными устройствами, позволяющими определить погрешность линейных размеров оправы после ее обработки. На рис. 5 представлена функциональная схема подобного станка, используемого фирмой „Carl Zeiss“ (Германия) [4]; здесь 1 — шпиндель станка, 2 — патрон для автоматизированной центрировки оправы с линзой 3, 4 — „суппорт“ станции, содержащий автоколлиматор 5, щуп измерительной машины 6 и резец 7. Несмотря на возможность обеспечения на таких станках высокой точности центрирования отдельных линз (и склеек линз) в оправках, для ряда многокомпонентных высококачественных объективов (фотолитографических, фотограмметрических, проекционных) не удается достичь требуемого качества изображения из-за остаточных децентрировок линзовых компонентов, их радиального смещения в зазорах с корпусом и наклонов.

В таких объективах предусматривается конструктивная компенсация влияния децентрировок компонентов или взаимоцентрировка всех или отдельных компонентов в корпусе объектива. Схема унифицированной конструкции микрообъектива [5—7], в котором предусмотрена подобная юстировка, представлена на рис. 6. Здесь для компенсации влияния децентрировок линзовых компонентов при неавтоматизированной сборке микрообъектива предусмотрена возможность радиального смещения линзового компонента 1 с помощью технологических винтов, завинчиваемых в резьбовые отверстия общей оправы 2. При смещении этого компонента возникает aberrация противоположного знака, компенсирующая aberrацию (кому) из-за децентрировок других компонентов. Подробное описание конструкции унифицированного микрообъектива приведено в работе [8].

Так как процесс юстировки трудно автоматизировать, то при автоматизированной сборке микрообъектива предусмотрена установка каждого линзового узла с разворотом (вокруг оси отверстия общей оправы 2) на определенный угол, что обеспечивает отсутствие комы

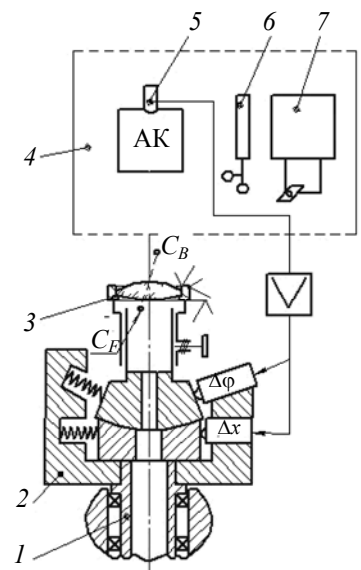


Рис. 5

в собранном микрообъективе. Естественно, что децентрировки оптических поверхностей линзовых компонентов узлов, а также погрешности, определяющие значение радиального смещения в зазорах, должны быть заранее измерены [7].

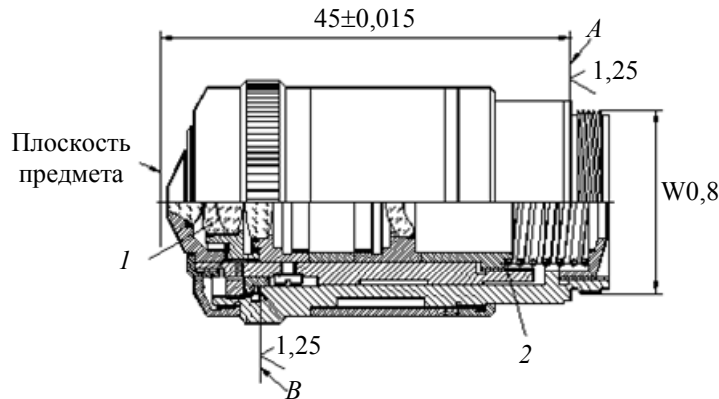


Рис. 6

В некоторых сложных объективах для обеспечения требуемого качества изображения достаточно центрировать при сборке только несколько компонентов. Примером такого решения может служить объектив „Агат-14“ (см. рисунок в таблице) с переменным фокусным расстоянием, содержащий 8 компонентов, в котором осуществляется взаимная центровка только трех последних компонентов, имеющих наибольшее значение коэффициента влияния A_q на кому (см. таблицу).

Поперечное сечение объектива	Номер поверхности	A_q	Номер поверхности	A_q
		1	$0,15 \cdot 10^{-2}$	10
2		$0,3 \cdot 10^{-6}$	11	0,15 мкм/рад
3		$0,3 \cdot 10^{-3}$	12	0,15 мкм/рад
4		$0,4 \cdot 10^{-3}$	13	$0,1 \cdot 10^{-1}$
5		$-0,44 \cdot 10^{-2}$	14	0,001 мкм/рад
6		$-0,7 \cdot 10^{-3}$	15	-0,44
7		$-0,6 \cdot 10^{-6}$	16	-0,39
8		$-0,46 \cdot 10^{-3}$	17	0,16
	9	$0,96 \cdot 10^{-2}$	18	0,57

Примеры центровки линзовых компонентов и компенсации влияния aberrаций посредством наклона и разворота компонентов объективов [2, 9] представлены на рис. 7, 8. Так, в конструкции зеркально-линзового телескопа Максутава (см. рис. 7) для центровки линзовых компонентов предусмотрен наклон зеркала 1 винтами 2.

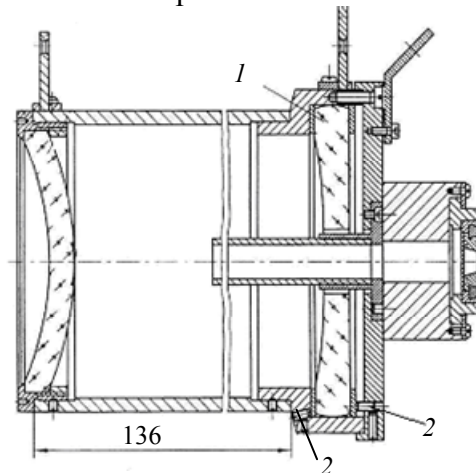


Рис. 7

Центрировка фотограмметрического объектива М. М. Русинова (см. рис. 8, а) осуществляется при развороте первого 1 и последнего 3 менисков относительно неподвижных средних компонентов — склеек 2, при этом суммарный вектор ΔC_{Σ} тангенциальной дисторсии равен нулю (см. рис. 8, б). Это возможно, если модуль одного из векторов не больше суммы модулей двух других.

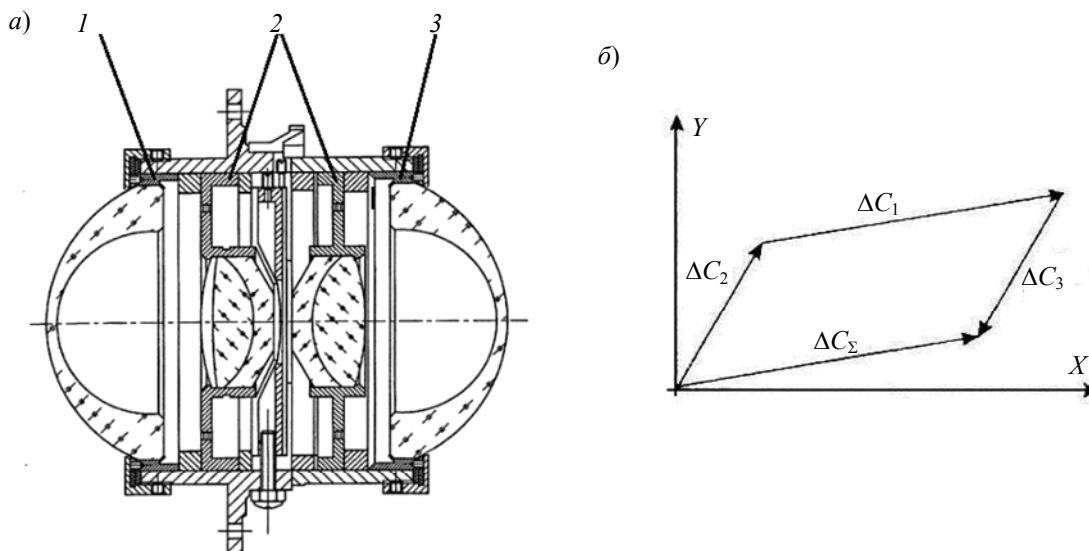


Рис. 8

На рис. 9, а, б [10] представлены „штабельные“ конструкции фотолитографических объективов, позволяющие осуществлять „последовательную“ центрировку компонентов при сборке с помощью радиального сдвига и разворота в пределах „бобовидных“ отверстий в оправе под шпильки или винты.

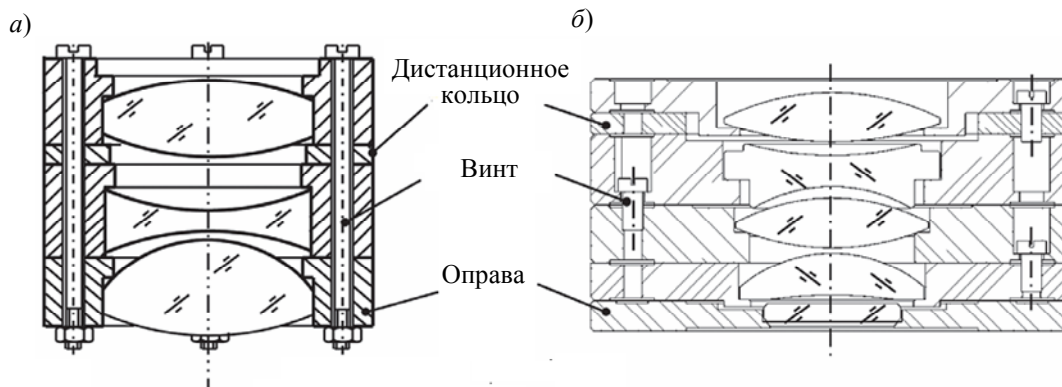


Рис. 9

Конструкция с винтами (рис. 9, б) является более рациональной и технологичной для осуществления центрировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2.412-81. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий. Введ. с 01.01.83. М.: Изд-во стандартов, 2002.
2. Латышев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб: Политехника, 2007. 580 с.
3. Automated Centering and Bonding Machine [Электронный ресурс]: <<http://www.trioptics.com>>.
4. Frank S. Justierdrehen- eine Technologie fuer Hohleistungsoptik // Bericht IMK. N 14; Techn. Univ. Ilmenau, 2008. 150 с.

5. Табачков А. Г., Латыев С. М., Фролов Д. Н. Унификация конструкций линзовых микрообъективов // Оптич. журн. 2011. № 1. С. 38—44.
6. Латыев С. М., Смирнов А. П., Фролов Д. Н. и др. Обеспечение целевых показателей качества при автоматизации сборки микрообъективов // Там же. 2010. № 1. С. 49—53.
7. Смирнов А. П., Латыев С. М. Математическая модель автоматизированной сборки микрообъективов // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11. С. 22—28.
8. Латыев С. М., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Резников А. С. Унификация оптических и механических конструкций линзовых микрообъективов // Там же. 2011. Т. 54, № 11. С. 14—21.
9. Латыев С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах. Л.: Машиностроение, 1985. 246 с.
10. Sondermann M. Mechanische Verbindungen zum Aufbau optischer Hohleistungssysteme // Bericht IMGK. В. 19; Techn. Univ. Ilmenau, 2011. 165 s.

Сведения об авторах

- Святослав Михайлович Латыев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; заведующий кафедрой; E-mail: smlatyev@yandex.ru
- Буй Динь Бао** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов

Поступила в редакцию
07.02.13 г.