

УДК 621.384.3

РАСЧЕТ ОБЪЕКТИВА МАЛОГАБАРИТНОГО ТЕПЛОВИЗОРА

Н.Н. Кулакова, С.В. Мишин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: nnkulakova@gmail.com; SvyatoslawMishin@yandex.ru

Тепловизионные приборы имеют широкую область применения. Однако их недостатками являются большие габаритные размеры и масса. Цель настоящей работы — расчет объектива для малогабаритного тепловизора с вероятностью обнаружения объектов на дальности более 500 м не менее 50%. Рассмотрена методика расчета объектива малогабаритного тепловизора, который проводился путем оптимизации конструктивных параметров выбранного объектива-аналога. Оптимизация, а также расчет допусков на изготовление объектива, его сборку и юстировку осуществлены с помощью программы Zemax. В результате была получена конструкция объектива, которая наряду с малыми габаритными размерами имеет высокотехнологичную конструкцию, что позволяет существенно расширить область применения тепловизоров.

Ключевые слова: объектив, тепловизор, аберрации, оптимизация, приемник излучения, пятно рассеяния.

CALCULATION OF A LENS FOR A SMALL-SIZE INFRARED CAMERA

N.N. Kulakova, S.V. Mishin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: nnkulakova@gmail.com; SvyatoslawMishin@yandex.ru

Thermal imaging units have a wide area of application. However, large dimensions and mass are their drawbacks. This work is aimed at the lens calculation for a small-size infrared camera with a probability of no less than 50% to detect objects at a distance of more than 500 m. A technique is considered for calculating a lens of the small-size infrared camera by means of optimization of structural parameters of the selected lens prototype. The optimization and also the calculation of tolerances for manufacturing the lens, its assembling and alignment are performed using the Zemax software. As a result, the lens structure is obtained that (in addition to small dimensions) has the hi-tech construction, which allows the sphere of application of thermal imaging units to be substantially broaden.

Keywords: lens, infrared camera, aberrations, optimization, emission receiver, spot of scattering.

В современном оптическом приборостроении широко распространены приборы, работающие в инфракрасной области спектра [1, 2]. Однако приборы, изготавливаемые отечественной промышленностью, имеют значительные массу и габаритные размеры. В связи с этим была поставлена задача расчета параметров малогабаритного тепловизора, общая длина которого не превышала бы 200 мм. Тепловизор представляет собой оптико-электронный прибор, преобразующий тепловое излучение спектрального диапазона $\lambda = 3 \dots 5$ мкм в видимое

излучение. Прибор предназначен для наблюдения теплового излучения различных объектов и их обнаружения. Таким образом, прибор может быть использован в нефтеперерабатывающей промышленности, энергетике, пищевых производствах, системах охраны [3].

Оптическая система прибора должна состоять из объектива и канала визуализации. Настоящая статья посвящена расчету параметров объектива малогабаритного тепловизора. В соответствии с техническим заданием (ТЗ) оптическая схема прибора имеет следующие характеристики:

Фокусное расстояние f' , мм	74
Угловое поле 2ω , град	5
Относительное отверстие D/f'	$\geq 1/2$
Спектральный диапазон λ , мкм	3...5
Общая длина оптической системы объектива $L_{об}$, мм	≤ 150
Минимальная обнаруживаемая разность температур ΔT , К	0,25
Дальность, мм:	
обнаружения	≥ 500
распознавания объекта L	352
Вероятность P обнаружения объекта на дальности более 500 м, %	50
Приемник излучения	64-элементная линейка фоторезисторов ФУР129Л с размерами чувствительного элемента $0,1 \times 0,1$ мм

Условия эксплуатации тепловизора:

- 1) безотказная наработка не менее 300 ч;
- 2) диапазон значений рабочей температуры $t_0 = -20 \dots +40^\circ \text{C}$;
- 3) тепловизор должен сохранять работоспособность при относительной влажности не более 80 % и температуре 20°C .

Методика расчета объектива малогабаритного тепловизора состоит из следующих этапов.

1. Выбор типа оптической схемы и значений параметров объектива (f' ; 2ω ; D/f' ; λ ; $L_{об}$), а также вероятности обнаружения объектов P и размеров чувствительного элемента приемника излучения. Значения перечисленных параметров объектива приведены в ТЗ.

Анализ патентных материалов, проведенных в работах [4–7], позволил определить структуру оптической схемы, применяемой для расчета объектива малогабаритного тепловизора. Представляет интерес вариант объектива, оптическая схема которого приведена на рис. 1. Конструктивно объектив состоит из двух групп менисковых линз. Первая группа — положительная линза 1 и отрицательная линза 2. Между

ними расположена апертурная диафрагма (АД). Первые поверхности линз являются выпуклыми. Вторая группа — положительная линза 3 и отрицательная линза 4. Линзы обращены друг к другу вогнутыми поверхностями. Группы линз разделены сканирующим зеркалом (СЗ). Параллельный пучок инфракрасного излучения попадает в первую группу линз. Далее пучок лучей падает на СЗ. Исходя из конструктивных соображений, оно расположено под углом 45° к оптической оси, что уменьшает габариты оптической системы прибора, а также дает возможность построчно сканировать объект. После зеркала излучение, пройдя вторую группу линз, попадает на приемник излучения (ПИ). Конструктивные параметры объектива-аналога приведены в табл. 1.

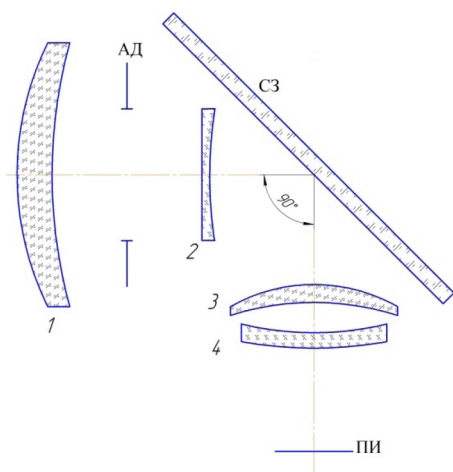


Рис. 1. Оптическая схема исследуемого объектива:

1–4 — линзы; АД — апертурная диафрагма; СЗ — сканирующее зеркало; ПИ — приемник излучения

Таблица 1

Значения конструктивных параметров объектива-аналога

Номер поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Показатель преломления	Материал	Световой диаметр, мм
1	72,780	6,0	3,42530	Кремний 1А2 КЭФ 25/2,5–76	60,6
2	108,898	34,0	1,00000	Воздух	60,6
3	219,788	3,0	4,02475	Германий ГМО–1–40	36,8
4	74,461	50,0	1,00000	Воздух	35,4
5	44,164	5,0	3,42530	Кремний 1А2 КЭФ 25/2,5–76	47,8
6	86,088	7,5	1,00000	Воздух	46,8
7	–79,055	3,0	1,41099	Флюорит	45,4
8	–204,200	24,8	1,00000	Воздух	41,9

2. Использование в качестве критерия качества изображения объектива диаметр пятна рассеяния. Для определения значения указанного диаметра воспользуемся теоремой Джонсона [3], согласно которой для обнаружения объектов с вероятностью P не менее 50 % объектив

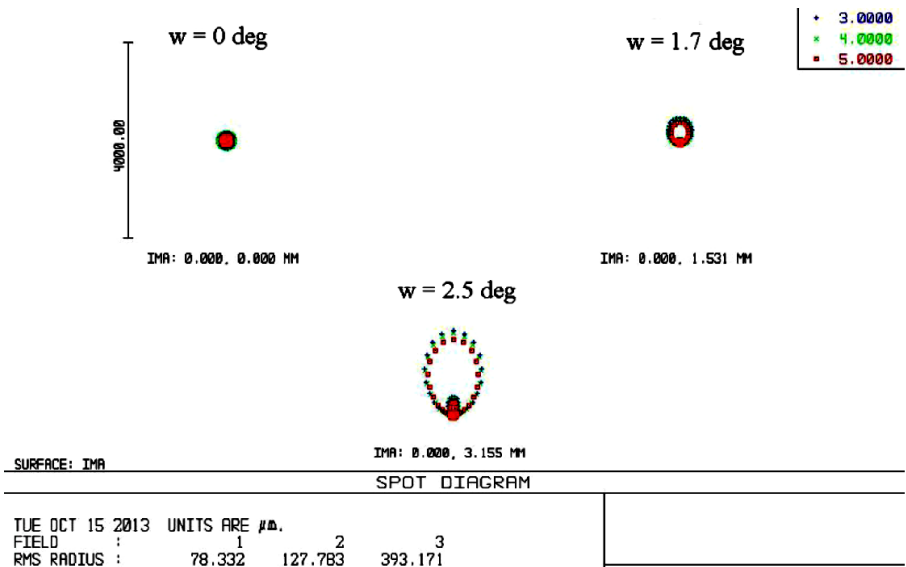


Рис. 2. Диаграммы пятна рассеяния исходного объектива (RMS Radius – среднеквадратический радиус пятна рассеяния, мкм)

должен формировать пятно рассеяния, которое будет охватывать не менее двух чувствительных элементов приемника излучения. Таким образом, пятно рассеяния рассчитываемого объектива должно иметь диаметр 0,2 мм.

3. Анализ aberrаций объектива-аналога. Расчет aberrаций выполнен по программе Zemax [8]. Диаграммы пятна рассеяния представлены на рис. 2; поперечная сферическая aberrация для точки на оси — на рис. 3, а, поперечные aberrации для точки вне оси — на рис. 3, б.

Результаты расчета показали, что объектив-аналог хотя и имеет малые габаритные размеры, но качество его изображения не соответствует установленному критерию. Согласно рис. 2, диаметр пятна рассеяния составляет 0,6 мм, а требуемое значение должно быть равно 0,2 мм.

4. Поиск оптимального решения оптической схемы объектива с помощью синтеза объектива на основе различных моделей оценочных функций с применением прикладной программы Zemax, которая позволяет проводить анализ и оптимизацию оптических систем различного назначения [8]. В программе имеется возможность оценки качества изображения по выбранному в рассматриваемой методике расчета критерию качества изображения. Этому критерию в программе соответствует среднеквадратический радиус пятна рассеяния (RMS Spot Radius).

Для оптимизации были выбраны операторы, которые контролируют при расчете заданные значения поперечной сферической aberrации, комы, заднего фокусного расстояния и общей длины оптической

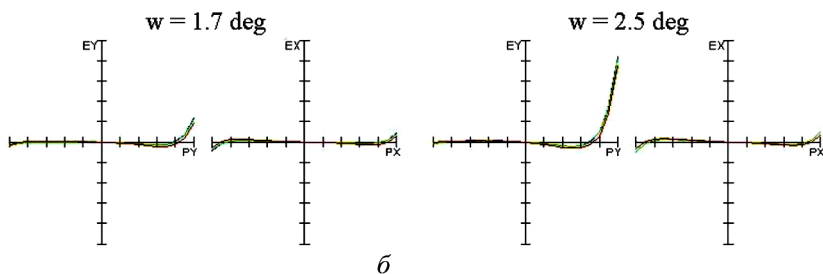
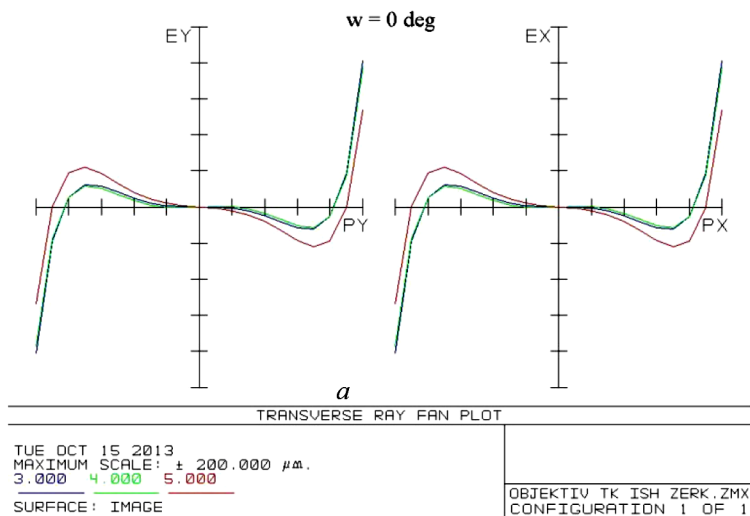


Рис. 3. Поперечная сферическая aberrация $\Delta y'$ для точки на оси (а) (масштаб графика по осям ± 2000 мкм) и поперечные aberrации для точки вне оси (б) (масштаб графика по осям ± 200 мкм):

PY, PX — относительные координаты во входном зрачке

системы. Это операторы TRAC, COMA, EFFL и TOTR соответственно. Для операторов TRAC (поперечная сферическая aberrация) и COMA (меридиональная кома) значения равны нулю, для оператора EFFL (заднее фокусное расстояние) — 74 мм, для оператора TOTR — 135 мм.

Вычисление значения критерия проведено для центра тяжести лучей в каждой точке поля. Центр тяжести лучей в программе обозначен Centroid. Алгоритм оптимизации минимизирует оценочную функцию, состоящую из приведенных выше операторов оптимизации.

В программе Zemax в меню Editors (редакторы) присутствует пункт Default Merit Function (задание оценочной функции оптимизации), с помощью которого появляется таблица с выбранными операторами оптимизации и их значениями. В этой таблице необходимо указать требуемые значения операторов, которые должны быть получены при оптимизации. После проведения оптимизации были определены конструктивные параметры объектива (табл. 2).

Значения таких параметров объектива, как f' , 2ω , D/f' , λ и $L_{об}$ соответствуют значениям, приведенным в ТЗ.

Расчетные значения конструктивных параметров объектива

Номер поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Показатель преломления	Материал	Световой диаметр, мм
1	96,350	6,0	3,42530	Кремний 1А2 КЭФ 25/2,5–76	48,3
2	185,667	34,0	1,00000	Воздух	46,6
3	-939,476	3,0	4,02475	Германий ГМО-1-40	26,4
4	144,037	50,0	1,00000	Воздух	26,1
5	58,394	5,0	3,42530	Кремний 1А2 КЭФ 25/2,5–76	34,2
6	175,204	7,5	1,00000	Воздух	33,0
7	-70,507	3,0	1,41099	Флюорит	28,1
8	-120,772	24,8	1,00000	Воздух	28,4

5. Оценка качества изображения рассчитанного объектива по заданному критерию. Характеристики качества рассчитанного объектива представлены на рис. 4 и 5.

Согласно анализу представленных графиков, диаметр пятна рассеяния составляет 0,05 мм. Полученное значение существенно ниже требуемого (0,2 мм). Как следует из теории Джонсона, при таком диаметре пятна рассеяния не будет обеспечена заданная вероятность обнаружения $P = 50\%$. Однако такое значение диаметра (0,05 мм) дает идеальная оптимизированная система. Поэтому было принято решение рассчитать диаметр пятна рассеяния для реальной системы, т.е. с учетом погрешностей изготовления, сборки и юстировки элементов объектива.

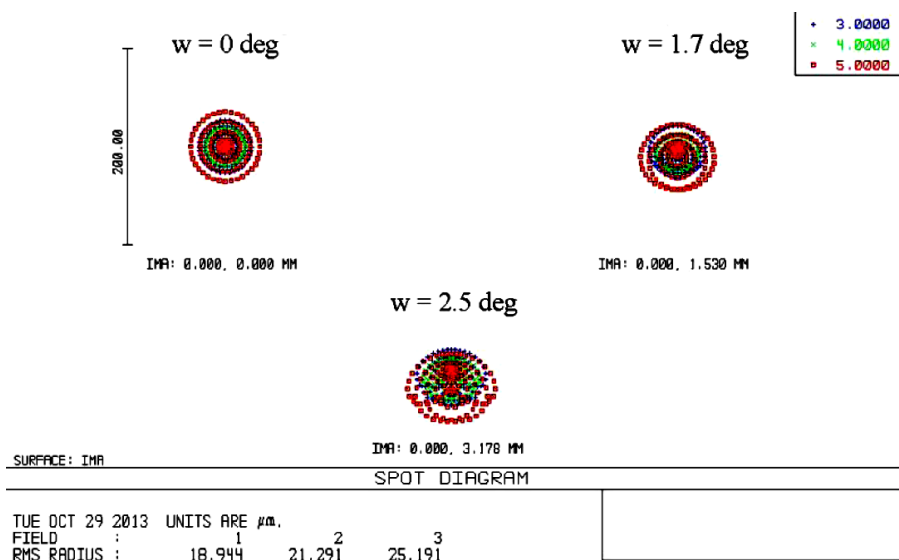
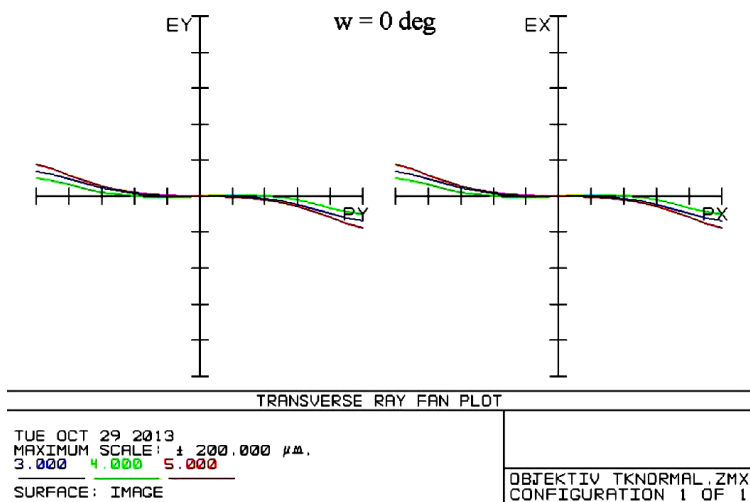
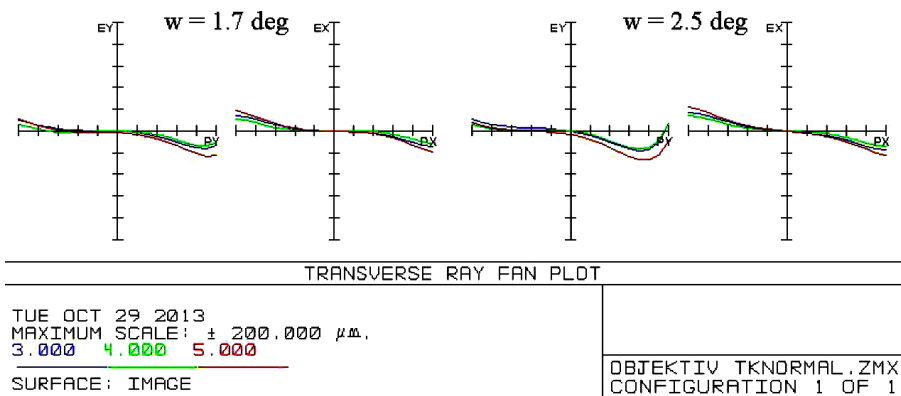


Рис. 4. Диаграммы пятна рассеяния исходного объектива (RMS Radius – среднеквадратический радиус пятна рассеяния, мкм)



a



б

Рис. 5. Поперечная сферическая аберрация $\Delta y'$ для точки на оси (а) (масштаб графика по осям ± 200 мкм) и поперечные аберрации для точки вне оси (б) (масштаб графика по осям ± 200 мкм):

PY, PX — относительные координаты во входном зрачке

6. Расчет критерия качества изображения объектива с учетом допусков на его изготовление по методике, описанной в работе [9]. Результаты расчета допусков на конструктивные параметры рассчитанного объектива приведены ниже:

Допуск:

на радиусы кривизны поверхностей линз	
при $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$	Пять колец Ньютона
толщину линз, мм	$\pm 0,2$
толщину воздушных промежутков, мм	$\pm 0,5$
децентрировку поверхностей в линзах, мм	$\pm 0,1$
децентрировку линз в оправках, мм	$\pm 0,1$
наклон линз в оправках, угл. мин	$\pm 3,0$

Оценка результатов показала, что рассчитанный объектив с указанными диапазонами значений допусков обеспечивает требуемое значение диаметра пятна рассеяния, а следовательно, и заданную вероятность обнаружения объектов. Значения допусков показывают, что их можно получить в современном оптическом производстве [10, 11]. Согласно исследованиям, объектив, изготовленный с указанными допусками, формирует пятно рассеяния диаметром 0,2 мм (в соответствии с ТЗ). Кроме того, в процессе оптимизации были сохранены малые габаритные размеры оптической системы объектива. Таким образом, предлагаемая методика позволила рассчитать параметры объектива малогабаритного тепловизора, которые полностью удовлетворяют всем требованиям ТЗ. В заключение следует отметить широкие возможности программы Zemax, позволяющей проектировать, модернизировать и анализировать оптические системы различного назначения, что было доказано на примере расчета рассмотренного объектива малогабаритного тепловизора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бодров С.В. Методика расчета тепловизионного объектива // Электронный научно-технический журнал “Наука и образование”. 2012. № 6. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/445463.html>. DOI: 10.7463/0612.0445463 (дата обращения: 15.10.2013).
2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение; пер. с франц. М.: Мир, 1988. 452 с.
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы “смотрящего” типа. М.: Логос, 2004. 452 с.
4. Teraoka K., Fujii A., Izumi T. Lens unit and vehicle-mounted infrared lens unit. Patent No. US8456769 B2 Sumitomo Electric Industries, Ltd., Japan, Nov. 26, 2009.
5. Izumi T., Hiraiwa C. Infrared lens, infrared camera and night vision. Patent No. EP1980888 A1 Sumitomo Electric Industries, Ltd., Japan, Oct. 15, 2008.
6. Hiraiwa C., Izumi T. Infrared zoom lens and infrared camera with three lens groups. Patent No. EP2309298 A1 Sumitomo Electric Industries, Ltd., Japan, Apr. 13, 2011.
7. Watanabe Y., Ando Minoru., Kawaguchi K. Infrared Lens. Patent No. US20120212808 A1 Tamron Co, Ltd., Japan, Aug. 23, 2012.
8. ZEMAX Optical Design Program. User’s Guide. Version February 22, 2008. ZEMAX Development Co., 2008, 732 p.
9. Кулакова Н.Н., Мишин С.В. Расчет допусков объектива тепловизионной системы // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optical/831.html> (дата обращения: 15.10.2013).
10. Сокольский М.М. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 221 с.
11. Справочник технолога-оптика / Под ред. М.А. Окатова. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.

REFERENCES

- [1] Bodrov S.V. Method of calculating a thermal lens. *Elektr. Nauchno-Tehn. Izd. “Наука и образование” MGTU im. N.E. Bauman* [El. Sc.-Tech. Publ. “Science and Education” of Bauman MSTU], 2012, no. 6. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/445463.html> (accessed 15.10.2013) (in Russ.). DOI: 10.7463/1013.0612563

- [2] Gaussorgues Gilbert. La Thermographie Infrarouge. Principes-Technologie-Applications. 4 Éd. Paris, Lavoisier, 1999. 586 p. (Russ. Ed.: Gossorg Zh. Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tekhnika, primenenie [Gossorg J. Infrared thermography. Fundamentals, techniques, application]. Moscow, Mir Publ., 1988. 452 p.).
- [3] Tarasov V.V., Iakushenkov Iu.G. *Infrakrasnye sistemy "smotriashchego tipa"* [Infrared systems of "looking" type]. Moscow, Logos Publ., 2004. 443 p.
- [4] Teraoka K., Fujii A., Izumi T. Lens unit and vehicle-mounted infrared lens unit. Patent US, no. 8456769, 2009.
- [5] Izumi T., Hiraiwa C. Infrared lens, infrared camera and night vision. Patent EP, no. 1980888, 2008.
- [6] Hiraiwa C., Izumi T. Infrared zoom lens and infrared camera with three lens groups. Patent EP, no. 2309298, 2011.
- [7] Watanabe Y., Ando Minoru., Kawaguchi K. Infrared Lens. Patent US, no. 20120212808, 2012.
- [8] ZEMAX Optical Design Program. User's Guide. Version February 22, 2008. ZEMAX Development Co., 2008. 732 p.
- [9] Kulakova N.N., Mishin S.V. Tolerances calculating of the lens of thermal vision system. *Elektr. nauchno-tehn. Izd. "Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii" MGTU im. N.E. Baumana* [El. Sc.-Techn. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation" of Bauman MSTU], 2013, no. 7. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optical/831.html> (accessed 15.10.2013) (in Russ.).
- [10] Sokol'skij M.M. Dopuski i kachestvo opticheskogo izobrazhenija [Tolerances and quality of the optical image]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989. 221 p.
- [11] Okatov M.A., Antonov Je A., Bajgozhin A., Bakaev M.I., Belova I. V., Bubishi I.Ja., Vejdenbah V.A., Voroncova N M., Danilov S.V., Dudkina N.Ju., Duhopel I I., Kuznecov S.M., Kukleva Z.A., Listratova G.V., Lodygin B.I., Lysjanyj Ju.K., Ljubarskij S.V., Mihajlov A.V., Nazarova V.Ja., Ponfilenok E.I., Petrov B.I., Petrovskij G.T., Povesshenko V.P., Pridatko G.D., Prohorchik S.M., Savushkin V.N., Sokolova R.S., Sujkovskaja G.G., Tarnovskaja L.V., Torbin I.D., Cherezova L.A., Chunin B.A., Shatilov A.V., Shepurev Je.I., Shirokshina Z.V., Jagmurov V.X. *Spravochnik tehnologa-optika* [Reference book of technologist-opticist] Spb, Politehnika Publ., 2004. 679 p.

Статья поступила в редакцию 12.12.2013

Надежда Николаевна Кулакова — канд. техн. наук, доцент кафедры "Оптико-электронные приборы научных исследований" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 40 научных работ в области оптико-электронного приборостроения.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

N.N. Kulakova — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of "Optic-Electronic Research Instruments" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 40 publications in the field of optic-electronic instrument engineering.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Святослав Валерьевич Мишин — студент кафедры "Оптико-электронные приборы научных исследований" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух научных работ в области оптико-электронного приборостроения.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

S.V. Mishin — student of "Optic-Electronic Research Instruments" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of two publications in the field of optic-electronic instrument engineering.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.