

ПАССИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ АТЕРМАЛИЗАЦИЯ ИНФРАКРАСНОГО ТРЕХЛИНЗОВОГО АХРОМАТА

© 2014 г. В. М. Тягур*, канд. техн. наук; О. К. Кучеренко**, канд. техн. наук;
А. В. Муравьев**, аспирант

*Предприятие специального приборостроения “Арсенал”, Киев, Украина

**Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, Украина

E-mail: stals98@ukr.net

Разработана методика компенсации температурного влияния на качество изображения объективов, работающих в инфракрасном диапазоне спектра, для случая однородного температурного распределения в системе. При использовании пассивной оптической атермализации возможна одновременная минимизация аберраций изображения, определяемая техническими требованиями к оптической системе. Предложена методика создания атермализованной ахроматической трехкомпонентной оптической системы путем подбора необходимой комбинации материалов и расчета конструктивных параметров объектива. Рассмотрены примеры использования возможных комбинаций атермализованных ахроматических триплетов для инфракрасной области спектра в диапазоне длин волн 8–14 мкм, а также приведена оптическая система объектива, рассчитанного на основе разработанной методики.

Ключевые слова: атермализация, трехлинзовый ахромат, инфракрасный триплет.

Коды OCIS: 220.3620, 220.1000, 120.6810

Поступила в редакцию 17.07.2013

Введение

Инфракрасная (ИК) техника находит широкое применение в различных сферах деятельности человека: научных исследованиях, военном деле, в народном хозяйстве. Приборы, работающие в ИК диапазоне спектра, часто эксплуатируются в сложных условиях окружающей среды. В первую очередь это относится к температурному диапазону, который согласно техническим требованиям может достигать $\pm 60^\circ$. Исходя из этого, одной из важных задач при проектировании объективов ИК приборов является задача сохранения их основных характеристик при колебаниях температуры.

Температурные колебания приводят к изменению конструктивных параметров оптической системы и, как следствие, к терморасфокусировке и появлению термоаббераций в изображении. Вопросам проектирования термнезависимых объективов посвящен ряд научных публикаций. Например, в работах [1, 2] рассмотрены методы оптико-механической пассивной атер-

мализации оптических систем. Однако алгоритму пассивной оптической атермализации уделено мало внимания. Работа [3] содержит примеры конструкций термокомпенсаторов и методики их расчета. В работе [4] рассмотрен анализ термоаббераций различных оптических систем. Анализ этих публикаций свидетельствует о том, что наибольшее внимание уделено методам оптико-механической атермализации, в то время как использование методик пассивной оптической атермализации позволяет достичь термостабилизации изображения фокусирующего узла без дополнительного усложнения конструкции, обеспечивает высокую точность и надежность работы объектива и снижение его массогабаритных характеристик.

В особенности преимущество оптических методов сказывается тогда, когда вклад механических элементов конструкции в терморасфокусировку может быть сведен к минимуму за счет применения материалов с пренебрежимо малым значением температурного коэффициента линейного расширения для механических деталей

оправ и корпуса. На сегодняшний день существуют только общие рекомендации, которыми можно воспользоваться при проектировании атермализованных объективов, в то время как вопрос о математических алгоритмах пассивной оптической атермализации остается открытым.

Постановка задачи

При проектировании объективов ИК техники разработчиками широко применяются трехкомпонентные оптические системы. Эти системы позволяют получить хорошее качество изображения без использования асферических поверхностей. В то же время задача сохранения качества изображения в широком температурном диапазоне в большинстве таких композиций остается нерешенной.

Данная работа посвящена разработке математического аппарата, позволяющего проектировать атермализованные ахроматические ИК триплеты с возможностью одновременной минимизации аберраций изображения, на которые вводятся ограничения, для случая однородного температурного распределения в оптической системе.

Результаты исследования и их обсуждение

Методика расчета атермализованного ахроматического ИК триплета основана на том, что при выборе материалов трех линз необходимо вычислить оптические силы Φ_{1-3} компонентов, решая систему трех уравнений для выполнения следующих условий:

– условие масштаба [1]

$$h_1\Phi_1 + h_2\Phi_2 + h_3\Phi_3 = 1, \quad (1)$$

– условие исправления хроматизма положения

$$h_1^2\Phi_1/v_1 + h_2^2\Phi_2/v_2 + h_3^2\Phi_3/v_3 = 0, \quad (2)$$

– условие атермализации, т.е. сохранения размера заднего фокального отрезка $S'_{F'}$ в заданном температурном диапазоне при условии, что вклад деформации корпуса в терморасфокусировку пренебрежимо мал

$$S'_{F'} = S'_{F'_{\text{термо}}} \quad \text{или} \quad h_3 = h_{3_{\text{термо}}}, \quad (3)$$

где h_{1-3} – высоты первого вспомогательного нулевого луча (ВНЛ) на оптических компонентах

системы, v_{1-3} – коэффициенты дисперсии материалов оптических компонентов.

Расчет атермализованного ахроматического трехкомпонентного ИК объектива основывается на следующих исходных данных:

– показатели преломления воздушных промежутков $n_1 = n_3 = n_5 = n_7 = 1$,

– показатели преломления материалов первого, второго и третьего компонентов объектива n_2, n_4 и n_6 ,

– термооптические постоянные первого, второго и третьего материалов компонентов объектива V_{t1-3} , где $V_t = \beta_\lambda/(n-1) - \alpha$, β_λ – температурный коэффициент приращения показателя преломления материала на длине волны излучения λ , α – температурный коэффициент линейного расширения материала,

– расстояния между оптическими компонентами d_1 и d_2 ,

– высота первого ВНЛ на первом компоненте $h_1 = 1$,

– высота второго ВНЛ $y_1 = 0$.

Для системы с оптической силой Φ_{sys} , состоящей из трех бесконечно тонких линз, находящихся в воздухе, размер заднего фокального отрезка $S'_{F'}$ равен

$$S'_{F'} = [1 - \Phi_1(d_1 + d_2) - \Phi_2d_2(1 - \Phi_1d_1)] / \Phi_{\text{sys}}. \quad (4)$$

Во избежание усложнения выражения для изменения заднего фокального отрезка учитываем влияние изменения температуры только на оптические силы компонентов и общую оптическую силу системы. Оптические силы компонентов при изменении температуры на Δt градусов определяются соотношением

$$\Phi_{i_{\text{термо}}} = \Phi_i(1 + V_{ti}\Delta t), \quad (5)$$

где i – номер компонента в оптической системе.

Тогда оптическая сила всей системы с учетом температурного изменения сил отдельных компонентов будет определяться как

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{sys termo}} = & \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t) + \Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t) + \Phi_3(1 + V_{t3}\Delta t) - \\ & - \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t)d_1[\Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t) + \Phi_3(1 + V_{t3}\Delta t)] - \\ & - \Phi_3(1 + V_{t3}\Delta t)d_2[\Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t) + \Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t) - \\ & - \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t)\Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t)d_1]. \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом того, что последний угол первого ВНЛ с оптической осью системы $\sigma_4 = 1$, имеем $S'_{F'} = h_3$. На основании этого равенства и уравнений (4–6)

получаем выражение для температурного изменения заднего фокального отрезка

$$S'_{F'} - S'_{F'_{\text{термо}}} = h_3 - \{1 - \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t)(d_1 + d_2) - \Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t)d_2 \times \\ \times [1 - \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t)d_1]\} / \{\Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t) + \\ + \Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t) + \Phi_3(1 + V_{t3}\Delta t) - \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t)d_1 \times \\ \times [\Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t) + \Phi_3(1 + V_{t3}\Delta t)] - \\ - \Phi_3(1 + V_{t3}\Delta t)d_2[\Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t) + \Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t) - \\ - \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t)\Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t)d_1]\}. \quad (7)$$

Высоты первого ВНЛ на втором и третьем компонентах системы определяются выражениями

$$h_2 = (1 - \Phi_1 d_1), \quad (8)$$

$$h_3 = [1 - \Phi_1 d_1 - d_2(\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)]. \quad (9)$$

Значения оптических сил в выражениях (8, 9) приведены без учета температурного влияния, поскольку ранее было принято допущение не учитывать изменения расстояний между оптическими компонентами при изменении температуры.

После подстановки соотношений (8, 9) в уравнения (1, 2) условия масштаба и исправления хроматизма положения оптической системы с учетом расстояний между компонентами приобретают следующий вид:

$$\Phi_1 + (1 - \Phi_1 d_1)\Phi_2 + \\ + [1 - \Phi_1 d_1 - d_2(\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)]\Phi_3 = 1, \quad (10)$$

$$\Phi_1 / v_1 + (1 - \Phi_1 d_1)^2 \Phi_2 / v_2 + \\ + [1 - \Phi_1 d_1 - d_2(\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)]^2 \Phi_3 / v_3 = 0. \quad (11)$$

Условие атермализации, т.е. сохранения размера заднего фокального отрезка при изменении температуры, с учетом расстояний между оптическими компонентами и выражений (8, 9) будет иметь вид

$$1 - \Phi_1 d_1 - d_2(\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1) - \\ - \{1 - \Phi_1(1 - \Delta t V_{t1})(d_1 + d_2) - \Phi_2(1 - \Delta t V_{t2}) \times \\ \times d_2[1 - \Phi_1(1 - \Delta t V_{t1})d_1]\} / \{\Phi_1(1 - \Delta t V_{t1}) + \Phi_2(1 - \Delta t V_{t2}) + \\ + \Phi_3(1 - \Delta t V_{t3}) - \Phi_1(1 - \Delta t V_{t1})d_1[\Phi_2(1 - \Delta t V_{t2}) + \\ + \Phi_3(1 - \Delta t V_{t3})] - \Phi_3(1 - \Delta t V_{t3})d_2[\Phi_1(1 - \Delta t V_{t1}) +$$

$$+ \Phi_2(1 - \Delta t V_{t2}) - \\ - \Phi_1(1 - \Delta t V_{t1})\Phi_2(1 - \Delta t V_{t2})d_1\} = 0. \quad (12)$$

В систему уравнений (10–12), на основании которой выполняется расчет оптических сил по заданным расстояниям между компонентами для атермализованного ахроматического ИК триплета, вместо второго уравнения исправления хроматизма положения можно ввести условие исправления хроматизма увеличения

$$y_1 \Phi_1 / v_1 + [y_1 - d_1 / (1 - \Phi_1 d_1)](1 - \Phi_1 d_1)^2 \Phi_2 / v_2 + \\ + \{[y_1 - d_1 / (1 - \Phi_1 d_1) - d_2 / (1 - \Phi_1 d_1)] / [1 - \Phi_1 d_1 - \\ - d_2(\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)]\} \times \\ \times [1 - \Phi_1 d_1 - d_2(\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)]^2 \Phi_3 / v_3 = 0. \quad (13)$$

Подбор наиболее выгодных с точки зрения степени атермализации комбинаций материалов компонентов триплета осуществляется по диаграмме, приведенной на рис. 1, где по оси абсцисс откладывается значение коэффициента дисперсии Аббе, а по оси ординат – произведение термооптической постоянной материала на этот коэффициент.

Пользуясь приведенной диаграммой, при выборе материалов компонентов атермализованного ахроматического триплета следует руководствоваться следующими основными критериями [5]: площадь треугольника, образованного точками, соответствующими трем оптическим материалам, должна быть как можно большей, и три материала на диаграмме $v-vV_t$ не должны быть расположены на одной прямой линии, поскольку площадь треугольника,

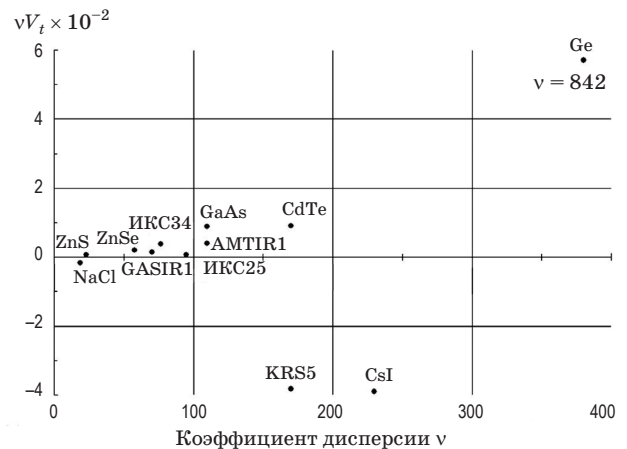


Рис. 1. Диаграмма $v-vV_t$ материалов диапазона спектра 8–14 мкм.

сформированного ими, в этом случае будет равняться нулю.

Исходя из изложенного выше, методика расчета атермализованного ахроматического ИК триплета содержит следующие этапы.

1. По диаграмме $v-vV_t$ выбрать комбинацию материалов компонентов триплета, руководствуясь ранее приведенными критериями.

2. По заданным расстояниям между компонентами (d_1 и d_2) из системы трех нелинейных уравнений (10–12) определить значения оптических сил Φ_1 , Φ_2 , и Φ_3 .

3. Вычислить высоты первого ВНЛ на втором и третьем компоненте (h_2 и h_3) по формулам (8) и (9). Комбинации с $h_3 < 0,3$ использовать не рекомендуется, так как в этом случае расстояние между поверхностью последнего компонента триплета и плоскостью приемника излучения будет недостаточным для его крепления.

4. Определить температурное изменение заднего фокального отрезка по формуле (7).

5. Проанализировать полученные комбинации ИК триплетов и выбрать из них те, которые в большей степени соответствуют интересующим нас критериям (по уровню aberrаций, размеру температурного изменения заднего фокального отрезка, расстояниям между ком-

понентами оптической системы, возможностям разработчика применить ту или иную комбинацию материалов).

На основании разработанной методики был получен ряд комбинаций атермализованных ахроматических триплетов ИК диапазона спектра 8–14 мкм. Характеристики этих комбинаций содержатся в табл. 1. Все поверхности компонентов являются сферическими, а фокусное расстояние систем $f' = 1$.

Погрешность расчета терморасфокусировки ИК объектива без учета толщины компонентов b и при условии, что радиусы кривизны поверхностей $r_1, r_2 > 10b$, не превышает 3,5% [6].

В табл. 2 приведены конструктивные параметры одной из комбинаций (см. табл. 1) атермализованного ахроматического ИК триплета, синтезированного в соответствии с разработанной методикой. Окончательная оптимизация конструктивных параметров объектива проводилась в программе ZEMAX. Объектив имеет фокусное расстояние 50 мм, относительное отверстие 1:1, угловое поле 12° . Спектральный диапазон работы 8–14 мкм. Все поверхности оптических компонентов сферические. Задний фокальный отрезок данного триплета изменяется в пределах 4 мкм в температурном диапазоне $\Delta t = \pm 40^\circ\text{C}$.

Таблица 1. Комбинации атермализованных ахроматических ИК триплетов

| Материал компонентов | | | Фокусное расстояние, мм | | | Расстояние между компонентами, мм | | Изменение заднего фокального отрезка $\times 10^{-4}$, мм | Суммы Зейделя | |
|----------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-----------------------------------|-------|--|---------------|-------|
| 1 ^{го} | 2 ^{го} | 3 ^{го} | f_1 | f_2 | f_3 | d_1 | d_2 | | S_1 | S_2 |
| ИКС25 | ZnSe | Ge | 1,18 | -0,66 | 1,18 | 0,194 | 0,733 | 1,7 | -0,06 | 0,12 |
| ИКС25 | ZnS | Ge | 0,84 | -0,15 | 0,98 | 0,193 | 0,768 | -7,38 | 0,46 | 0,23 |
| ИКС25 | ZnS | ИКС34 | 0,83 | -0,2 | 1,02 | 0,316 | 0,629 | 4,06 | 0,47 | 0,26 |
| ИКС25 | ZnSe | KRS5 | 1,21 | -0,66 | 1,10 | 0,202 | 0,695 | 14 | 0,01 | 0,23 |
| ИКС29 | ZnSe | Ge | 1,40 | -0,99 | 1,27 | 0,169 | 0,751 | -2,87 | -0,84 | -0,07 |
| GASIR1 | ZnSe | ИКС34 | 1,43 | -1,07 | 1,24 | 0,167 | 0,733 | -6,97 | -1,02 | -0,11 |

Таблица 2. Конструктивные параметры атермализованного триплета

| № | Радиус кривизны, мм | Толщина по оси, мм | Материал компонента | Световой диаметр |
|---|---------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| 1 | 55,22 | 6,04 | ИКС25 | 51,7 |
| 2 | 173,43 | 5,12 | – | 50,84 |
| 3 | 641,38 | 3,79 | ZnSe | 46,52 |
| 4 | 98,65 | 42,74 | – | 43,72 |
| 5 | 20,05 | 4,24 | Ge | 21,12 |
| 6 | 19,77 | 8,09 | – | 17,66 |

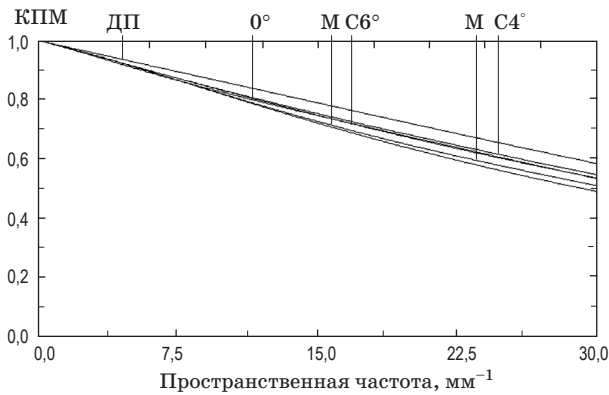


Рис. 2. МПФ синтезированного объектива в диапазоне изменения температуры $\Delta t = \pm 40$ °С. ДП — дифракционный предел. М, С — меридиональное и сагиттальное сечения.

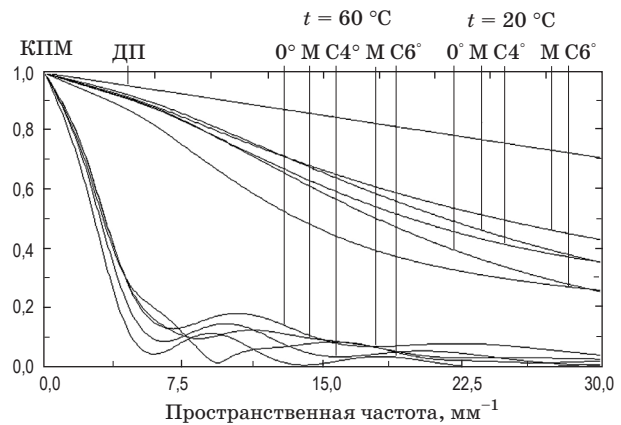


Рис. 4. МПФ неатермализованного объектива при температурах 20 и 60 °С.

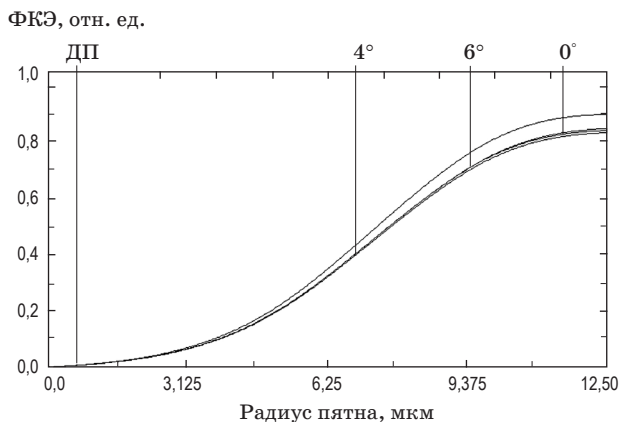


Рис. 3. ФКЭ синтезированного объектива в диапазоне изменения температуры $\Delta t = \pm 40$ °С.

На рис. 2, 3 приведены модуляционная передаточная функция (МПФ) и функция концентрации энергии (ФКЭ) объектива.

Коэффициент передачи модуляции (КППМ) синтезированного триплета на частоте Найквиста приемника излучения с размером пиксела 25×25 мкм (пространственная частота 20 мм^{-1}) изменяется в пределах 0,3% в диапазоне температуры $\Delta t = \pm 40$ °С на краю поля зрения системы, что подтверждает стабильность характеристик и качества изображения объектива в указанном температурном диапазоне.

Концентрация энергии в кружке рассеяния диаметром 25 мкм на краю поля зрения объектива согласно рис. 3 близка к дифракционному пределу и составляет 83%, а ее изменение в диапазоне температуры $\Delta t = \pm 40$ °С не превышает 0,2%. Это дает возможность использовать объектив в комплексе с современными микроболометрическими приемниками излучения.

Анализ известных неатермализованных схем объективов-триплетов для ИК области спектра, приведенных, например, в работе [7], показал, что при повышении температуры в оптической системе на 40 °С изменение заднего фокального отрезка составляет 140 мкм. В результате в плоскости анализатора изображения диаметр кружка рассеяния увеличится более чем в 5 раз, что приведет к резкому снижению частотных и энергетических характеристик системы. Подтверждением этого являются данные рис. 4, на котором приведена МПФ объектива при температурах 20 и 60 °С.

Из графика МПФ видно, что на частоте Найквиста у приемника излучения с размером пиксела 25×25 мкм КППМ уменьшается на 33% для сагиттальной и на 54% для меридиональной плоскостей при изменении температуры на 40 °С на краю поля зрения системы.

Выводы

Атермализация и ахроматизация ИК объективов-триплетов может быть осуществлена подбором композиций материалов с использованием диаграммы $\nu - \nu V_t$. При этом предпочтительно отдавать композициям, ограничивающим на этой диаграмме треугольник большей площади. В ходе атермализации ИК триплета также осуществляется минимизация aberrаций изображения.

Синтезированный в соответствии с разработанной методикой ИК триплет с фокусным расстоянием 50 мм, относительным отверстием 1:1, угловым полем 12° характеризуется в температурном диапазоне от -20 до $+60$ °С

изменением размера заднего фокального отрезка на 4 мкм, что на 1–2 порядка меньше, чем у неатермализованных объективов с аналогичными эксплуатационными параметрами.

МПФ синтезированного атермализованного ахроматического ИК объектива на пространственной частоте Найквиста матричного микроболометрического приемника с размером

пиксела 25×25 мкм в диапазоне температуры $\Delta t = \pm 40$ °С характеризуется изменением КПМ в пределах 0,3%. У неатермализованного ИК триплета при тех же условиях КПМ уменьшается на 30–50%, что подтверждает необходимость использования разработанной методики для проектирования ИК объективов-триплетов, работающих в сложных температурных условиях.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jamison T.H.* Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint // *Optical Design*. 1992. V. CR43. P. 131–159.
2. *Jamison T.H.* Thermal effects in optical systems // *Opt. Eng.* 1981. V. 20. P. 156–160.
3. *Латышев С.М.* Компенсация погрешностей в оптических приборах. Л.: Машиностроение, 1985. 248 с.
4. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. С. 273–285.
5. *Кучеренко О.К., Муравйов О.В., Тягур В.М.* Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2012. № 5. С. 114–117.
6. *Кучеренко О.К., Муравьев А.В.* Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем // *Вісник НТУУ “КПІ”, серія Приладобудування*. 2012. № 43. С. 46–53.
7. *Хацевич Т.Н., Журавлев П.В.* Инфракрасный светосильный трехлинзовый объектив // Патент России № 2348953. 2009.