

УДК 535.21

О.К. Кучеренко, О.В. Муравйов, Д.О. Остапенко

**ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА АБЕРАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ІЧ-ОБ'ЄКТИВІВ**

This paper considers temperature influence on image quality of focusing systems operating in an infra-red spectral range for the case of homogeneous temperature distribution. Using the optical design programs it is possible to estimate the influence of temperature on optical descriptions of depicting systems operating under unstable temperature conditions. The article elucidates the results of temperature influence analysis on aberration properties of non-athermalized and athermalized infra-red lenses. The analysis conducted shows that at the temperature change to 40 degrees in the system of typical infra-red lens projected without taking into account temperature influence the system resolvability worsens by several times as a result of thermal misfocusing. At the same time the nature of the field aberrations dependence on the entrance pupil size or corner of optical system eyeshot in the image plane does not change. By using passive optical athermalization methods the dependence of infra-red lenses characteristics on temperature can be eliminated at the stage of focusing system projection.

**Вступ**

Інфрачервоні (ІЧ) об'єктиви, що формують зображення у діапазоні довжин хвиль 8–14 мкм, застосовуються у тепловізійній апаратурі цивільного та військового призначення. Зазвичай такі системи експлуатуються у широкому температурному діапазоні від –60 до +50 °С. Якість зображення, створюваного ІЧ-об'єктивом, визначається мірою виправлення аберацій та умовами роботи.

Зміна температури зумовлює появу термоаберацій фокусувального вузла [1]. Оскільки термооптичні властивості матеріалів, які застосовуються для виготовлення оптичних систем ІЧ-діапазону, більш чутливі до температурного впливу порівняно із матеріалами, що використовуються для виготовлення оптичних систем для видимої спектральної області, зміна температури навколишнього середовища сильніше позначається на роботі об'єктива в ІЧ-області спектра.

Питанням аналізу впливу температури на абераційні властивості фокусувальних вузлів присвячено низку публікацій. У працях [1, 2] наведено аналіз термоаберацій двокомпонентного об'єктива видимого діапазону спектра, який складається із тонких лінз. При цьому в ході обчислень задавалися значення температурного приросту показника заломлення  $\beta_\lambda$  та середні значення лінійного температурного коефіцієнта розширення скла  $\alpha$  у певному спектральному і температурному діапазоні. Необхідно зазначити, що залежність зміни параметрів оптичних матеріалів при появі температурного поля можна розглядати як лінійну лише за незначних змін температури, та-

ких, що не перевищують одного–двох десятків градусів. За великих змін температури (50–60°) виникають істотні похибки у визначенні значень показника заломлення, радіусів кривизни, товщин оптичних компонентів, а також повітряних проміжків між ними. У [3] розглянуто приклад розрахунку термоаберацій для двох типів симетричної лінзи. При цьому розрахунки проводилися за наближеними формулами із врахуванням малої кількості променів, що формують зображення. Праця [4] містить рекомендації з усунення окремих типів аберацій шляхом підбору матеріалів із різними термооптичними константами і збереження незмінної фокусної відстані системи при зміні температурних умов. Розрахунок було проведено для простих систем, які працюють у видимій спектральній області. Теоретичний аналіз впливу власного теплового випромінювання елементів об'єктива на параметри зображення наведено в [5]. У розглянутих працях отримано аналітичні формули, використання яких дає наближені оцінки впливу температури на якість зображення. Кількість променів, вирахованих за цими формулами, обмежена. Процес розрахунку є трудомістким і не дає високої точності, оскільки не базується на використанні сучасних програм автоматизованого проектування. Варто зазначити, що основний акцент при оцінці термоаберацій було зроблено на дослідження об'єктивів видимого діапазону спектра.

**Постановка задачі**

У зв'язку з тим, що термооптичні аберації фокусувальних оптичних систем ІЧ-діапазону недостатньо вивчені, актуальним є завдання

проведення досліджень у цій області спектра. Мета статті – проаналізувати вплив температурних полів на аберації зображення, сформованого неатермалізованими й атермалізованими ІЧ фокусувальними вузлами. При проектуванні оптичних систем аберації мінімізують, однак, оскільки при накладанні температурного поля відбувається зміна властивостей і форми оптичних деталей, варто очікувати впливу цього фактора на параметри зображення. Одночасно, коли вимоги до термостабільності фокусувального вузла є визначальними, необхідно синтезувати оптичні системи, які не схильні до впливу температури.

Дослідження проводилися для діоптричних фокусувальних вузлів із використанням типових для ІЧ-області спектра оптичних матеріалів. При цьому вважалося, що в оптичній системі при зміні температури експлуатації відбувається однорідний розподіл температурного поля.

### Результати дослідження і їх обговорення

Поставлене завдання вирішувалося за допомогою САПР Zemax, яка дає можливість проводити розрахунки із врахуванням таких факторів: нелінійності характеристик оптичних матеріалів; аналізу проходження через фокусувальну систему доволі великої кількості променів, які беруть участь у формуванні зображення; отримання наочного графічного подання польових аберацій оптичної системи, що аналізується. Усе це дало можливість із великою точністю здійснити математичне моделювання роботи складної фокусувальної системи ІЧ-діапазону з метою аналізу впливу температури на якість її зображення.

Температурний вплив викликає зміну конструктивних параметрів і заломлювальних властивостей оптичних матеріалів ІЧ-об'єктивів.

Зміна параметрів оптичної деталі, яка відбувається внаслідок температурного впливу, така:

- змінюються радіуси сферичних поверхонь лінз;
- сферичні поверхні в низці випадків стають асферичними;
- змінюється осьова товщина лінз;
- збільшуються або зменшуються коефіцієнти заломлення оптичних матеріалів;
- напруги в оптичних елементах призводять до деформації та двопроменезаломлення.

Перераховані фактори можуть призводити до значного погіршення якості зображення, сформованого оптичною системою, яке зумовлене появою термоаберацій.

Основним параметром, який характеризує температурні властивості оптичних матеріалів, є термооптична стала, яка дорівнює

$$V_t = \frac{\beta_\lambda}{n_\lambda - 1} - \alpha,$$

де  $\beta_\lambda$  – коефіцієнт температурного приросту показника заломлення для довжини хвилі випромінювання  $\lambda$ ;  $\alpha$  – лінійний температурний коефіцієнт розширення оптичного матеріалу;  $n_\lambda$  – показник заломлення матеріалу на довжині хвилі  $\lambda$  [1].

Найбільш типовим оптичним матеріалом, який використовується у конструкціях ІЧ-об'єктивів, є германій, завдяки його широкому спектральному діапазону пропускання випромінювання, хорошим механічним властивостям, відносній простоті в обробці. Але разом із тим він є одним із найбільш температурозалежних ІЧ-матеріалів, оскільки його термооптичні властивості істотно залежать від температури. У табл. 1 для порівняння наведено значення термооптичних характеристик типових оптичних матеріалів, що

Таблиця 1. Порівняння властивостей оптичних матеріалів ІЧ і видимого діапазонів спектра

Оптичний матеріал	Температурний коефіцієнт показника заломлення $\beta_\lambda \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	Теплове розширення $\alpha \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup> (-60–+20 °C)	Діапазон зміни показника заломлення, $n(\lambda)$	Коефіцієнт дисперсії Аббе, $v$	Термооптична стала $V_t \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>
Ge	392	5,7	4,107–4,002	861	124
ZnSe	61	7,1	2,446–2,318	82,91	26,17
KRS5	-236,29	61,0	2,681–2,210	164,73	-233,22
K8	2,8	7,2	1,489–1,549	64,1	-2,2
Ф4	5,4	7,4	1,617–1,629	35,9	0,7

використовуються при проектуванні об'єктивів, які працюють у видимій та інфрачервоній областях спектра.

З табл. 1 видно, що значення температурного приросту показника заломлення  $\beta_\lambda$  і термооптичної сталої  $V_t$  матеріалів, що використовуються для виготовлення лінз ІЧ-об'єктивів, у багато разів більше, ніж для типових матеріалів, які використовуються для виготовлення лінз об'єктивів, що працюють у видимій спектральній області. Як наслідок, ІЧ-об'єктиви більше піддаються впливу температури, ніж аналогічні вузли для видимої області спектра. Разом із тим розглянуті термооптичні характеристики для деяких матеріалів, які використовуються для виготовлення об'єктивів, мають різні знаки термооптичної сталої  $V_t$ . Ця властивість може бути використана для створення атермалізованих композицій ІЧ фокусувальних вузлів.

Для дослідження закономірностей прояву термоаберацій було проаналізовано ряд схем об'єктивів ІЧ-області спектра. У першій групі схем усі компоненти фокусувального вузла пропонувалося виготовляти із одного матеріалу – германію. У другій групі схем пропонується застосовувати для виготовлення лінз різні матеріали, прозорі в ІЧ-діапазоні, із різними знаками термооптичних сталих. Проведений аналіз дав схожі результати для об'єктивів як першої, так і другої груп, тому доцільно показати ці результати на двох типових прикладах об'єктивів різних груп.

Конструктивні параметри германієвого ІЧ-об'єктива, з полем зору  $2\omega = 25^\circ$ , фокусною відстанню  $f' = 38,55$  мм, відносним отвором 1:0,75, спектральним діапазоном роботи 8–14 мкм, наведено у табл. 2 [6].

Таблиця 2. Конструктивні параметри ІЧ-об'єктива, лінзи якого виготовлені з германію

Радіус кривизни, мм	Товщина, мм	Матеріал
-47,64	3,5	Германій
-58,61	9,4	
6427,00	5,0	Германій
-246,60	0,5	
51,40	4,5	Германій
55,72	40,4	
23,01	3,5	Германій
24,10	11,31	
$\infty$	1,0	Германій
$\infty$	–	

Графік подовжньої сферичної аберації цього об'єктива для трьох довжин хвиль і значень температур  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  і  $T_2 = 60^\circ\text{C}$  наведено на рис. 1.

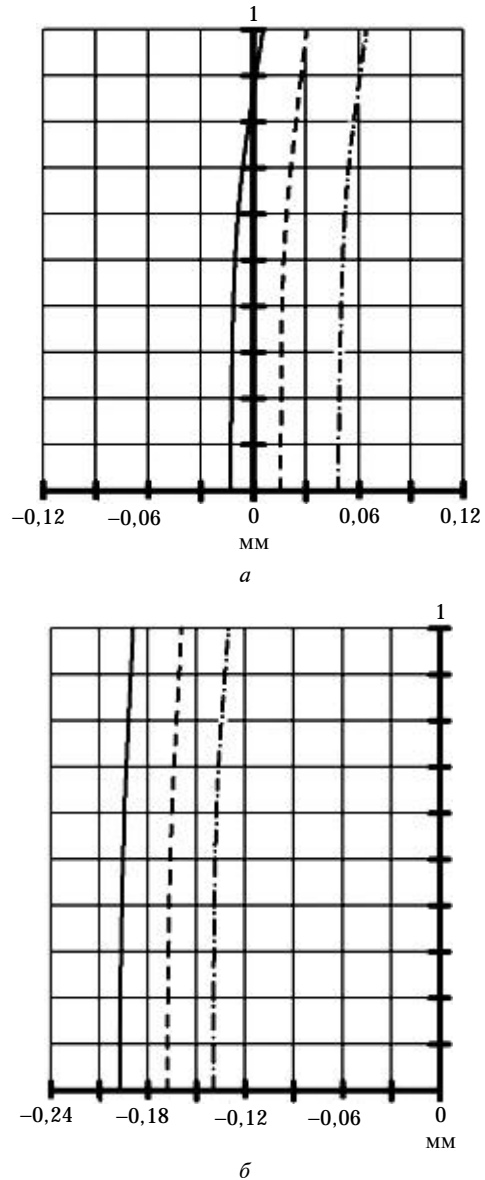


Рис. 1. Графіки подовжньої сферичної аберації за температури,  $^\circ\text{C}$ : а – 20, б – 60; — —  $\lambda = 8$  мкм; - - -  $\lambda = 11$  мкм; — · —  $\lambda = 14$  мкм

Цей графік побудовано відносно площини, де діаметр плями розсіювання мінімальний. По вертикальній осі він нормується відносно максимальної величини радіуса входної зіниці.

Графік астигматизму цього об'єктива для трьох довжин хвиль і значень температур  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  та  $T_2 = 60^\circ\text{C}$  наведено на

рис. 2, де  $L_m$  і  $L_s$  – відстані від площини параксiального зображення до меридіонального і сагітального фокусів відповідно. По вертикальній осі графік нормований відносно кута поля зору оптичної системи у площині зображення.

На рис. 3 показано діаграми плями розсіювання об'єктива на краю поля зору, які є результатом впливу на якість зображення усіх можливих аберацій. Діаграми, наведені на рис. 3, *a* і *б*, визначені відносно параксiальної фокальної площини для двох значень температур. Діаграма на рис. 3, *в* визначена відносно тієї самої площини аналізу, яка відповідала температурі  $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ , тобто виявилася зсунутою відносно параксiальної фокальної площини внаслідок терморозфокусування.

Значення аберацій цього об'єктива при температурах  $+20$  і  $+60\text{ }^\circ\text{C}$  для трьох довжин хвиль подано в табл. 3. Тут значення радіусу плями розсіювання на краю поля зору являють собою середньоквадратичну величину по заданих довжинах хвиль, а для значень коми взято максимальний розмір плями розсіювання.

Аналіз отриманих залежностей показав, що розглянутий об'єктив характеризується мінімальними абераціями і його роздільна здатність перебуває на рівні дифракційної межі, якщо площина аналізу збігається із параксiальною фокальною площиною. При зміні температури положення цієї площини змінюється внаслідок терморозфокусування. Це призводить до того, що за відсутності у конструкції фотоприймального вузла пристрою автоматичної компенсації терморозфокусування, роздільна здатність системи погіршується у три–чотири рази. Залежність польових аберацій від радіусу вхідної зіниці або ку-

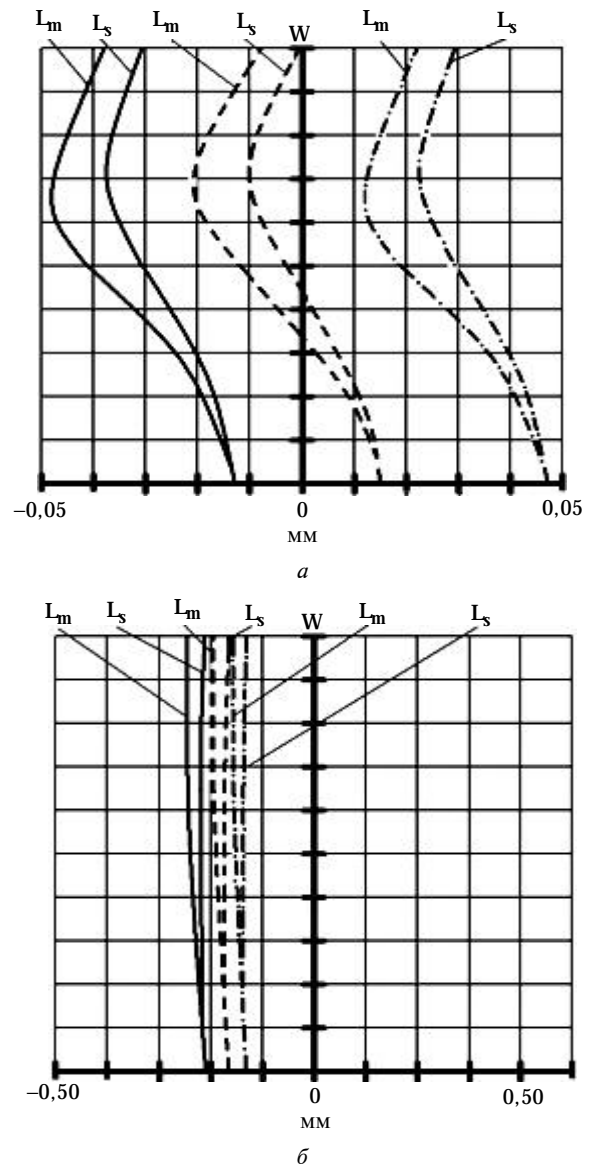


Рис. 2. Графіки астигматизму при температурі,  $^\circ\text{C}$ : *a* – 20, *б* – 60; — —  $\lambda=8$  мкм; - - -  $\lambda=11$  мкм; - · -  $\lambda=14$  мкм

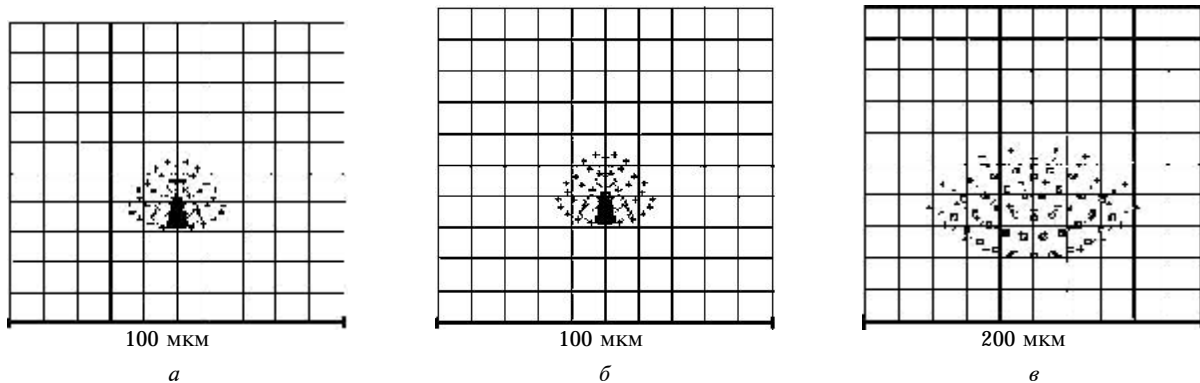


Рис. 3. Діаграми плями розсіювання на краю поля зору при температурі,  $^\circ\text{C}$ : *a* – 20; *б* – 60, система сфокусована; *в* – 60, система розфокусована

Таблиця 3. Значення аберацій об'єктива, лінзи якого виготовлені з германію

Температура, °C	$\lambda$ , мкм	Сферична подовжня, мм	Радіус плями розсіювання, мкм		Астигматизм, мм		Кома, мкм	Дисторсія, %	Хроматизм положення, мкм	Хроматизм збільшення, мкм
			на осі	на краю	$L_m$	$L_s$				
20	8	0,002	9,452	22,531	-0,038	-0,029	$\Delta x' = 29,08$ $\Delta y' = 24,9$	-2,434	57,34	-20,39
	11	0,039			0,004	0,009				
	14	0,061			-0,028	0,03				
60	8	-0,19	9,73*	22,65*	-0,256	-0,224	$\Delta x' = 126,5$ $\Delta y' = 68,27$	-2,376	57,26	-20,51
	11	-0,152			-0,213	-0,186				
	14	-0,32			-0,189	-0,165				

\*Значення визначені відносно параксильної фокальної площини досліджуваної системи.

та поля зору оптичної системи у площині зображень не змінюється.

Вплив терморозфокусування на роздільну здатність фокусувального вузла можна мінімізувати, застосовуючи схеми атермалізованих ІЧ-об'єктивів, лінзи яких виготовлені з різних матеріалів, прозорих в ІЧ-області спектра, з різними знаками термооптичних сталей. Проведемо абераційний аналіз запропонованої авторами схеми чотирикомпонентного атермалізованого об'єктива, конструктивні параметри якого наведено у табл. 4 [7]. Поле зору об'єктива  $2\omega = 20^\circ$ , фокусна відстань  $f' = 97,28$  мм, відносний отвір 1:2, спектральний діапазон роботи 8–12 мкм.

Аналіз впливу температури на абераційні характеристики ІЧ фокусувальних вузлів виявив, що основним фактором, який впливає на терморозфокусування, є подовжня сферична аберація. Її графік для запропонованої схеми атермалізованого об'єктива при значеннях температур  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  і  $T_2 = 60^\circ\text{C}$  наведено на рис. 4.

Таблиця 4. Конструктивні параметри атермалізованого чотирикомпонентного об'єктива

Радіус кривизни, мм	Товщина, мм	Матеріал
223,367	13,71	Германій
302,569	51,94	
86,035	5,29	Бромід-йодид талію (KRS5)
111,564	76,37	
61,706	13,70	Германій
68,437	1,72	
28,483	3,74	Бромід-йодид талію (KRS5)
21,724	6,85	

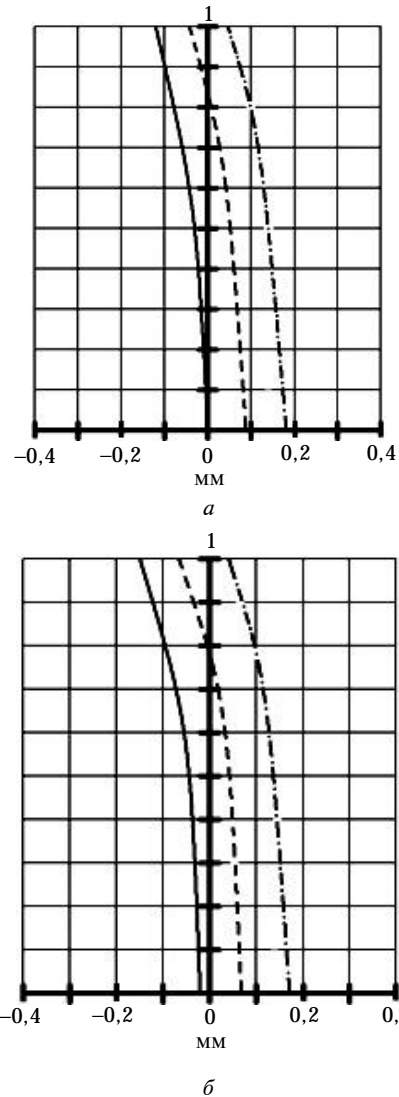


Рис. 4. Графіки подовжньої сферичної аберації атермалізованого об'єктива при температурі, °C: а – 20, б – 60; — —  $\lambda = 8$  мкм; - - -  $\lambda = 10$  мкм; - · -  $\lambda = 12$  мкм

Таблиця 5. Значення аберацій атермалізованого об'єктива при температурах +20 та +60 °С

Температура, °С	$\lambda$ , мкм	Сферична подовжня, мм	Радіус плями розсіювання, мкм		Астигматизм, мм		Кома, мкм	Дисторсія, %	Хроматизм положення, мкм	Хроматизм збільшення, мкм
			на осі	на краю	$L_m$	$L_s$				
20	8	-0,123	14,319	17,644	-0,057	-0,045	$\Delta x' = 51,66$ $\Delta y' = 57,36$	7,75	0,180	18,22
	10	-0,034			-0,009	0,035				
	12	0,054			0,04	0,115				
60	8	-0,137	14,696	17,497	-0,046	-0,049	$\Delta x' = 54,04$ $\Delta y' = 56,76$	7,69	0,178	19,2
	10	-0,048			0,03	0,032				
	12	0,038			0,052	0,111				

З графіків видно, що залежність подовжньої сферичної аберації від радіусу вхідної зіниці при розглянутих температурах зберігається практично незмінною. Зсув параксильної фокальної площини становить  $\approx 2$  мкм. Для неатермалізованої схеми об'єктива такий зсув становив  $\approx 190$  мкм. Повний перелік аберацій атермалізованого об'єктива при температурах +20 та +60 °С наведено в табл. 5.

З наведених у табл. 5 даних виходить, що роздільна здатність атермалізованого об'єктива відповідає роздільній здатності сучасних багатоелементних фотоприймальних пристроїв ІЧ-діапазону. В об'єктиві добре виправлені польові аберації: радіус плями розсіювання на краю поля зображення мало відрізняється від його значень на осі. Роздільна здатність об'єктива залишається практично незмінною в усьому досліджуваному температурному діапазоні, тобто терморозфокусування відсутнє.

### Висновки

При проектуванні оптичних систем ІЧ фокусувальних вузлів тепловізійної апаратури варто враховувати температурний режим їх роботи, оскільки термооптичні характеристики матеріалів, які застосовуються для виготовлення лінз у цьому спектральному діапазоні, набагато більше залежать від температури, ніж такі самі характеристики матеріалів лінз об'єктивів видимого діапазону спектра. У випадку неврахування цього фактора при проектуванні оптичної системи зміна температурного режиму призводить до термороз-

фокусування, що істотно погіршує роздільну здатність фокусувального вузла навіть в об'єктивах із добре виправленими абераціями. У наведеному прикладі [6] роздільна здатність при підвищенні температури до +60 °С погіршується у три-чотири рази. Компенсація терморозфокусування у цьому випадку можлива із застосуванням термокомпенсаторів, однак, це істотно ускладнює конструкцію фокусувального вузла фотоприймального пристрою.

Проблема компенсації терморозфокусування може бути вирішена при розробленні атермалізованих фокусувальних вузлів, коли у ході синтезу оптичної системи для виготовлення оптичних деталей складного об'єктива підбираються матеріали із різними знаками термооптичних сталей. Запропонований авторами атермалізований об'єктив характеризується доволі високою роздільною здатністю, відповідною роздільній здатності сучасних багатоелементних фотоприймальних пристроїв ІЧ-діапазону. Радіус плями розсіювання об'єктива при зміні температури від +20 до +60 °С збільшується лише на частки мікрона, тобто терморозфокусування є дуже малим.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення атермалізованих ІЧ фокусувальних вузлів, призначених для тепловізійних приладів із різними експлуатаційними характеристиками і граничною роздільною здатністю.

1. *Волосов Д.С.* Фотографическая оптика: Учеб. пособие для ВУЗов. – М.: Искусство, 1978. – 544 с.
2. *Т.Н. Jamison*, “Thermal Effects in Optical Systems”, Opt. Eng., vol. 20, pp. 156–160, 1981.
3. *Пищик Г.Ф.* Напряжение и деформации в деталях оптических приборов. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1968. – 248 с.
4. *Кучеренко О.К., Муравьев А.В., Куцурук В.Н.* Влияние температуры на терморасфокусировку фокусирующего узла в инфракрасных системах // Вісн. НТУУ “КПІ”. Сер. Приладобуд. – 2010. – Вип. 40. – С. 32–37.
5. *Макаренко А.В., Правдивцев А.В., Юдин А.Н.* Метод оценивания внутреннего паразитного излучения оптических трактов инфракрасных систем // Электромагн. волны и электрон. сист. – 2009. – № 12. – С. 28–37.
6. *Патент 2449327 РФ*, МПК G02B9/34. Светосильный объектив для инфракрасной области спектра / М.Н. Сокольский, И.Е. Совз; патентообладатель ОАО “ЛОМО”. – № 2010152127/28; заявл. 20.12.2010; опубл. 20.12.2010.
7. *Патент на корисну модель № 75149 UA*, МПК (2012.01) G02B13/00. Атермалізований трикомпонентний об’єктив для інфрачервоної області спектра / О.К. Кучеренко, О.В. Муравйов; власник: НТУУ “КПІ”; опубл. 26.11.2012, Бюл. № 22.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
30 листопада 2012 року