

## **ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ОБЪЕКТИВАМ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ КАНАЛОВ, РАЗМЕЩАЕМЫХ НА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ**

*Юлия Сергеевна Киселева*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (913)766-59-06, e-mail: yulya\_kiseleva\_1997@mail.ru

*Татьяна Николаевна Хацевич*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

В статье обсуждаются требования к объективам тепловизионных приборов, формулируются специальные требования в случае их размещения на летательных аппаратах. Анализируются термооптические aberrации одиночной линзы из различных инфракрасных материалов. Приводятся значения термооптической постоянной для некоторых материалов. Приводится условие устранения терморасфокусировки для одиночной линзы.

**Ключевые слова:** термооптический анализ, требования к тепловизионным объективам, термооптическая aberrация, термооптическая постоянная, пассивная атермализация.

## **JUSTIFICATION OF REQUIREMENTS FOR INFRARED RANGE LENSES STATIONED AT AIRCRAFT**

*Julia S. Kiseleva*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (913)766-59-06, e-mail: yulya\_kiseleva\_1997@mail.ru

*Tatiana N. Khatsevich*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)344-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

The article discusses the requirements for the lens of thermal imaging devices, and formulates special requirements for their placement on aircraft. Thermo-optic aberrations of a single lens made of various infrared materials are analyzed. The values of the thermo-optic constant for some materials are given. A condition for eliminating thermal refocusing for a single lens is given.

**Key words:** thermo-optical analysis, requirements for thermal imaging lenses, thermal and optical aberration, thermo-optical constant, passive athermalization.

### ***Введение***

Тепловизионные камеры, размещаемые на летательных аппаратах, применяются во многих сферах: строительство, горнодобывающая промышленность, электроэнергетика, пожаротушение, поисковые операции и другие [1]. Преиму-

щества тепловизионного изображения наблюдаемой сцены по сравнению с изображением в видимом диапазоне обусловлены тем, что в процессе формирования изображения с помощью излучения инфракрасного диапазона спектра, излучаемого объектами и фонами, и преобразования этого изображения в видимое, достигается повышение контраста изображения и, соответственно, дальности обнаружения и распознавания объектов.

Для повышения эксплуатационных показателей оптико-электронной аппаратуры, размещаемой на летательных аппаратах, тепловизионный прибор часто выступает как один из каналов аппаратуры. Комплексный анализ изображений, получаемых с помощью разных каналов, существенно повышает вероятность решения зрительных задач [1].

Предметом исследования является выявление требований, которые необходимо учитывать при разработке объективов тепловизионных каналов, размещаемых на летательных аппаратах.

При проведении исследования использовались как общие научные методы: анализ, систематизация, так и специальные методы оптотехники: термооптический анализ оптических систем.

### ***Общие требования к объективам тепловизионных приборов***

Формирование изображения обеспечивается объективом, геометрические, спектральные и аберрационные характеристики которого согласуются с приемником инфракрасного излучения, используемым в тепловизионном приборе. Далее рассматриваются объективы для тепловизоров «смотрящего» типа с матричными неохлаждаемыми приемниками излучения.

Обобщая результаты изучения литературных источников [2–6], можно сформулировать основные требования, которым должен удовлетворять объектив тепловизионного прибора: высокая светосила; высокое пропускание в рабочем спектральном диапазоне чувствительности приемника; высокое качество изображения в пределах всего поля зрения; ортоскопичность; телецентрический ход главных лучей в пространстве изображений; минимизация виньетирования, массы и габаритных размеров; возможность фокусировки на различные расстояния до объектов; активная или пассивная компенсация термооптических аберраций.

В частных технических требованиях на разработку объектива тепловизионного канала приводятся уточненные значения параметров объектива и приемника, некоторые из требований могут быть исключены, некоторые расширены. В частности, для медицинского тепловизора, эксплуатация которого осуществляется в лабораторных условиях, требования по устранению термоабберраций и терморасфокусировок могут исключаться, а требование по светораспределению по кадру, наоборот, усиливаться.

### ***Специальные требования к объективам тепловизионных каналов, размещаемых на летательных аппаратах***

Габаритные размеры и масса объективов тепловизионных каналов определяются параметрами и характеристиками летательных аппаратов, на которых они монтируются. Анализ классификаций беспилотных летательных аппаратов

(БПЛА), приведенных в различных источниках, показывает, что деления по типам и соответствующим им характеристикам существенно отличаются. Это можно объяснить интенсивным развитием БПЛА. В [7] выделяются: микро и мини-БПЛА ближнего радиуса действия; легкие малого радиуса действия; легкие среднего радиуса действия; средние; среднетяжелые; тяжелые среднего радиуса действия; тяжелые большой продолжительности полета; беспилотные боевые самолеты. В классификации по [8] БПЛА подразделяются на: микро и мини; тактические (ближнего расстояния, среднего диапазона, дальнего диапазона, высотный выносливый); стратегические; специального назначения. Поэтому, вне зависимости от существующих классификаций, в настоящей статье накладываются условные ограничения на характеристики БПЛА, для установки на которых рассматриваются тепловизионные каналы (модули), а именно: взлетная масса – от 5 до 50 кг, высота полета – от 100 до 5000 м.

Характер распределения температуры по высоте различается в зависимости от свойств отдельных слоев атмосферы. Уменьшение температуры с высотой в тропосфере Земли составляет примерно 6 К/км на высотах до 17 км на экваторе и до 7 км на полюсе. В стратосфере на высотах до 50 км, температура возрастает примерно от 200 до 280 К. В мезосфере температура уменьшается с высотой, достигая значений от 170 до 180 К приблизительно на высоте 85 км [9, с. 1192].

Согласно [9] атмосферное давление на различных высотах описывается барометрической формулой и для стандартной атмосферы приводится таблично для высот до 80 км: например, на высоте 500 м относительное снижение атмосферного давления по сравнению с давлением на уровне моря составляет 0,942; на высоте 1 км – 0,887; на высоте 5 км – 0,533 и т. д.

В [10, с. 390] указано, что аэродинамические воздействия при проектировании инфракрасных систем необходимо учитывать только при сверхзвуковых полетах летательных аппаратов в диапазоне чисел Маха от 1,5 до 7 и, соответственно, могут не учитываться при анализе работы оптико-электронных приборов, размещаемых на летательных аппаратах, имеющих дозвуковые скорости.

Таким образом, внешние условия работы оптико-электронных приборов существенно отличаются в зависимости от типа летательного аппарата и условий их размещения (непосредственно в атмосфере или за защитным окном).

Далее рассматриваются условия внешнего размещения тепловизионной камеры на БПЛА с высотой полета до 5 км.

На высоте 5 км температура снизится примерно на 30 °С по сравнению с температурой на уровне моря. Если принять, что температура на уровне моря при запуске БПЛА находится в диапазоне от 20 до минус 30 °С, то можно оценить условия работы тепловизионной камеры: температура от минус 10 до минус 60 °С; давление 0,533 атмосферы. Таким образом, по сравнению с температурой сборки в цеховых условиях перепад температур  $\Delta T$  составит минус 70 °С. Считая конструкцию камеры герметичной, принимается, что давление внутри камеры не изменится, при этом внешнее давление уменьшится примерно в два раза. Кроме того, имеет место неравномерное охлаждение тепловизионной камеры и появление градиента температур в механических и оптических деталях.

Диапазон эксплуатации тепловизионных каналов определяется не только внешними условиями, но и ограничениями рабочего диапазона эксплуатации приемников. Нижняя граница рабочей температуры эксплуатации большинства моделей неохлаждаемых матричных приемников излучений составляет минус 40 °С и, соответственно, для дальнейших рассуждений принимается  $\Delta T = -60$  °С. Исходя из этого при разработке объективов для тепловизионных камер (каналов), использующих указанный тип приемников излучений, целесообразно ограничить нижнюю границу рабочих температур эксплуатации именно этим значением температуры.

На основе анализа внешних условий работы тепловизионной камеры (модуля) формулируются специальные требования к объективам тепловизионных каналов, размещаемых на летательных аппаратах: а) конструкция оптической системы и корпуса камеры должна обеспечивать устранение терморасфокусировки и стабильность фокусного расстояния в диапазоне температур эксплуатации; б) конструкция камеры должна быть герметичной.

### **Термооптические aberrации одиночных линз в инфракрасном диапазоне от 7 до 12 мкм**

Теоретические вопросы расчета термооптических aberrаций оптических систем изложены в классических монографиях и учебниках [11, 12]. Особенности расчета термооптических aberrаций инфракрасных объективов тепловизионных приборов посвящен ряд работ, среди которых [13–15]. В табл. 1 приведена информация по термооптическим свойствам материалов, используемых для изготовления объективов тепловизионных приборов, на основе данных, систематизированных в [13].

*Таблица 1*

Термооптические свойства материалов

Материал	$n_{10}$	$dn/dT$ , $10^{-6}$ градус $^{-1}$	$\alpha$ , $10^{-6}$ градус $^{-1}$	$\nu$	$V$ , $10^{-6}$ градус $^{-1}$
IRG22	2,4967	67,2	12,1	110,87	32,8
IRG23	2,7869	103,0	13,4	167,00	44,2
IRG24	2,6090	19,9	20,4	174,89	-8,0
IRG25	2,6032	59,2	14,0	109,06	22,9
IRG26	2,7782	32,2	20,8	160,20	-2,7
Ge	4,0031	408,0	5,7	834,19	130,2
GaAs	3,2770	149,0	5,7	107,41	59,7
ZnSe	2,4060	61,0	7,6	57,86	35,8
ZnS	2,2000	41,0	6,8	22,22	27,4

В таблице использованы следующие обозначения:  $n_{10}$  – показатель преломления для длины волны, равной 10 мкм;  $dn/dT$  – температурное приращение показателя преломления;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала;  $\nu$  – коэффициент средней дисперсии материала в спектральном диапазоне от 7 до 12 мкм;  $V$  – термооптическая постоянная материала.

В соответствии с методикой, изложенной в [11, 12] для тонкой одиночной линзы изменение  $\Delta f'$  фокусного расстояния и, соответственно, смещение задней фокальной плоскости при изменении температуры на  $\Delta T$  для случая бесконечно удаленного предмета определяется по формуле (1):

$$\Delta f' = -f' V \Delta T, \quad (8)$$

где  $f'$  – фокусное расстояние линзы.

Значение термооптической постоянной материала линзы вычисляется по формуле (2):

$$V = \frac{dn/dT}{n-1} - \alpha. \quad (9)$$

В табл. 2 приведены результаты расчета термооптической аберрации положения (смещения задней фокальной плоскости и изменения фокусного расстояния) тонкой одиночной линзы с фокусными расстояниями 100 и 250 мм, выполненной из германия и халькогенидного стекла IRG24.

Таблица 2

Термооптическая аберрация положения одиночной линзы.  $\Delta T = -60$  °С

$f'$ , мм	Материал	$\Delta f'$ , мм		Направление смещения плоскости изображений	$\Delta f'/f'$ , %
		формула (1)	Zemax		
100	Ge	0,781	0,821	от линзы	0,82
	IRG24	-0,048	-0,050	к линзе	-0,05
250	Ge	1,952	2,052	от линзы	0,82
	IRG24	-0,121	-0,125	к линзе	-0,05

Расчеты выполнены по формуле (1) и в компьютерной программе Zemax.

Как следует из формулы (1), направление смещения плоскости изображения, построенного одиночной положительной линзой, определяется знаком произведения  $V\Delta T$ . При понижении температуры плоскость изображения, построенная одиночной положительной линзой из германия, сдвигается по направлению от линзы, при повышении температуры – в направлении к линзе. Аналогичный характер направления смещения плоскости изображения имеет место для оди-

ночных линз, изготовленных из материалов, у которых  $V\Delta T$  имеет положительные значения. Для материалов, приведенных в табл. 1, только у двух марок халькогенидных стекол *IRG24* и *IRG26* значения  $V$  отрицательные. Для линз, изготовленных из указанных марок, при понижении температуры плоскость изображения сдвигается по направлению к линзе, при повышении температуры – в направлении от линзы. Принимая во внимание формулу (1), относительная погрешность фокусного расстояния  $\Delta f'/f'$  одиночной линзы при изменении температуры определится как:

$$\frac{\Delta f'}{f'} = -V\Delta T.$$

Для компенсации температурного смещения плоскости изображения (термооптической аберрации положения) необходимо, чтобы смещение плоскости чувствительной площадки приемника происходило в том же направлении и на такую же величину, что и смещение плоскости изображения:

$$-f' V\Delta T = f'\alpha_k\Delta T, \quad \text{или} \quad \frac{dn/dT}{n-1} - \alpha + \alpha_k = 0, \quad (10)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент линейного расширения материала корпуса.

В случае одиночной линзы и приемника, закрепленных в корпусе, условие устранения терморасфокусировки принимает простой вид:

$$\alpha_k = -V.$$

Если линза выполнена из германия, то для корпуса требуется материал, имеющий большой отрицательный коэффициент линейного расширения, а именно:  $\alpha_k = -130 \cdot 10^{-6}$  1/градус. Для линзы из *IRG24* требуется значение  $\alpha_k = 8 \cdot 10^{-6}$  1/градус. Поэтому для линзы из германия невозможно осуществить пассивную атермализацию из-за отсутствия материала для корпуса с требуемыми характеристиками, а для линз из *IRG24* и *26* возможность для пассивной атермализации имеется.

Оптические схемы современных объективов рассматриваемого типа содержат две, а чаще – три, четыре и более линз.

В [13] определены оптические силы компонентов в двух и трехкомпонентном инфракрасном объективе, позволяющие обеспечить ахроматизацию и пассивную атермализацию. Исследование проведено на моделях тонких линз, расположенных вплотную друг к другу.

Анализ оптических схем объективов с пассивной атермализацией [16] показывает, что в оптической системе инфракрасного объектива линзы не стоят вплотную друг к другу, имеют значительные расстояния вдоль оптической оси

между линзами и, соответственно, различные высоты падения апертурного луча на линзы объектива. Кроме того в объективах могут использоваться не три, а два материала для создания пассивной атермализации. Поэтому поиск оптимальных теоретических решений и практических разработок по созданию инфракрасных объективов с пассивной атермализацией продолжается.

### *Заключение*

Обосновано, что объективы тепловизионных камер (каналов), размещаемые на летательных аппаратах, имеющих высоту полета до 5 км, кроме типовых требований должны удовлетворять специальным требованиям, к которым относятся устранение терморасфокусировки, стабильность фокусного расстояния в диапазоне температур эксплуатации, герметичность конструкции камеры.

На примере рассмотрения термооптических аберраций одиночной линзы из различных материалов показано, что отсутствие терморасфокусировки обеспечивается при использовании материала корпуса, коэффициент линейного расширения которого равен термооптической постоянной материала линзы, взятой с противоположным знаком.

Планируется, что в ходе дальнейшей работы над магистерской диссертацией будет продолжено теоретическое исследование и рассчитаны варианты оптических схем инфракрасных объективов, сопрягаемых с неохлаждаемыми матричными приемниками излучений в тепловизионных каналах, в которых обеспечивается пассивная атермализация.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа : учеб. пособие. – М. : Логос, 2004. – 444 с.
2. Мельников Г. С., Михеев С. В., Самков В. М., Солдатов Ю. И. Основы тепловидения : учеб. пособие. – СПб. : НИУ ИТМО, 2012. – 122 с.
3. Михеев С. В. Основы инфракрасной техники : учеб. пособие. – СПб. : НИУ ИТМО, 2017. – 127 с.
4. Хацевич Т. Н. Оптика для тепловизионных приборов // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. научн. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. – С. 36–39.
5. Терешин Е. А., Хацевич Т. Н. Оптические системы тепловизоров // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. научн. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 5, ч. 1. – С. 41–42.
6. Хацевич Т. Н. Исследование объективов для малогабаритных тепловизионных приборов с позиции модели двухкомпонентного объектива // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 245–261
7. Беспилотная летательная техника [Электронный ресурс]. – URL: [https://bigenc.ru/technology\\_and\\_technique/text/4087725/](https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/4087725/), (дата обращения: 09.04.2020).
8. Каршов Р. С. Классификация беспилотных летательных аппаратов // Проблемы современной науки и образования. – 2016. № 11(53). – С. 38–40.
9. Физические величины : Справочник / Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. ; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. –1232 с.
10. Справочник по инфракрасной технике / Ред. У. Вольф, Г. Цисис. В 4-х тт. Т. 4. Проектирование инфракрасных систем: пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 472 с.

11. Волосов Д. С. Фотографическая оптика : учеб. пособие. – 2-е изд. – М. : Искусство, 1978. – 543 с.
12. Прикладная оптика / Дубовик А. С., Апенко М. И., Дурейко Г. В. и др. : учеб. пособие. – М. : Недра, 1982. – 612 с.
13. Романова Г. Э., Пысь Г. Исследование аберрационных свойств и возможности пассивной атермализации оптических систем, работающих в области 8–12 мкм // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – С. 10–17.
14. Чан Куок Туан. Разработка и исследование линзовых объективов для тепловизионных приборов [Рукопись] : автореф. дис. ...канд. техн. наук / Чан Куок Туан. – СПб, 2008. – 23 с.
15. Ульянова Е. О., Шатунов К. П. Термокомпенсация в оптической системе тепловизионного прибора // Прикладная физика. – Т. 2. – 2012. – С. 116–120.
16. Пат. 2 629 890 Российская Федерция МПК51 G02В 13/14, G02В 9/34; Инфракрасный объектив с пассивной атермализацией [Текст] / А. И. Белоусов; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Швабе - Оборона и Защита». – 2016123317; заявл. 10.06.2016; опубл. 04.09.2017. – Бюл. № 25.

© Ю. С. Киселева, Т. Н. Хацевич, 2020