

# Оптический журнал

Расчет, проектирование и производство оптических систем  
Calculation, design and production of optical systems

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-01-66-79

УДК 771.351.76

## Афокальный корректор для расширения рабочих спектрального и температурного диапазонов инфракрасной системы: методика расчета и достигнутые характеристики

Григорий Исаевич Грейсух<sup>1✉</sup>, Илья Анатольевич Левин<sup>2</sup>,  
Сергей Владимирович Казин<sup>3</sup>

<sup>1, 3</sup>Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

<sup>2</sup>Красногорский завод им. С.А. Зверева, Красногорск Московской обл., Россия

<sup>1</sup>grey@pguas.ru <https://orcid.org/0000-0003-4339-9245>

<sup>2</sup>i.a.levin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-7451-589X>

<sup>3</sup>ksvl88@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-2664-7879>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Афокальный (рефракционный или рефракционно-дифракционный) корректор, включение которого в оптический тракт модернизируемого тепловизионного прибора позволяет расширить его функциональные возможности. **Цель работы.** Разработка методики расчета афокального корректора, расширяющего рабочие спектральный и температурный диапазоны инфракрасной системы при сохранении оптической схемы и механической конструкции ее объектива. Эффективность методики продемонстрирована достигнутыми оптическими характеристиками. **Метод исследования.** Теоретический анализ и математическое моделирование с применением уравнений геометрической оптики и строгой теории дифракции. **Основные результаты.** Разработана методика получения исходных параметров афокального корректора, позволяющего наряду с устранением терморасфокусировки расширить рабочий спектральный диапазон, сохранив апланатичность оптического тракта. Эффективность предложенной методики продемонстрирована на примере расчета афокального корректора, сопрягаемого с объективом, изначально рассчитанным на работу при фиксированной температуре и только в длинноволновом (7–14 мкм) инфракрасном диапазоне спектра. Показано, что в интервале рабочих температур от –40 до 60 °C система «афокальный рефракционно-дифракционный корректор — исходный объектив» способна формировать изображение в двойном спектральном инфракрасном диапазоне, включающем средне- (3,4–5,2 мкм) и длинноволновое (7,5–11,4 мкм) инфракрасное излучение, с контрастом, превышающим контраст изображения, формируемого исходным объективом при фиксированной температуре и только в длинноволновом диапазоне. Также показано, что если расширение спектрального диапазона не требуется, то с задачей успешно справляется афокальный корректор, состоящий только из двух рефракционных линз. **Практическая значимость.** Результаты настоящей статьи открывают возможность варьирования вариантов исполнения тепловизионного прибора, не изменяя оптическую схему его объектива и не внося существенные корректиры в элементы механической конструкции.

**Ключевые слова:** инфракрасный объектив, афокальный корректор, пассивная оптическая атермализация, двухслойная дифракционная микроструктура

**Благодарность:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

**Ссылка для цитирования:** Грейсух Г.И., Левин И.А., Казин С.В. Афокальный корректор для расширения рабочих спектрального и температурного диапазонов инфракрасной системы: расчет и достигнутые характеристики // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 1. С. 66–79. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-66-79>

Коды OCIS: 110.0110, 220.0220

# Afocal corrector for expanding the operating spectral and temperature ranges of an infrared system: Design methodology and achieved optical performance

GRIGORY I. GREISUKH<sup>1</sup>✉, IL'YA A. LEVIN<sup>2</sup>, SERGEY V. KAZIN<sup>3</sup>

<sup>1, 3</sup>Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

<sup>2</sup>Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, Moscow region, Russia

<sup>1</sup>[grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru) <https://orcid.org/0000-0003-4339-9245>

<sup>2</sup>[i.a.levin@mail.ru](mailto:i.a.levin@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-7451-589X3>

<sup>3</sup>[ksvl88@yandex.ru](mailto:ksvl88@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0002-2664-7879>

## Abstract

**Subject of the study.** An afocal (refractive or refractive-diffractive) corrector, the inclusion of which in the optical channel of a modernized thermal imaging device allows expanding its functionality.

**Purpose of the study.** To present a design methodology for afocal corrector that expands the operating spectral and temperature ranges of a thermal imaging device while maintaining the optical scheme and mechanical structure of its objective. The effectiveness of the methodology is confirmed by the achieved optical performance. **Research method.** Theoretical analysis and mathematical modeling using the equations of geometric optics and the rigorous theory of diffraction. **Main results.** A methodology has been developed for obtaining the initial parameters of an afocal corrector, which, along with the elimination of thermal defocusing, allows expanding the working spectral range while maintaining the aplanatic nature of the optical channel. The effectiveness of the proposed methodology is demonstrated by the example of calculating an afocal corrector coupled with an objective originally designed to operate at a fixed temperature and only with long-wavelength (7–14 μm) infrared radiation.

It is shown that in the operating temperature range from –40 to 60 °C the system "Afocal refractive-diffraction corrector — original objective" is capable of forming an image in a double spectral range, including medium- (3,4–5,2 μm) and long-wavelength (7,5–11,4 μm) infrared radiation, with a contrast exceeding the image contrast, formed by the original objective at a fixed temperature and only in the long wavelength range. It is also shown that if the expansion of the spectral range is not required, then an afocal corrector consisting of only two refractive lenses successfully copes with the task. **Practical significance.** The results of this paper open up the possibility of varying the versions of the thermal imaging device without changing the optical scheme of its objective and without making significant adjustments to the elements of the mechanical structure.

**Keywords:** infrared objective, afocal corrector, passive optical athermalization, two-layer diffractive microstructure

**Acknowledgment:** the research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project № 20-19-00081).

**For citation:** Greisukh G.I., Levin I.A., Kazin S.V. Afocal corrector for expanding the operating spectral and temperature ranges of an infrared system: Design methodology and achieved optical performance [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 1. P. 66–79. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-66-79>

OCIS codes: 110.0110, 220.0220

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач модернизации оптико-электронных приборов является расширение их функциональных возможностей. При этом изменения, вносимые в оптическую схему и механическую конструкцию объектива модернируемого прибора, могут оказаться столь существенными, что заимствование деталей у исходного прибора ограничится лишь отдельными элементами корпуса. В результате модернизация фактически превращается в разработку нового оптико-электронного прибора.

Альтернативным является подход, при котором желаемые воздействия на характеристики оптической системы осуществляются с помощью афокального корректора [1–5]. Это дает возможность сохранить как оптическую схему, так и механическую конструкцию объектива модернируемого прибора. В случае тепловизионных приборов афокальные корректоры могут быть использованы, в частности, для достижения пассивной атермализации оптическим методом в качестве альтернативы разработке механической конструкции термокомпенсатора. Кроме того, большей функциональности в результате модернизации можно добиться, если совместить устранение терморасфокусировки с расширением рабочего спектрального диапазона, например, включив в него одновременно среднее (3,4–5,2 мкм) и длинноволновое (7,5–11,4 мкм) инфракрасное (ИК) излучение.

При этом основной сложностью достижения пассивной оптической атермализации системы «афокальный корректор – исходный объектив» является ограниченный выбор оптических материалов для линз корректора, которые позволили бы сохранить у системы в целом исходную минимизацию aberrаций и устранить терморасфокусировку. Как показано в публикации [6], даже в видимой области спектра, где номенклатура бесцветного стекла составляет несколько сотен марок, приходится применять полимерные материалы.

Проблема усугубляется при переходе в длинноволновый и тем более в двойной ИК диапазон, включающий среднее и длинноволновое ИК излучение. В этой области спектра количество прозрачных оптических материалов как кристаллов, так и бескислородных стекол существенно меньше. В условиях ограниченного выбора следует рассмотреть возможность

расширения используемой элементной базы корректора за счет включения в нее дифракционного оптического элемента (ДОЭ), осуществляющего преобразование падающего волнового фронта в результате дифракции света на рельефной пилообразной микроструктуре. Отметим, что проблема спектральной и угловой зависимостей дифракционной эффективности (ДЭ) ДОЭ может быть решена благодаря использованию многослойной микроструктуры, в частности двухслойной с двумя внутренними пилообразными рельефами [7, 8]. Кроме того, такая компоновка ДОЭ позволит сохранить его механическую прочность в условиях значительного перепада температур эксплуатации.

Что касается приемника ИК излучения, то предпочтительным с точки зрения массогабаритных характеристик и уровня энергозатрат является неохлаждаемый микроболометр. При этом коммерчески доступные длинноволновые и двухдиапазонные микроболометры при одинаковом шаге матрицы имеют, как правило, одинаковый размер фоточувствительной области и общий габарит. Это открывает возможность без существенной корректировки элементов механической конструкции создавать различные варианты исполнения тепловизионного прибора: с объективом, работающим в длинноволновом ИК диапазоне, с атермализованной оптической системой «афокальный корректор – объектив» без расширения или с расширением спектрального диапазона. Тип приемника излучения, наличие или отсутствие афокального корректора в оптическом тракте, а также вид просветляющего покрытия линз могут быть оформлены как отдельные исполнения модернируемого тепловизионного прибора.

Авторам неизвестны работы, посвященные пассивной оптической атермализации тепловизионных систем, при которой сохранялась бы функциональность исходного объектива, его оптическая схема и механическая конструкция, а также имелась бы возможность расширения при необходимости рабочего спектрального диапазона. В наиболее близкой по тематике публикации [6] представлен расчет двухзеркального объектива с афокальным корректором, который помимо устранения монохроматических aberrаций системы позволяет добиться пассивной атермализации оптиче-

ским методом. При этом самостоятельно (без корректора) этот объектив не способен формировать изображение требуемого качества. Кроме того, представленные для расчета афокального корректора формулы не предусматривают возможность расширения рабочего спектрального диапазона, который для рассматриваемой оптической системы ограничен видимой областью спектра.

Изложенное выше определяет актуальность и научную новизну использованного в настоящей статье подхода к решению задачи модернизации тепловизионных систем. Цель работы — разработка методики расчета афокального корректора, расширяющего рабочие спектральный

и температурный диапазоны ИК системы при сохранении оптической схемы и механической конструкции ее объектива; демонстрация эффективности методики достигнутыми оптическими характеристиками.

### ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРОЗРАЧНЫЕ В СРЕДНЕМ И ДЛИННОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНАХ ИНФРАКРАСНОГО СПЕКТРА

Как было отмечено выше, основная трудность достижения пассивной оптической атермализации системы «афокальный корректор — исходный объектив» связана с ограниченным

**Таблица 1.** Оптические характеристики коммерчески доступных материалов для ИК диапазона спектра  
**Table 1.** Optical dates of commercially available materials for the infrared spectral range

№	Оптический материал	Показатель преломления	Коэффициент дисперсии	Термооптическая постоянная, $\nu_{t,\lambda} \times 10^6$ , К <sup>-1</sup>	ТКЛР*, $\alpha_g \times 10^6$ , К <sup>-1</sup>
1	Германий	4,003816	96,09206	132,8200	5,7
2	Селенид цинка	2,402662	36,53505	33,53935	7,1
3	Сульфид цинка	2,191765	15,69138	27,01317	6,6
4	Арсенид галлия	3,274804	54,18523	81,00962	5,0
5	Хлорид серебра	1,977600	35,14337	-91,05307	32,4
6	Бромид цезия	1,661707	83,16444	-141,2446	47,2
7	Бромид калия	1,523371	37,57325	-118,6118	43,0
8	Хлорид калия	1,454013	20,35310	-106,4529	36,0
9	Хлорид натрия	1,490655	12,75732	-111,1946	41,1
10	Йодид калия	1,619226	63,49264	-121,5000	43,0
11	Йодид цезия	1,738726	133,0237	-180,7135	48,3
12	Фторид бария	1,392619	4,934356	-52,87227	18,1
13	Фторид стронция	1,285361	1,775180	-56,17102	18,1
14	Бром-иодид таллия	2,369423	83,86307	-227,1975	58,0
15	Ge <sub>10</sub> As <sub>40</sub> Se <sub>50</sub>	2,607341	83,53466	-8,068883	20,8
16	Ge <sub>22</sub> As <sub>20</sub> Se <sub>58</sub>	2,492524	66,31864	21,41713	17,0
17	Ge <sub>33</sub> As <sub>12</sub> Se <sub>55</sub>	2,494668	61,94044	30,99111	13,3
18	Ge <sub>30</sub> As <sub>13</sub> Se <sub>32</sub> Te <sub>25</sub>	2,785092	73,43137	44,53355	13,6
19	Ge <sub>20</sub> Se <sub>65</sub> Sb <sub>15</sub>	2,583732	54,97522	7,241637	17,6
20	Ge <sub>28</sub> Se <sub>60</sub> Sb <sub>12</sub>	2,601119	59,02622	26,06129	15,2
21	As <sub>28</sub> Se <sub>72</sub>	2,646034	99,08465	-39,68458	27,0
22	As <sub>40</sub> Se <sub>60</sub>	2,776308	73,29171	-6,904084	22,0
23	As <sub>30</sub> Se <sub>63</sub> Sb <sub>4</sub> Sn <sub>3</sub>	2,765924	71,67064	-8,268230	20,9
24	As <sub>40</sub> S <sub>60</sub>	2,382770	31,78320	-22,21170	21,0

Примечание. \*Тепловой коэффициент линейного расширения.

Note. \*Thermal coefficient of linear expansion.

**Таблица 2.** Коммерчески доступные марки бескислородных стекол различных производителей  
**Table 2.** Commercially available brands of oxygen-free glasses from various manufacturers

Материал	Компания					
	CDGM [12]	NHG [14]	Schott [15]	Vitron [16]	Amorphous materials [17]	Другие
Ge <sub>28</sub> Se <sub>60</sub> Sb <sub>12</sub>	HWS1	IRG205	IRG25	IG5	AMTIR3	BD2 [10]
Ge <sub>20</sub> Se <sub>65</sub> Sb <sub>15</sub>	HWS2	IRG203	—	—	—	—
Ge <sub>33</sub> As <sub>12</sub> Se <sub>55</sub>	HWS3	IRG201	IRG22	IG2	AMTIR1	—
Ge <sub>22</sub> As <sub>20</sub> Se <sub>58</sub>	HWS4	IRG202	—	—	—	GASIR1 [18]
Ge <sub>10</sub> As <sub>40</sub> Se <sub>50</sub>	HWS5	IRG207	IRG24	IG4	—	—
As <sub>40</sub> Se <sub>60</sub>	HWS6	IRG206	IRG26	IG6	AMTIR2	GASIR5 [18]
Ge <sub>30</sub> As <sub>13</sub> Se <sub>32</sub> Te <sub>25</sub>	HWS7	—	IRG23	IG3	—	—
As <sub>30</sub> Se <sub>63</sub> Sb <sub>4</sub> Sn <sub>3</sub>	—	IRG204	—	—	—	ИКС25 [19]
As <sub>28</sub> Se <sub>72</sub>	—	—	—	—	AMTIR4	—
As <sub>40</sub> S <sub>60</sub>	HWS27	IRG208	IRG27	—	AMTIR6	—

выбором оптических материалов, прозрачных в требуемом спектральном диапазоне. В табл. 1 представлены оптические характеристики ряда коммерчески доступных ИК материалов. Под номерами 1–14 располагаются оптические кристаллы [9–11], а под номерами 15–24 — бескислородные стекла [12–15]. Следует отметить, что характеристики стекол конкретных марок, соответствующих одному и тому же химическому составу бескислородного стекла, могут несущественно различаться исходя из технологических параметров варки. В табл. 2 перечислены коммерчески доступные марки бескислородных стекол различных производителей.

Значения показателя преломления стекол, представленные в табл. 1, рассчитаны на длине волны 10,6 мкм, а коэффициента дисперсии — для диапазона длин волн 3,4–11,4 мкм. Выбор ширины спектра основан на результатах исследования, приведенного в статье [20] для двухдиапазонного просветляющего покрытия. При указанных краевых значениях длин волн рабочей области спектра ( $\lambda_{\min} = 3,4$  мкм,  $\lambda_{\max} = 11,4$  мкм) и с внутренними границами поддиапазонов соответственно  $\lambda_1 = 5,2$  мкм и  $\lambda_2 = 7,5$  мкм коэффициент пропускания модели просветляющего покрытия не опускается ниже 99% при нормальном падении и ниже 97% при углах падения излучения до 30°.

К преимуществам кристаллических материалов можно отнести большой разброс значений оптических характеристик. При этом бескислородные стекла в общей массе имеют существенно меньшие значения термооптической постоянной, что ограничивает влияние изменения температуры на фокусное расстояние линзы. Кроме того, обработка бескислородных стекол допускает применение современных методов формообразования на основе прецизионной штамповки, которая дает преимущества при тиражировании линз с асферическими преломляющими поверхностями. Однако если рассматривать в совокупности данные табл. 1, то, несмотря на широкий диапазон значений оптических постоянных, плотность заполнения диапазона неравномерна. Именно с этим в основном и связаны трудности сохранения у системы в целом исходной минимизации aberrаций при одновременном устраниении терморасфокусировки.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА АФОКАЛЬНОГО КОРРЕКТОРА

Известно, что с целью уменьшения порогового значения температурной чувствительности все оптические системы, работающие с неохлаждаемыми приемниками ИК излучения, проектируются как сверхсветосильные.

Поэтому при аберрационной коррекции принципиально важным является сохранение апланатичности системы «афокальный корректор – объектив», предполагающей отсутствие сферической aberrации и комы в окрестности оптической оси. Что касается подавления продольного хроматизма, то, как показано в работе [21] для двойного ИК диапазона спектра, у простых по конструкции оптических систем это может быть достигнуто как комбинацией рефракционных линз, так и за счет ДОЭ. Однако требование одновременного сочетания апланатичности, подавления терморасфокусировки и возможности минимизации продольного хроматизма в двойном диапазоне ИК спектра может сделать применение ДОЭ в составе афокального корректора безальтернативным.

Предположив, что афокальный корректор, устанавливаемый перед исходным объективом, бесконечно тонкий и исходя из того, что его оптическая сила на расчетной (основной) длине волны  $\lambda$  заданного спектрального диапазона и при номинальном значении термодинамической температуры  $t_1$  должна быть равной нулю, а угловое увеличение равным единице, условие пассивной атермализации в сочетании с возможностью хроматической коррекции и сохранения апланатичности можно представить в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^J \varphi_j^{(t_1)} = 0 \\ S'_{F'(\text{corr+lens})}^{(t_2)} = S'_{F'(\text{lens})}^{(t_1)} + \Delta l \\ \sum_{j=1}^J h_j^2 \frac{\varphi_j^{(t_1)}}{v_j} = -S'_{\text{l ch}}^{(t_1)} \\ \Phi_{(\text{corr+lens})}^{(t_1)} = \frac{\sin u_{J+1}}{h_1} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $h_1$  — высота падения первого (апертурного) параксиального луча на первый оптический элемент афокального корректора,  $\varphi_j$  — оптическая сила  $j$ -го элемента афокального корректора,  $s'_{F'(\text{lens})}$ ,  $s'_{F'(\text{corr+lens})}$  — задние фокальные отрезки объектива и системы «афокальный корректор — объектив»,  $\Delta l$  — смещение плоскости фоточувствительных элементов приемника излучения относительно оптической системы, обусловленное тепло-

вым расширением механической конструкции объектива,  $v_j$  — коэффициент дисперсии  $j$ -го оптического элемента афокального корректора,  $S'_{\text{l ch}}$  — первая хроматическая сумма объектива, вычисленная для заданного рабочего спектрального диапазона,  $\Phi_{(\text{corr+lens})}$  и  $\sin u_{J+1}$  — оптическая сила и числовая апертура системы «афокальный корректор — объектив» соответственно. Здесь и далее верхний индекс указывает на номинальную ( $t_1$ ) или фактическую ( $t_2$ ) термодинамическую температуру, при которой измерена или рассчитана характеристика. При этом все входящие в систему уравнений (1) оптические силы элементов и фокальные отрезки должны быть приведены на длине волны  $\lambda$ , а коэффициенты дисперсии вычислены для этой и крайних длин волн заданного рабочего спектрального диапазона.

Для достижения атермализации необходимо, чтобы изменение оптической силы афокального корректора в диапазоне температур ( $t_2 - t_1$ ) удовлетворяло условию

$$\Delta\Phi_{(\text{corr})} = a/b, \quad (2)$$

где

$$a = s'_{F(\text{lens})}^{(t_2)} - s'_{F(\text{lens})}^{(t_1)} - \Delta l,$$

$$\begin{aligned} b = & \left[ d - s'_{F(\text{lens})}^{(t_1)} \left( 1 + s'_{F(\text{lens})}^{(t_1)} \Phi_{(\text{lens})}^{(t_1)} \right) \right] s'_{F(\text{lens})}^{(t_2)} + \\ & + \frac{1 + s'_{F(\text{lens})}^{(t_2)} s'_{F(\text{lens})}^{(t_2)} \Phi_{(\text{lens})}^{(t_2)} 2}{\Phi_{(\text{lens})}^{(t_2)} 2} - \left[ s'_{F(\text{lens})}^{(t_1)} + \Delta l \right] \times \\ & \times \left[ d - s'_{F(\text{lens})}^{(t_1)} \left( 1 + s'_{F(\text{lens})}^{(t_1)} \Phi_{(\text{lens})}^{(t_1)} \right) + s'_{F(\text{lens})}^{(t_2)} \right]. \end{aligned}$$

Здесь  $s_{F(\text{lens})}$  — передний фокальный отрезок объектива,  $\Phi_{(\text{lens})}$  — оптическая сила объектива,  $d$  — расстояние между главными плоскостями афокального корректора и объектива, представленных в виде однокомпонентных систем в бесконечно тонком приближении.

Условие (2) предъявляет требование к температурному изменению оптической силы афокального корректора  $\Delta\Phi_{(\text{corr})}$ , которое, приводя к смещению плоскости изображения оптической системы «афокальный корректор — объектив», должно компенсировать в заданном диапазоне температур терморасфокусировку исходного объектива. Использованная форма

записи условия (2) обусловлена громоздкостью формулы.

В силу сделанного выше предположения о том, что корректор бесконечно тонкий, температурное изменение оптической силы афокального корректора имеет вид

$$\Delta\varphi_{(\text{corr})} = \sum_{j=1}^J \left( \varphi_j^{(t_2)} - \varphi_j^{(t_1)} \right), \quad (3)$$

где оптические силы  $\varphi_j^{(t_i)}$  вычисляются по одной из следующих ниже формул в зависимости от типа элемента [22]:

$$\varphi_{\text{RL}}^{(t_2)} = \varphi_{\text{RL}}^{(t_1)} \left( 1 + v_{t,\lambda} (t_2 - t_1) \right), \quad (4)$$

$$\varphi_{\text{DOE}}^{(t_2)} = \frac{\varphi_{\text{DOE}}^{(t_1)}}{(1 + \alpha_{\text{DOE}} (t_2 - t_1))^2}. \quad (5)$$

Здесь  $v_{t,\lambda}$  и  $\alpha_{\text{DOE}}$  — термооптическая постоянная материала рефракционной линзы и ТКЛР материала подложки ДОЭ соответственно.

Таким образом, пассивная оптическая атермализация в сочетании с ахроматизацией и апланатичностью системы «афокальный корректор — объектив» предъявляет взаимосвязанные требования к оптическим силам и коэффициентам дисперсии элементов корректора, а также к зависимым от температуры характеристикам их материалов. При этом вне рассмотрения осталось согласование световых диаметров афокального корректора и исходного объектива. Препятствием для такого согласования может оказаться большая по модулю оптическая сила любой из рефракционных линз афокального корректора. Вытекающее отсюда ограничение на наибольший из модулей оптических сил рефракционных линз, накладываемое на решения системы уравнений (1) в совокупности с уравнением, образованным правыми частями формул (2) и (3), позволяет оценить, используя данные табл. 1, целесообразность включения в оптическую схему афокального корректора ДОЭ (т.е. целесообразность перехода от чисто рефракционного к рефракционно-дифракционному типу схемы), а также выбрать оптические материалы минимально допустимого количества рефракционных линз в составе корректора.

В результате процесс получения исходных параметров афокального корректора для последующей оптимизации в составе системы «афокальный корректор — объектив» включает следующие этапы.

1. Определение значений переднего и заднего фокальных отрезков, а также оптической силы объектива при температурах  $t_2$  и  $t_1$ , используя его известные конструктивные параметры.

2. Определение значения первой хроматической суммы объектива  $S_{\text{I ch}}$  в заданном рабочем спектральном диапазоне, также используя его известные конструктивные параметры.

3. Расчет смещения плоскости фоточувствительных элементов приемника излучения ( $\Delta l$ ) в интервале температур  $(t_2 - t_1)$ , используя известные параметры механической конструкции объектива.

4. Выбор размера воздушного промежутка между главными плоскостями афокального корректора и объектива ( $d$ ) исходя из габаритных возможностей размещения афокального корректора.

5. На основе данных табл. 1 путем решения системы уравнений (1) в совокупности с уравнением, образованным правыми частями формул (2) и (3), выбор типа оптической схемы афокального корректора (рефракционного или рефракционно-дифракционного), а также определение минимально допустимого количества рефракционных линз в составе корректора, оптических сил всех элементов и характеристик их материалов.

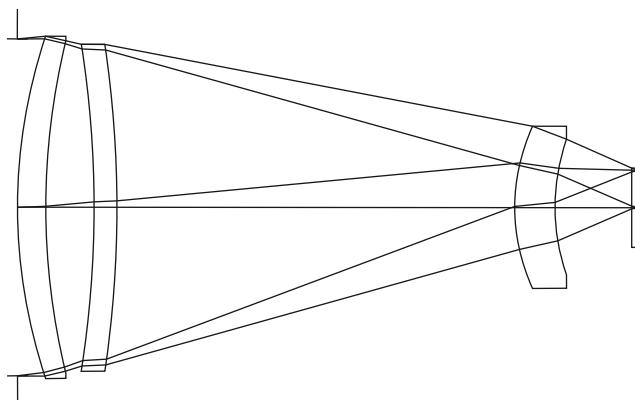
6. Оптимизация полученных параметров афокального корректора в составе системы «афокальный корректор — объектив».

## РАСЧЕТ АФОКАЛЬНОГО КОРРЕКТОРА

В качестве объектива модернизируемого тепловизионного прибора выберем представленную в работе [23] оптическую схему (см. рис. 1) с фокусным расстоянием 74,85 мм, угловым полем 10,66° и диафрагменным числом 1,25, рассчитанную на работу с микроболометром, чувствительным в спектральном диапазоне 7–14 мкм. Формат матричного фотоприемника составляет 640×480, а размер пикселя — 17 мкм. С целью сохранения размера линейного поля зрения выберем двухдиапазонный микроболометр марки АСТРОН-64017-2 с форматом 640×512, спектральным диапазоном 3–5

и 8–14 мкм и шагом матрицы  $\Lambda = 17$  мкм [24]. За частоту Найквиста микроболометра примем ближайшее целое большее, чем  $1/(2\Lambda)$ , т.е.  $N_N = 30$  мм<sup>-1</sup>. Рабочий диапазон длин волн ограничим значениями  $\lambda_{min} = 3,4$  мкм,  $\lambda_{max} = 11,4$  мкм с внутренними границами поддиапазонов  $\lambda_1 = 5,2$  мкм и  $\lambda_2 = 7,5$  мкм соответственно. Интервал рабочих температур примем от –40 до 60 °C.

Полагая, что корпусные детали объектива выполнены из алюминия с ТКЛР  $\alpha_{mount} = 23 \times 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>, и используя известные конструктивные параметры его оптической схемы, можно получить значения переднего и заднего фокальных отрезков, а также оптической силы при номинальной и краевых температурах рабочего диапазона, приведенные в табл. 3. При этом смещение плоскости фоточувствительных элементов приемника излучения ( $\Delta l$ ) в интервале температур от –40 до 20 °C составляет –21,9 мкм, а в интервале температур от 20 до 60 °C — 14,6 мкм.



**Рис. 1.** Оптическая схема объектива модернизируемого тепловизионного прибора

**Fig. 1.** Optical scheme of the upgraded thermal imaging device objective

**Таблица 3.** Определение значений переднего и заднего фокальных отрезков, а также оптической силы объектива при температурах рабочего диапазона

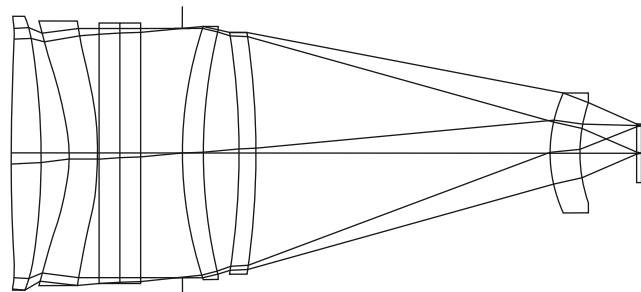
**Table 3.** Determination of the front and rear focal lengths values, as well as the optical power of the lens at temperatures in the operating range

Оптические характеристики	Номинальная и краевые температуры, °C		
	20	–40	60
Передний фокальный отрезок, мм	–6,239	–7,156	–5,631
Задний фокальный отрезок, мм	14,184	14,689	13,851
Оптическая сила, дптр	13,360	13,331	13,378

Первая хроматическая сумма объектива в расширенном рабочем спектральном диапазоне 3,4–11,4 мкм составляет 96 мкм. Значение расстояния  $d$  выберем равным 46 мм, что соответствует примерно зазору в 10 мм между афокальным корректором и фронтальной поверхностью первой линзы объектива.

В результате выполнения 5-го этапа процесса получения исходных параметров афокального корректора были выбраны оптические материалы и получены значения оптических сил трехэлементной рефракционно-дифракционной схемы. Первые два элемента — это рефракционные линзы из бескислородного стекла марки HWS5 и из монокристаллического германия с оптическими силами  $\varphi_1 = 10,855$  дптр и  $\varphi_2 = -11,016$  дптр соответственно. Третий элемент — это ДОЭ на подложке из монокристаллического германия с оптической силой  $\varphi_3 = 0,162$  дптр.

Последующий переход к конечным толщинам элементов и оптимизация конструктивных параметров афокального корректора



**Рис. 2.** Оптическая схема системы «афокальный корректор — объектив», рассчитанной на работу в двойном средне- и длинноволновом ИК диапазоне

**Fig. 2.** Optical scheme of the “afocal corrector — objective” system, designed to operating in the double medium- and long-wave infrared range

**Таблица 4.** Конструктивные параметры системы «афокальный корректор — объектив», рассчитанной на работу в средне- ( $\Delta\lambda = 3,4\text{--}5,2 \mu\text{м}$ ) и длинноволновом ( $\Delta\lambda = 7,5\text{--}11,4 \mu\text{м}$ ) ИК спектральном диапазоне

**Table 4.** Design parameters of the “afocal corrector — objective” system designed to operating in the medium- ( $\Delta\lambda = 3,4\text{--}5,2 \mu\text{m}$ ) and long-wave ( $\Delta\lambda = 7,5\text{--}11,4 \mu\text{m}$ ) infrared spectral range

Номер поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Материал
1	716,400	7,007	HWS5
2	-147,042	6,883	—
3	-40,199	7,041	Germanium
4	-55,329	0,190	—
5	$\infty$	5,000	SrF <sub>2</sub>
6	$\infty$	0,000	—
7*	$\infty$	5,000	Germanium
8	$\infty$	10,000	—
9	$\infty$	0,000	—
10	92,900	5,100	Germanium
11	126,180	8,600	—
12	-187,070	4,000	ZnSe
13	-205,100	70,900	—
14	34,910	7,000	Germanium
15	34,910	13,900	—
16	$\infty$	1,000	Germanium
17	$\infty$	0,000	—

Примечание. \* — поверхность с дифракционной микроструктурой (порядок дифракции  $m = 1$ , фазовые коэффициенты:  $A_1 = -49,063 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-2}$ ,  $A_2 = 195,065 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-4}$ ,  $A_3 = -155,444 \times 10^{-10} \text{ mm}^{-6}$ ,  $A_4 = 511,069 \times 10^{-14} \text{ mm}^{-8}$ ,  $A_5 = -134,786 \times 10^{-17} \text{ mm}^{-10}$ ).

Note. \* is surface with a diffraction microstructure (diffraction order  $m = 1$ , phase coefficients:  $A_1 = -49.063 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-2}$ ,  $A_2 = 195.065 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-4}$ ,  $A_3 = -155.444 \times 10^{-10} \text{ mm}^{-6}$ ,  $A_4 = 511.069 \times 10^{-14} \text{ mm}^{-8}$ ,  $A_5 = -134.786 \times 10^{-17} \text{ mm}^{-10}$ ).

**Таблица 5.** Коэффициенты асферической деформации поверхностей системы «афокальный корректор — объектив», рассчитанной на работу в средне- и длинноволновом ИК спектральном диапазоне

**Table 5.** Coefficients of aspheric deformation of surfaces of the “afocal corrector — objective” system designed to operating in the medium- and long-wave infrared spectral range

Номер поверхности	Коэффициенты асферической деформации при $k = 0$				
	$\alpha_2 \times 10^8, \text{мм}^{-3}$	$\alpha_3 \times 10^{11}, \text{мм}^{-5}$	$\alpha_4 \times 10^{13}, \text{мм}^{-7}$	$\alpha_5 \times 10^{17}, \text{мм}^{-9}$	$\alpha_6 \times 10^{20}, \text{мм}^{-11}$
1	2,618	85,003	-25,069	257,236	-133,417
2	75,099	2,714	-10,103	86,850	-57,638
3	1048,407	-389,537	11,358	41,374	-1,983
4	608,280	-59,927	-19,034	176,027	-51,477

в программе оптического проектирования ZEMAX [25] позволили получить оптическую схему, представленную на рис. 2. В табл. 4 и табл. 5 приведены конструктивные параметры системы «афокальный корректор — объ-

ектив», рассчитанной на работу в средне- и длинноволновом ИК спектральном диапазоне.

Коническая постоянная, а также коэффициенты асферической деформации, представленные в табл. 5, входят в уравнение стрелки

прогиба поверхности, описываемой в ZEMAX четной асферикой вида

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2\rho^2}} + \sum_{i=1}^l \alpha_i \rho^{2i}, \quad (6)$$

где  $c$  — кривизна поверхности при вершине, равная обратному значению радиуса,  $\rho$  — радиальная координата,  $k$  — коническая постоянная,  $\alpha_i$  — коэффициенты асферической деформации.

Порядок дифракции и фазовые коэффициенты при описании дифракционной поверхности типа Binary2 в ZEMAX входят в уравнение фазовой добавки в луч вида

$$\Psi(\rho) = m \sum_{i=1}^l A_i \rho^{2i}, \quad (7)$$

где  $m$  — порядок дифракции,  $A_i$  — фазовые коэффициенты.

Анализ, выполненный в рамках скалярной и строгой теорий дифракции для двухслойной двухрельефной микроструктуры ДОЭ рефракционно-дифракционного афокального корректора, показал, что в двойном ИК диапазоне оптимальной парой для монокристаллического германия (*Germanium*) является монокристалл фторида стронция ( $\text{SrF}_2$ ). При этом

на краю апертуры ДОЭ, где минимальный период микроструктуры  $P_{\min} = 2388$  мкм, максимально достижимую 94% в интервале углов падения излучения из воздуха на микроструктуру от 0 до  $\theta_{\max} = 5,5^\circ$ , обеспечивают глубину пилообразных рельефов фторида стронция и германия соответственно  $H_{\text{SrF}_2} = 56,133$  мкм и  $H_{\text{Ge}} = 9,00$  мкм. Сразу же заметим, что, как показано в работе [26] для средневолнового диапазона ИК излучения, побочные дифракционные порядки не будут ощутимо влиять на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой, при условии, что ДЭ не опускается ниже 67%.

В табл. 6 приведено сравнение характеристик оптических схем исходного объектива и объектива с афокальным корректором.

Из данных табл. 6 следует, что афокальный рефракционно-дифракционный корректор действительно почти полностью устраняет терморасфокусировку и одновременно позволяет расширить рабочий спектральный диапазон. В результате система «афокальный корректор — объектив» с фокусным расстоянием 74,85 мм, диафрагменным числом 1,25 в пределах углового поля  $2\omega \leq 10,66^\circ$  формирует изображение на частоте Найквиста микроболометра ( $N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$ ) с контрастом  $T \geq 0,34$

**Таблица 6.** Оптические характеристики исходного объектива и объектива с афокальным корректором  
**Table 6.** Optical performance of the original objective and objective with afocal corrector

Характеристика	Исходный объектив	Система «афокальный корректор — объектив»
Угловое поле, град	10,66	
Фокусное расстояние, мм	74,85	
Диафрагменное число	1,25	
Рабочий спектральный диапазон, мкм	7–14	3,4–5,2 7,5–11,4
Терморасфокусировка в интервале температур от $-40$ до $60^\circ\text{C}$ , мм	0,838	0,033
Контраст на частоте Найквиста микроболометра ( $N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$ ) при температурах $t$ в спектральных диапазонах	$t, ^\circ\text{C}$	
3,4–5,2 мкм	–	–
7,5–11,4 мкм	0	0,33
Продольный хроматизм, мкм	47	87
Модуль дисторсии по полю изображения, %	0,3	0,2

в средневолновом ( $3,4\text{--}5,2$  мкм) и с контрастом  $T \geq 0,49$  в длинноволновом ( $7,5\text{--}11,4$  мкм) ИК диапазоне во всем интервале рабочих температур от  $-40$  до  $60$  °C. Что касается увеличения остаточного хроматизма, приходящегося на средневолновую ИК область, то это несколько снижает контраст на частоте Найквиста в указанном спектральном поддиапазоне, но не отражается на разрешающей способности тепловизионной системы, которая остается ограничена шагом матрицы выбранного двухдиапазонного приемника излучения.

Пассивная оптическая атермализация осуществлялась для всей совокупности материалов линз и элементов конструкции. При этом для монокристаллического германия (*Germanium*), монокристаллического фторида стронция ( $\text{SrF}_2$ ) и поликристаллического селенида цинка ( $\text{ZnSe}$ ) использовались оптические характеристики и термооптические постоянные, представленные в каталоге INFRARED программы оптического проектирования ZEMAX, а для линзы из материала HWS5 — представ-

ленные в каталоге бескислородных стекол фирмы CDGM [12].

В заключение рассмотрим вариант компоновки афокального корректора при условии сохранения у модернизируемого тепловизионного прибора изначальной ширины рабочего спектрального диапазона. Так как в данном случае продольный хроматизм исходного объектива скорректирован, то при выполнении 5-го этапа процесса получения исходных параметров оказалось возможным ограничиться двухэлементной схемой афокального корректора, состоящей только из рефракционных линз с равными по модулю и противоположными по знаку оптическими силами. При этом, исходя из близкого к нулю значения требуемой первой хроматической суммы ( $S_{\text{I ch}} = 4,6$  мкм), выбор оптических материалов следовало осуществлять из ряда с близкими значениями коэффициента дисперсии.

В результате были получены следующие значения оптических сил линз афокального корректора:  $\varphi_1 = -\varphi_2 = 5,720$  дптр. Материал

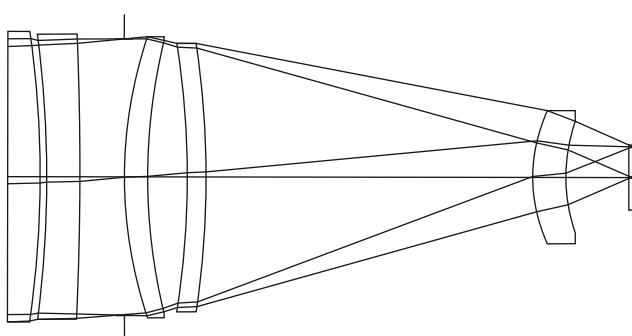
**Таблица 7.** Конструктивные параметры системы «афокальный корректор – объектив», рассчитанной на работу в длинноволновом ( $\Delta\lambda = 7\text{--}14$  мкм) ИК спектральном диапазоне

**Table 7.** Design parameters of the “afocal corrector – objective” system designed to operating in the long-wave ( $\Delta\lambda = 7\text{--}14$  μm) infrared spectral range

Номер поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Материал
1	$\infty$	7,000	KRS5
2	-235,084	1,447	–
3*	-230,707	7,193	HWS7
4	-961,902	10,000	–
5	$\infty$	0,000	–
6	92,900	5,100	<i>Germanium</i>
7	126,180	8,600	–
8	-187,070	4,000	ZnSe
9	-205,100	70,900	–
10	34,910	7,000	<i>Germanium</i>
11	34,910	13,900	–
12	$\infty$	1,000	<i>Germanium</i>
13	$\infty$	0,000	–

Примечание. \* — асферическая поверхность (коэффициенты асферической деформации:  $\alpha_2 = -91,575 \times 10^{-10}$  мм $^{-3}$ ,  $\alpha_3 = 43,616 \times 10^{-12}$  мм $^{-5}$ ,  $\alpha_4 = -95,392 \times 10^{-15}$  мм $^{-7}$ ,  $\alpha_5 = 97,214 \times 10^{-18}$  мм $^{-9}$ ,  $\alpha_6 = -35,982 \times 10^{-21}$  мм $^{-11}$ ).

Note. \* is aspherical surface (aspherical deformation coefficients:  $\alpha_2 = -91.575 \times 10^{-10}$  mm $^{-3}$ ,  $\alpha_3 = 43.616 \times 10^{-12}$  mm $^{-5}$ ,  $\alpha_4 = -95.392 \times 10^{-15}$  mm $^{-7}$ ,  $\alpha_5 = 97.214 \times 10^{-18}$  mm $^{-9}$ ,  $\alpha_6 = -35.982 \times 10^{-21}$  mm $^{-11}$ ).



**Рис. 3.** Оптическая схема системы «афокальный корректор — объектив», рассчитанной на работу в длинноволновом ИК спектральном диапазоне  
**Fig. 3.** Optical scheme of the "afocal corrector — objective" system designed to operating in the long-wave infrared spectral range

первой линзы — бром-йодид таллия (торговая марка KRS5), а второй — бескислородное стекло марки HWS7. Коэффициенты дисперсии в спектральном диапазоне 7–14 мкм соответственно равны 89,766 для KRS5 и 89,021 для HWS7.

Последующий переход к конечным толщинам элементов и оптимизация конструктивных параметров позволили получить оптическую схему, представленную на рис. 3. В табл. 7 приведены конструктивные параметры системы «афокальный корректор — объектив», рассчитанной на работу в длинноволновом ИК спектральном диапазоне.

Достигнутый уровень aberrационной коррекции системы «афокальный корректор — объектив» позволил в длинноволновом (7–14 мкм) ИК диапазоне сохранить в пределах углового поля  $2\omega \leq 10,66^\circ$  контраст изображения на частоте Найквиста микроболометра ( $N_N = 30 \text{ mm}^{-1}$ )  $T \geq 0,33$ . При этом указанное значение контраста обеспечивается в расширенном интервале рабочих температур от  $-40$  до  $60^\circ\text{C}$ . Продольный хроматизм системы «афокальный корректор — объектив» составил 51 мкм, а модуль дисторсии — не более 0,3%.

Пассивная оптическая атермализация, как и ранее, осуществлялась для всей совокупности материалов линз и элементов конструкции. Используемые оптические характеристики и термооптические постоянные бром-йодида таллия (KRS5) представлены в каталоге INFRARED программы оптического проектирования ZEMAX, а бескислородного

стекла марки HWS7 — в каталоге фирмы CDGM. Терморасфокусировка в интервале рабочих температур от  $-40$  до  $60^\circ\text{C}$  не превышает 0,02 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение афокального корректора в виде отдельной сборочной единицы позволяет с одной стороны сохранить функциональность исходной оптической системы, а с другой — расширить возможности модернизированного прибора. В случае ИК объективов данный метод воздействия на оптические характеристики может быть использован для устранения терморасфокусировки в совокупности с изменением рабочего спектрального диапазона.

Предложенная методика расчета афокального корректора направлена на получение оптических сил и комбинации материалов линз корректора исходя из известных значений фокальных отрезков, оптической силы и первой хроматической суммы модернизируемого ИК объектива. При этом в заданных спектральном и температурном диапазонах должны выполняться требования апланатичности, устранения продольного хроматизма и обеспечения необходимого изменения заднего фокального отрезка системы «афокальный корректор — объектив».

Эффективность предложенной методики продемонстрирована на примере расчета рефракционно-дифракционного афокального корректора, который в совокупности с ИК объективом с фокусным расстоянием 74,85 мм, диафрагменным числом 1,25 в пределах углового поля  $2\omega \leq 10,66^\circ$  формирует изображение на частоте Найквиста микроболометра ( $N_N = 30 \text{ mm}^{-1}$ ) с контрастом не ниже 0,34 в средневолновом (3,4–5,2 мкм) ИК диапазоне и с контрастом не ниже 0,49 в длинноволновом (7,5–11,4 мкм) ИК диапазоне во всем интервале рабочих температур от  $-40$  до  $60^\circ\text{C}$ .

В случае сохранения рабочего спектрального диапазона модернизируемого ИК объектива, ограниченного длинами волн  $\lambda_{\min} = 7 \text{ мкм}$  и  $\lambda_{\max} = 14 \text{ мкм}$ , компоновка афокального корректора упрощается без потери качества формируемого изображения ( $T \geq 0,33$  при  $N_N = 30 \text{ mm}^{-1}$ ). При этом указанный уровень контраста, как и для рефракционно-дифракционного варианта корректора, обеспечивается

в расширенном интервале рабочих температур от  $-40$  до  $60^{\circ}\text{C}$ .

Результаты настоящей статьи открывают возможность варьирования вариантов исполнения тепловизионного прибора, не изменяя оптическую схему его объектива и не внося существенные корректиры в элементы механической конструкции.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: «Машиностроение», 1989. 383 с.  
Rusinov M.M. Composition of optical systems. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1989. 383 p.
2. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: «Машиностроение», 1969. 672 с.  
Slusarev G.G. Methods of calculating optical systems. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1969. 672 p.
3. Михельсон Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. М.: «Физматлит», 1995. 333 с.  
Mikhelson N.N. Optics of astronomical telescopes and its calculation methods. Moscow: "Fizmatlit" Publ., 1995. 333 p.
4. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С., Ежова В.В. Симметричные компенсаторы сферической аберрации // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 1. С. 28–31.  
Andreev L.N., Degtyareva G.S., Ezhova V.V. Symmetrical compensators of spherical aberration // Journal of Optical Technology. 2015. V. 82. Iss. 1. P. 21–23. <https://doi.org/10.1364/JOT.82.000021>
5. Андреев Л.Н., Ежова В.В., Цыганок Е.А., Кожина А.Д. Компенсаторы кривизны поверхности изображения и астигматизма // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 4. С. 12–16. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-04-12-16>  
Andreev L.N., Ezhova V.V., Tsyganok E.A., Kozhina A.D. Compensators of Petzval field curvature and astigmatism // Journal of Optical Technology. 2021. V. 88. Iss. 4. P. 175–177. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000175>
6. Иванов С.Е., Романова Г.Э. Использование двухкомпонентного афокального компенсатора в зеркально-линзовых системах для коррекции термоаберрации положения // Науч.-техн. вест. инф. технол., механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 373–379. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-3-373-379>  
Ivanov S.E., Romanova G.E. Two-lens afocal compensator for thermal defocus correction of catadioptric system // Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt. 2017. V. 17. Iss. 3. P. 373–379. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-3-373-379>
7. Laborde V., Loicq J., Hastanin J., Habraken S. Multilayer diffractive optical element material selection method based on transmission, total internal reflection, and thickness // Appl. Opt. 2022. V. 61. Iss. 25. P. 7415–7423. <https://doi.org/10.1364/AO.465999>
8. Mao S., Zhao J., He D. Analytical and comprehensive optimization design for multilayer diffractive optical elements in infrared dual band // Opt. Commun. 2020. V. 472. Article 125831. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.125831>
9. CRYSTRAN [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.crystran.co.uk/optical-materials>  
CRYSTRAN [Electronic resource]. Access mode: <https://www.crystran.co.uk/optical-materials>
10. ISP Optics [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ispoptics.com/technical/optical-materials>  
ISP Optics [Electronic resource]. Access mode: <https://ispoptics.com/technical/optical-materials>
11. Tydex [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.tydexoptics.com/ru/materials/for\\_transmission\\_optics](https://www.tydexoptics.com/ru/materials/for_transmission_optics)  
Tydex [Electronic resource]. Access mode: [https://www.tydexoptics.com/ru/materials/for\\_transmission\\_optics](https://www.tydexoptics.com/ru/materials/for_transmission_optics)
12. CDGM HWS Family Infrared Chalcogenide Glass Data Sheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cdgmgd.com/downloadFile.htm?id=12691>  
CDGM HWS Family Infrared Chalcogenide Glass Data Sheet [Electronic resource]. Access mode: <http://cdgmgd.com/downloadFile.htm?id=12691>
13. Hilton A.R. Chalcogenide glasses for infrared optics. N.Y.: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. 279 p. ISBN:978-0-07-159698-5
14. NHG [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hbnhg.com/down/data/9494829706.pdf>  
NHG [Electronic resource]. Access mode: <http://www.hbnhg.com/down/data/9494829706.pdf>
15. SCHOTT [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.schott.com/shop/advanced-optics/en/Samples-IRG-Chalcogenide/c/witness-samples-irg-chalcogenide>  
SCHOTT [Electronic resource]. Access mode: <https://www.schott.com/shop/advanced-optics/en/Samples-IRG-Chalcogenide/c/witness-samples-irg-chalcogenide>
16. VITRON [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.vitron.de/en/ir-glasses/specifications.php>  
VITRON [Electronic resource]. Access mode: <https://www.vitron.de/en/ir-glasses/specifications.php>
17. Amorphous Materials Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.amorphousmaterials.com/products>  
Amorphous Materials Inc. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.amorphousmaterials.com/products>
18. UMICORE [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eom.umicore.com/en/infrared-solutions/infrared-optics/introducing-gasir>  
UMICORE [Electronic resource]. Access mode: <https://eom.umicore.com/en/infrared-solutions/infrared-optics/introducing-gasir>
19. Государственный оптический институт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://goi.ru/production/glass/oxfree>  
State Optical Institute [Electronic resource]. Access mode: <http://goi.ru/production/glass/oxfree>
20. Rahmlow Jr.T.D., Lazo-Wasem J.E., Vizgaitis J.N., Flanagan-Hyde J. Dual-band antireflection coatings on 3rd Gen lenses // Proc. SPIE. 2011. V. 8012. P. 80123D (9 p). <https://doi.org/10.1117/12.888100>
21. Greisukh G.I., Levin I.A., Ezhov E.G. Design of ultra-high-aperture dual-range athermal infrared objectives // Photonics. 2022. V. 9. Iss. 10. P. 742. <https://doi.org/10.3390/photonics9100742>
22. Левин И.А., Степанов С.А. Пассивная атермализация рефракционно-дифракционных пластмассово-линзовых объективов // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 5. С. 694–700. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-5-694-700>

- Levin I.A., Stepanov S.A. Passive athermalization of refractive-diffractive plastic lenses // Computer Optics. 2017. V. 41. Iss. 5. P. 694–700. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-5-694-700>
23. Медведев А.В., Гринкевич А.В., Князева С.Н. Атермализация объективов прицельно-наблюдательных комплексов как средство обеспечения жизнедеятельности объектов БТВТ // Фотоника. 2016. Т. 56. № 2. С. 94–109.
- Medvedev A.V., Grinkovich A.G., Knyazeva S.N. Athermalization of objectives of sighting and observation complexes as the means of functioning support of the facilities of Armament of Armored Force Vehicles (AAFV) // Photonics Russia. 2016. V. 56. Iss. 2. P. 94–109.
24. АСТРОН-64017-2. Микроболометрический матричный детектор. [Электронный ресурс]. URL: <https://astrohn.ru/product/astrohn-64017-2/> (дата обращения 15.04.2023).
- АСТРОН-64017-2. Microbolometre matrix detector [Electronic resource]. Access mode: <https://astrohn.ru/product/astrohn-64017-2/> (Accessed 04/15/2023).
25. ZEMAX [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.zemax.com/pages/opticstudio/> ZEMAX [Electronic resource]. Access mode: <http://www.zemax.com/pages/opticstudio/>
26. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Захаров О.А., Казин С.В. Влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой среднего ИК-диапазона // Опт. и спектр. 2021. Т. 129. № 4. С. 378–384. <https://doi.org/10.21883/OS.2021.04.50763.273-20>
- Greasukh G.I., Ezhov E.G., Zakharov O.A., Kazin S.V. Influence of secondary diffraction orders on the quality of image formed by a Mid-IR refractive-diffractive optical system // Opt. and Spectrosc. 2021. V. 129. Iss. 4. P. 482–488. <https://doi.org/10.1134/S0030400X2104010X>

## Авторы

Григорий Исаевич Грейсух — доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, 400028, Россия; Scopus ID: 6603957506; <https://orcid.org/0000-0003-4339-9245>; grey@pguas.ru

Илья Анатольевич Левин — кандидат физико-математических наук, ведущий инженер-конструктор, Красногорский завод им. С.А. Зверева, Красногорск Московской обл., 143402, Россия; Scopus ID: 36463827600; <https://orcid.org/0000-0001-7451-589X3>; i.a.levin@mail.ru

Сергей Владимирович Казин — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, 400028, Россия; Scopus ID: 36833773000; <https://orcid.org/0000-0002-2664-7879>; ksvl88@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2023  
Одобрена после рецензирования 25.09.2023  
Принята к печати 24.11.2023

## AUTHORS

Grigory I. Greisukh — Dr. Sci. (Engineering), Professor, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, 400028, Russia; Scopus ID: 6603957506; <https://orcid.org/0000-0003-4339-9245>; grey@pguas.ru

Il'ya A. Levin — PhD (Physics and Mathematics), Leading Design Engineer, Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, Moscow region, 143402, Russia; Scopus ID: 36463827600; <https://orcid.org/0000-0001-7451-589X3>; i.a.levin@mail.ru

Sergey V. Kazin — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, 400028, Russia; Scopus ID: 36833773000; <https://orcid.org/0000-0002-2664-7879>; ksvl88@yandex.ru

The article was submitted to the editorial office 16.06.2023  
Approved after review 25.09.2023  
Accepted for publication 24.11.2023