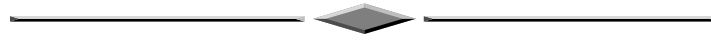


ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 681.7.067.2

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-259-275

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ОБЪЕКТИВОВ С ВЫНЕСЕННЫМ ВЫХОДНЫМ ЗРАЧКОМ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

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

Алексей Сергеевич Гречневский

ООО «Конструкторское бюро "Луггар"», 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Шевченко, 11, инженер-конструктор; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (983)308-02-24, e-mail: grechnevskiy_alexey94@mail.ru

Предложена классификация структурных схем объективов тепловизионных приборов с охлаждаемыми приемниками излучения по признаку «положение входного зрачка». Представлена математическая модель в области параксиальной оптики двухкомпонентной схемы объектива, сопрягаемого с охлаждаемой диафрагмой, для случая размещения входного зрачка на первом компоненте схемы. Определена область решений, учитывающая габаритные ограничения и ограничения по относительным отверстиям компонентов. На конкретных примерах показано, что количество линз в объективе может быть минимизировано до двух за счет применения биасферических линз. Приведены характеристики двухлинзовых объективов с относительными отверстиями 1 : 2 и 1 : 4 и фокусными расстояниями 300 и 100 мм. Расстояние между компонентами объектива является действенным коррекционным параметром и не может быть минимизировано без усложнения конструктивного исполнения второго компонента объектива. Уменьшение осевой длины объектива приводит к увеличению относительных отверстий компонентов и соответственно к увеличению линз во втором компоненте до двух или более. Отмечается соответствие параметров объективов и области решений, полученной по предлагаемой математической модели. Последняя может служить научно-техническим обоснованием оптимальности разрабатываемых объективов для новых тепловизионных приборов. Использование найденных соотношений представляет интерес для практической разработки новых оптических систем объективов.

Ключевые слова: тепловизионные приборы, параксиальная модель объектива, вынесенный выходной зрачок, охлаждаемая диафрагма, структурный анализ оптических систем, проектирование оптических систем, биасферические линзы.

Введение

Передовая оптическая техника базируется на достижениях фундаментальных исследований многих научных направлений и объединяет сложные в техническом и технологическом планах группы приборов, включая тепловизионные [1]. Использование электромагнитного излучения оптического диапазона позволяет обеспечить высокую информативность изображений, высокую точность определения координат, компактность многих оптико-электронных приборов и систем, спектральную и пространственную селекцию объектов. В последние десятилетия отмечаются высокие темпы развития тепловизионных приборов и появление большого количества новых моделей [2]. Технические характеристики тепловизионных приборов, в которых в качестве приемника излучений применяются неохлаждаемые болометрические матрицы, достигли значений, близких к предельным возможностям современной элементной базы [3]. Прогнозные исследования [4, 5] свидетельствуют, что в ближайшие годы будет усиливаться тенденция появления новых тепловизионных приборов, в которых используются охлаждаемые матричные приемники излучений. Поэтому актуальным является уже на этапе концептуального проектирования закладывать в новые разработки достижения современных оптических технологий и компьютерного дизайна оптики.

Предметом данной статьи являются тепловизионные объективы, удовлетворяющие специфическим требованиям, обусловленным необходимостью сопряжения с охлаждаемыми матричными приемниками излучения.

В научно-технической и патентной литературе, например [6–20], имеется информация о большом количестве разработанных и созданных инфракрасных объективов для тепловизионных приборов, использующих матричные приемники излучений. В них рассматриваются вопросы коррекции аберраций [6], обсуждается алгоритм проектирования многокомпонентных оптических систем [19], технология компьютерного расчета атермальных оптических систем [16]. Однако, как показывает анализ упомянутых источников с позиций исследования оптических схем, в большинстве из них описание последних носит констатирующий характер, либо, как это принято в патентных источниках, приводится сравнение разработанной (предлагаемой) оптической схемы объектива с одним или несколькими наиболее близкими аналогами, выбранными авторами для сравнения. Вопрос о том, насколько параметры конкретной разработки объектива являются «оптимальными», можно обсуждать, имея возможность сравнения их с областью решений некоей идеальной (безабберационной) модели. Такой моделью может служить параксиальная модель инфракрасного объектива, сопрягаемого с охлаждаемым матричным приемником излучений. Разработке и исследованию такой модели и посвящена настоящая статья.

В исследовании использованы как общие методы научного исследования: классификация, сравнение, анализ, так и специальные методы оптотехники: аналитические методы геометрической оптики, теории оптических приборов, методы компьютерного дизайна оптических систем.

**Структурная схема и классификация объективов,
сопрягаемых с охлаждаемыми матричными приемниками излучений
в тепловизионных приборах**

Исследования по структуре объективов, сопрягаемых с охлаждаемым матричным приемником излучений, лежат в сфере профессиональных интересов авторов [19–21]. Этап структурного анализа и синтеза служит задаче оптимального схемотехнического проектирования нового изделия.

На основании выборки из нескольких десятков объективов тепловизионных приборов для MWIR или LWIR диапазонов электромагнитного излучения в [21] предложена классификация, отражающая особенность согласования объективов и охлаждаемых приемников излучений. Эта особенность обусловлена принципом сопряжения оптических элементов в сложной оптической или оптико-электронной системе, требующим согласования входного и выходного зрачков последовательно расположенных элементов. Роль апертурной диафрагмы выполняет отверстие внутри корпуса приемника, диаметр и положение которого относительно чувствительной площадки приемника определяет относительное отверстие приемника. Внутреннее пространство корпуса вместе с приемником, защитным стеклом и диафрагмой в процессе эксплуатации охлаждается до рабочих температур приемника. С целью соблюдения указанного принципа сопряжения либо сама охлаждаемая диафрагма выполняет функцию выходного зрачка объектива, либо оптическая схема объектива должна обеспечивать формирование выходного зрачка объектива в зоне размещения охлаждаемой диафрагмы приемника. В любом случае специфический признак объективов в выборке – это наличие вынесенного выходного зрачка. Несимметричность оптической системы объектива относительно апертурной диафрагмы прибора является фактором, усложняющим коррекцию полевых аберраций в изображении.

В результате структурного анализа объективов с фиксированными фокусными расстояниями [21], по классификационному основанию (признаку), основанному на положении входного зрачка объектива, выделены четыре типа оптических схем объективов (таблица). В таблице используются следующие обозначения: P – центр входного зрачка; a_P – расстояние вдоль оптической оси от первого компонента объектива до входного зрачка; А.д. – охлаждаемая диафрагма приемника; p' – расстояние от охлаждаемой диафрагмы до задней фокальной плоскости объектива (плоскости чувствительной площадки приемника; f' – фокусное расстояние объектива; L – длина объектива; D, D_1, D_2 – диаметры входного зрачка, компонентов 1, 2 соответственно.

Выделенные типы характеризуются следующими соотношениями:

- тип «а»: $a_P > L; D_1 > D$;
- тип «б»: $0 < a_P < L; D_2 > D_1 > D$;
- тип «в»: $a_P = 0; D_1 = D$;
- тип «г»: $a_P < 0, D_1 > D$.

Тип	Классификационный признак	Структурная схема объектива
а	$a_p > L$	
б	$0 < a_p < L$	
в	$a_p = 0$	
г	$a_p < 0$	

Структурная схема типа «а» находит применение в изделиях, в которых требуется небольшая относительная длина объектива [6].

По структурной схеме типа «б» проектируются короткофокусные широкоугольные объективы [8].

В изделиях, в которых диаметр объектива ограничивается диаметром входного зрачка, структура объектива соответствует типу «в» [7, 9, 11]. По этому же типу может моделироваться оптическая система в режиме узкого поля в изделиях с дискретной сменой увеличений [12–14].

Структурная схема типа «г» применяется в многокомпонентных системах со сканирующими элементами [10].

Результатам создания и исследования параксиальной модели объектива типа «в» посвящены последующие разделы статьи.

Основные соотношения в двухкомпонентной модели объектива типа «в», сопрягаемого с охлаждаемым матричным приемником излучений

Используя законы геометрической оптики, в структурной схеме типа «в» определены аналитические соотношения между ее параметрами. Рис. 1 поясняет обозначения основных параметров, используемые в аналитических соотношениях, а именно: L_2 – расстояние вдоль оптической оси от плоскости промежуточного изображения до чувствительной площадки приемника; L_p – расстояние между плоскостями входного и выходного зрачков объектива; $a'_{F'}$ – задний фокальный отрезок объектива – расстояние от компонента 2 до чувствительной площадки приемника; f'_1 – фокусное расстояние компонента 1; $2y'_1$ – размер (по диагонали) промежуточного изображения; $2y'_2$ – диагональ чувствительной площадки приемника; D' – диаметр выходного зрачка объектива.

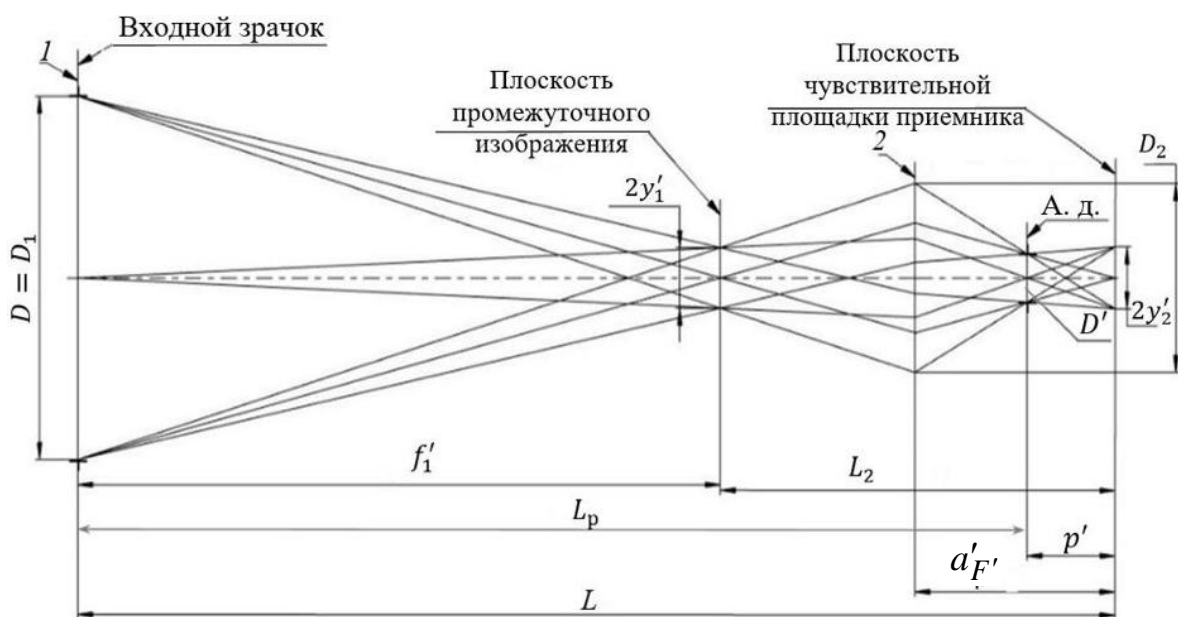


Рис. 1. Двухкомпонентная схема объектива типа «в»

Применяя положения и закономерности геометрической оптики к оптической системе объектива, состоящей из тонких компонентов, расположенных относительно друг друга и относительно приемника в соответствии со схемой, представленной на рис. 1, можно записать ряд соотношений между отдельными параметрами, а именно:

$$f' = \beta_2 f'_2; \quad (1)$$

$$\beta_2 = -y'_2 / y'_1; \quad \beta_P = -D' / D; \quad (2)$$

$$L_2 = -f'_2(\beta_2 - 1)^2 / \beta_2; \quad (3)$$

$$L_P = -f'_2(\beta_P - 1)^2 / \beta_P; \quad (4)$$

$$a'_{F'} = L_2 \beta_2 / (\beta_2 - 1), \quad (5)$$

где f'_2 – фокусное расстояние компонента 2;

β_2 – линейное увеличение компонента 2;

β_P – линейное увеличение в зрачках.

Условие $L_P = L_2 + f'_1 - p'$, специфическое для анализируемой схемы, представленной на рис. 1, определяет, с учетом соотношений (3) и (4), фокусное расстояние f'_2 через линейные увеличения β_2 , β_P , фокусное расстояние компонента 1 и параметр p' приемника:

$$f'_2 = \beta_2 \beta_P (f'_1 - p') / (\beta_P (\beta_2 - 1)^2 - \beta_2 (\beta_P - 1)^2). \quad (6)$$

При этом увеличения β_2 и β_P в анализируемой схеме связаны между собой следующей зависимостью: $\beta_2 \beta_P = p' / f'_1$.

Условие $L = f'_1 + L_2$, раскрытое с учетом (1) и (3), устанавливает связь между длиной объектива, линейным увеличением β_2 , фокусными расстояниями объектива и компонента 2:

$$L = (f' - f'_2(\beta_2 - 1)^2) / \beta_2. \quad (7)$$

Для относительных отверстий объектива $1:K$ и его компонентов $1:K_1$ и $1:K_2$ соответствующие диафрагменные числа определяются параметрами схемы следующим образом:

$$K = p' / D'; \quad K_1 = f'_1 / D'; \quad K_2 = f'_2 / D_2. \quad (8)$$

При этом диаметр компонента 2, определяемый ходом крайних лучей наклонного пучка, может быть рассчитан по формуле:

$$D_2 = 2(a'_{F'}(0,5D' + |y'_2|) - |y'_2|). \quad (9)$$

Формулы (1)–(9) определяют параметры компонентов и всего объектива в зависимости от требуемого фокусного расстояния объектива, его относительного отверстия, геометрических параметров приемника. При этом для одинаковых исходных условий (фокусное расстояние объектива и геометрические параметры приемника) полученные соотношения демонстрируют зависимость параметров объектива и его компонентов от линейного увеличения β_2 компонента 2, что положено в основу анализа математической модели объектива, проведенного в исследовании.

Исследование математической модели проведено для следующих значений параметров: фокусные расстояния объектива от 50 до 300 мм; два значения относительного отверстия: 1 : 2 и 1 : 4; линейное увеличение компонента 2 от минус $0,25^\times$ до минус 3^\times ; формат приемника 640×512 , размер пикселей 15×15 мкм; p' составляет 20 мм. Принятые для исследования параметры приемника соответствуют лучшим мировым образцам, например [22].

Результаты исследования представлены графически на рис. 2 в виде относительной длины объектива, отношения $a'_{F'} / p'$ и диафрагменных чисел компонентов в зависимости от β_2 для двух значений относительных отверстий объектива.

Исследование математической модели в параксиальной области выявило следующие закономерности в рассматриваемой схеме объектива:

- относительная длина объектива не зависит от относительного отверстия приемника, уменьшается с увеличением $|\beta_2|$ и возрастает по мере уменьшения фокусного расстояния объектива;

- относительные отверстия 1: K_1 компонента 1 не зависят от фокусного расстояния объектива, определяются значением $|\beta_2|$, возрастают с увеличением $|\beta_2|$;

- относительные отверстия 1: K_2 компонента 2 возрастают при повышении относительного отверстия объектива 1: K ;

- отношение $a'_{F'} / p'$ не зависит от относительного отверстия объектива, уменьшается при возрастании $|\beta_2|$ и увеличивается при уменьшении f' .

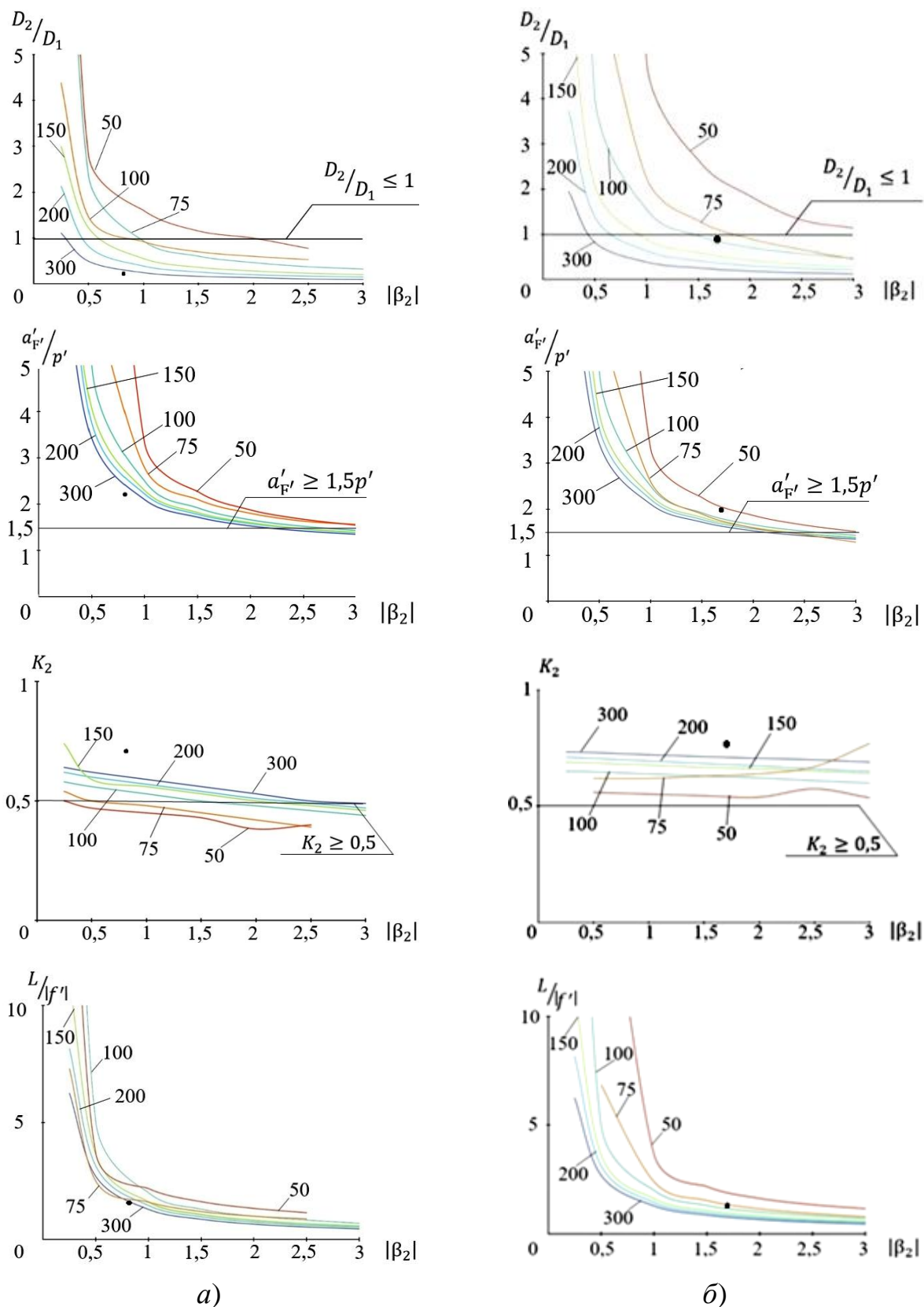


Рис. 2. Зависимости между параметрами в двухкомпонентной схеме объектива, сопрягаемого с охлаждаемым матричным приемником, для относительных отверстий: а) 1 : 2; б) 1 : 4

Ограничения и области решений в исследуемой оптической схеме

С целью определения оптимальной области решений для технической реализации объективов по типу «в» предлагаются следующие ограничения:

– по габаритным соображениям:

$$D_2 / D_1 \leq 1; \quad (10)$$

– по ограничениям, связанным с сопряжением объектива с охлаждаемым приемником излучений:

$$a_{F'} \geq 1,5 p'; \quad (11)$$

– по абберационным соображениям:

$$K_2 \geq 0,5. \quad (12)$$

Ограничение (10) позволяет найти такие решения, при которых диаметры компонентов не будут превышать диаметра входного зрачка, что связано с возможностями реализации объективов с ограничением по массе и габаритным размерам.

Ограничение (11) позволяет выявить такие решения, которые обеспечивают расстояние между компонентом 2 и плоскостью охлаждаемой диафрагмы не менее 10 мм, что определяет возможность конструктивного сопряжения объектива с приемником.

Ограничение (12) направлено на выявление решений, в которых относительное отверстие компонента 2 не превышает теоретически предельное значение для апланатических систем.

Рис. 3 демонстрирует уменьшение области решений по $|\beta_2|$ при уменьшении абсолютного значения фокусного расстояния объектива и отсутствие решений для короткофокусной части исследуемого диапазона фокусных расстояний. На этом же рисунке также показан и диапазон возможных осевых габаритных размеров для соответствующих фокусных расстояний.

Таким образом, для исследованной аналитической модели двухкомпонентной схемы инфракрасного объектива, сопрягаемого с охлаждаемым приемником, имеющего входной зрачок, совмещенный с первым компонентом, при введенных ограничениях (10)–(12) и выбранных диапазонов параметров установлено следующее:

- 1) область решений $|\beta_2|$ соответствует значениям от 0,3 до 2,4;
- 2) наибольший диапазон решений по $|\beta_2|$ выявлен для длиннофокусных объективов. По мере уменьшения $|f'|$ диапазон решений по $|\beta_2|$ уменьшается

до нуля: при относительном отверстии 1 : 2 отсутствуют решения для абсолютных значений фокусных расстояний менее 80 мм, для относительного отверстия 1 : 4 – менее 75 мм;

3) относительная длина объектива возрастает с уменьшением абсолютного значения фокусного расстояния объектива.

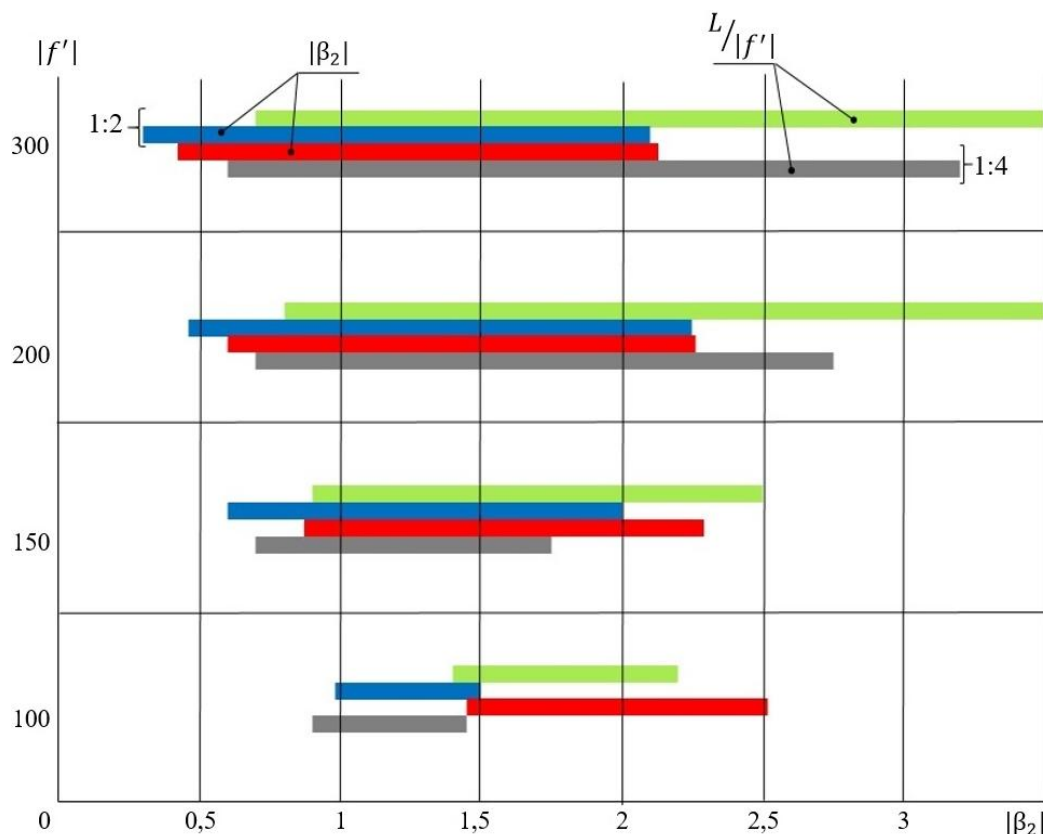


Рис. 3. Диапазоны решений $|\beta_2|$ и $L/|f'|$ для исследуемых фокусных расстояний двухкомпонентной схемы объектива, построенной в соответствии с рис. 1

Расчет оптических систем с абсолютными значениями фокусных расстояний менее 80 мм требует либо снятия ограничений (10)–(12) (например, исключение ограничения (10)), либо введения коллективной линзы в плоскость промежуточного изображения, либо использования другой структурной схемы.

Применение биасферического дизайна для минимизации линз в объективе

Как следует из таблицы, для случая ограничения диаметра объектива до диаметра входного зрачка в объективах, сопрягаемых с охлаждаемыми матричными приемниками излучений, требуется не менее двух компонентов. Анало-

гичный вывод по количеству компонентов сделан и для объективов тепловизионных приборов, в которых применяются неохлаждаемые микроболометрические матричные приемники [24]. Количество линз в компоненте определяется прежде всего его относительным отверстием и может достигать от одной до пяти и более линз, например [10, 11]. В случае, если компонентом схемы будет являться одиночная линза, то количество линз в объективе будет минимальным – две. Стремление к уменьшению количества линз в объективе обусловлено задачей повышения коэффициента пропускания оптических систем и соответственно повышения физической светосилы объективов в проектируемых тепловизионных приборах.

Задача о форме преломляющих поверхностей линзы в общем виде решена для случая устранения сферической аберрации [25] и астигматизма [26]. При инженерных разработках оптических систем объективов для тепловизионных приборов требуется одновременная балансировка не только двух указанных, но и остальных пяти первичных аберраций. При этом значения остаточных аберраций должны быть соразмерны размеру пикселя приемника и балансироваться в соответствии с принятым критерием по частотно-контрастной характеристике объектива или функции концентрации энергии в пятне, равном размеру пикселя приемника.

Современные оптические технологии формообразования позволяют изготавливать линзы биасферического дизайна, т. е. с двумя асферическими преломляющими поверхностями. Примером успешной технологической реализации могут служить двухлинзовые объективы для неохлаждаемых тепловизионных приборов с использованием болометрических матричных приемников [17, 18].

Однако условия работы компонентов в объективах, сопрягаемых с охлаждаемым приемником изображений, отличаются от объективов для болометрических матричных приемников. Оптическая система является несимметричной относительно апертурной диафрагмы, и при совмещении входного зрачка с первым компонентом (схема «в») ни один из компонентов не работает с телецентрическим ходом главных лучей. Кроме того, при разработке объективов для охлаждаемых приемников возникает требование, связанное с уменьшением эффекта Нарцисса, накладывающее дополнительные ограничения на дизайн линз. Поэтому вопрос о том, какое наименьшее количество линз может содержать объектив, сопрягаемый с охлаждаемым матричным приемником, не является очевидным, и в рамках настоящего исследования решался методами инженерного компьютерного проектирования оптических систем для конкретных значений фокусного расстояния, относительного отверстия и параметров приемника.

В [23] приведены результаты компьютерного моделирования оптической системы с двумя биасферическими линзами, в котором абсолютное значение фокусного расстояния составляет 300 мм, относительное отверстие 1 : 2, относительная длина 1,57. Параметры компонентов двухлинзового объектива [23] показаны точками на графиках рис. 2, а. Положение точек коррелирует с областью решений аналитической модели. Снижение относительного отверстия компонента 2 относительно теоретической модели обусловлено смещением

главных плоскостей относительно преломляющих поверхностей в положительном мениске.

В [23] методами компьютерного моделирования показано, что расстояние между компонентами объектива является действенным коррекционным параметром и не может быть минимизировано без усложнения конструктивного исполнения второго компонента объектива. Уменьшение осевой длины объектива приводит к увеличению относительных отверстий компонентов объектива и соответственно к увеличению линз во втором компоненте до двух или трех. При выполнении второго компонента из трех линз осевая длина становится равной фокусному расстоянию объектива.

В рамках настоящего исследования выполнено компьютерное моделирование для объектива с относительным отверстием $1 : 4$ и фокусным расстоянием, абсолютное значение которого равно 100 мм. Рабочий спектральный диапазон длин волн принят в соответствии с [22] от 7,7 до 9,3 мкм. Результаты разработки иллюстрируются рис. 4. Оптическая система содержит две биасферических линзы, при этом характер асферических поверхностей монотонный, без точек перегиба. На рис. 4, б схематически показано положение четырех точек 1–4 на чувствительной площадке приемника, для которых приведены диаграммы пятен рассеяния, при этом сторона квадрата на диаграммах составляет 100 мкм, радиус кружка Эйри 42 мкм. Размеры пятен рассеяния меньше диаметра кружка Эйри, что и обеспечивает частотно-контрастную характеристику (ЧКХ), близкую к безаберрационной.

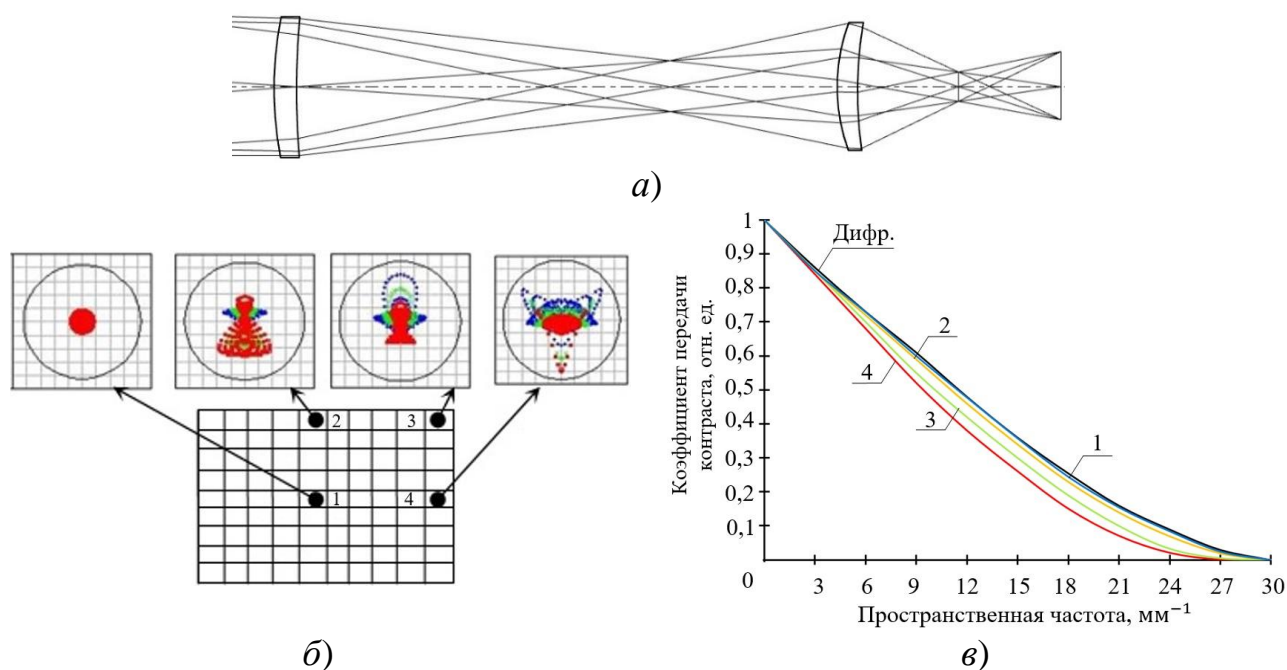


Рис. 4. Объектив с биасферическими линзами:

а) оптическая схема, 100 мм, $1 : 4$; б) диаграммы пятен рассеяния; в) графики ЧКХ, соответствующие точкам 1–4

Как в двухлинзовом объективе [23], так и в объективе, представленном на рис. 4, эффект Нарцисса минимизирован по критерию YNI [27].

Параметры компонентов оптической схемы, показанной на рис. 4, *а*, наложены на графики рис. 2, *б* точками. Отмечается соответствие параметров разработанного объектива и области решений, полученной в данном исследовании на основании аналитической модели двухкомпонентного объектива.

Заключение

Специфической особенностью объективов, сопрягаемых с охлаждаемыми приемниками излучений в тепловизионных приборах, является наличие вынесенного выходного зрачка. Четыре возможных варианта размещения входного зрачка определяют четыре типа структурных схем объективов.

Представлена математическая модель в области параксиальной оптики двухкомпонентной схемы объектива, сопрягаемого с охлаждаемой диафрагмой, для случая размещения входного зрачка на первом компоненте схемы. Выявлены зависимости параметров объектива и его компонентов от линейного увеличения второго компонента схемы. Определена область решений, учитывающая габаритные ограничения и ограничения по относительным отверстиям компонентов.

Использование найденных соотношений представляет интерес для практической разработки новых оптических систем объективов. В частности, методами компьютерного моделирования, на конкретном примере показана возможность создания оптической схемы объектива из двух биасферических линз.

Авторы выражают благодарность ООО «Оптическое Расчетное Бюро» (г. Новосибирск) за предоставленную возможность проведения расчетов в пакете Zemax Optic Studio.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оружие и технологии России. Энциклопедия XXI век. Том 11. Оптико-электронные системы и лазерная техника. – М. : Издательский дом «Оружие и технологии», 2005. – 720 с.
2. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М. : Логос, 2004. – 444 с.
3. Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н. Реализация общетехнических и специальных требований при разработке малогабаритных тепловизионных приборов наблюдения и прицелов // Приборы. – 2018. – № 1. – С. 43–50.
4. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Современное состояние и перспективы развития зарубежных тепловизионных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 3. – С. 1–13.
5. Тарасов В. В., Торшина И. П., Якушенков Ю. Г. Современные проблемы оплотехники : учеб. пособие. – М. : МИИГАиК, 2014. – 82 с.
6. Гаршин А. С. Особенности расчета трехлинзовых инфракрасных объективов, работающих с охлаждаемыми приемниками // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, № 4. – С. 38–43.

7. Ульянова Е. О. Оптические системы для тепловизионных приборов на основе матричных фотоприемных устройств спектрального диапазона 8–12 мкм // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 6. – С. 14–19.
8. Пат. 2434256 Российская Федерация, МПК G02B 13/14 (2006.01), G02B 9/60 (2006.01). Светосильный широкоугольный линзовый объектив для инфракрасной области спектра / Лебедев О. А., Сабинин В. Е., Солк С. В. ; патентообладатели Федеральное государственное унитарное предприятие Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем (ФГУП НИИКИ ОЭП) ; заявл. 12.08.2010 ; опубл. 20.11.2011. – Бюлл. № 32.
9. Пат. 2419113 Российская Федерация, МПК G02B 13/14 (2006.01), G02B 9/64 (2006.01). Оптическая система с вынесенной апертурной диафрагмой для среднего ИК диапазона спектра / Хацевич Т. Н., Терешин Е. А. ; патентообладатели Хацевич Т. Н., Терешин Е.А. ; заявл. 06.08.2009 ; опубл. 20.05.2011. – Бюлл. № 14.
10. Пат. 2379723 Российская Федерация, МПК G02B 13/14 (2006.01), G02B 9/60 (2006.01). Светосильный объектив с вынесенными зрачками для ИК области спектра / Терешин Е. А., Хацевич Т. Н., Ковтуненко Е. В. ; патентообладатель Институт физики полупроводников СО РАН ; заявл. 25.08.2008 ; опубл. 20.01.2010. – Бюлл. № 2.
11. Пат. 2522463 Российская Федерация, МПК G02B 13/14 (2006.01), G02B 13/16 (2006.01). Оптическая система тепловизионного объектива / Балоев В. А., Иванов В. П., Рагинов С. В., Скочилова И. А. ; патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение» Государственный институт прикладной оптики (ОАО «НПО ГИПО») ; заявл. 03.04.2014 ; опубл. 10.08.2013. – Бюлл. № 22.
12. Anthony John Kirkham. US. 7136235, Int. Cl. G02B 9/00. Optical apparatus; assignee Thales Optics Ltd., date of patent 14.11.2006.
13. Anthony John Kirkham. US. 6424460, Int. Cl. G02B 15/14. Dual field-of-view objects system for the infrared; assignee Pilkington PE Limited, date of patent 23.07.2002.
14. Max Amon. US. 6423969, Int. Cl. G08B 13/14. Dual infrared band objective lens; assignee Lockheed Martin Corporation, date of patent 23.07.2002.
15. Пат. 2355003 Российская Федерация, МПК G02B17/08. Оптическая система для формирования изображения объекта в двух полях зрения / Киселев М. В., Малеев Н. М., Михайлов В. Н. ; патентообладатель Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова» (ФГУП «ПО «УОМЗ») ; заявл. 28.08.2007 ; опубл. 10.05.2009. – Бюлл. № 13.
16. Пат. 2629890 Российская Федерация, МПК G02B 13/14, 9/34. Инфракрасный объектив с пассивной атермализацией / Белоусов А. П. ; патентообладатель Акционерное общество «Швабе – Оборона и Защита» ; заявл. 10.06.2016 ; опубл. 04.09.2017. – Бюлл. № 25.
17. Патент на полезную модель № 187815. Двухлинзовый светосильный объектив для ИК-области спектра / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В., Мордвин Н. Н., Волкова К. Д. ; патентообладатель ООО «Конструкторское бюро «Луггар» ; опубл. 19.03.2019. – Бюлл. № 8.
18. Патент на полезную модель № 187832. Двухлинзовый светосильный объектив для инфракрасной области спектра / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В., Мордвин Н. Н., Волкова К. Д. ; патентообладатель ООО «Конструкторское бюро «Луггар» ; опубл. 19.03.2019. – Бюлл. № 8.
19. Терешин Е. А., Хацевич Т. Н. Алгоритм эффективного проектирования многокомпонентных систем для инфракрасного спектрального диапазона // VIII Международная конференция «Прикладная оптика-2008» (20–24 октября 2008 г.). – СПб., 2008. – С. 69–73.
20. Хацевич Т. Н. Оптика для тепловизионных приборов // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (г. Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 36–39.
21. Греченевский А. С., Хацевич Т. Н. Структура объектива тепловизионного прибора с охлаждаемым приемником // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр. : Маги-

стерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов в 9 т. (г. Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. Т. 6, № 2. – С. 20–27.

22. SCORPIO MW 640 x 512 – 15 μm pitch – МСТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lynpred.com>, свободный. – Загл. с экрана.

23. Греченевский А. С., Хацевич Т. Н. Разработка объектива тепловизионной камеры // Калашниковские чтения [Электронный ресурс] : VI Всероссийская научно-практическая конференция, 7 ноября 2019 г. (В рамках II Молодежного форума студентов и курсантов оборонных специальностей вузов России «С именем Калашникова», 6–8 ноября 2019 г.) / [оргкомитет: Ю. Б. Брызгалов, С. А. Писарев, Н. П. Устинова]. – Ижевск : Изд-во ИЖГТУ им. М. Т. Калашникова, 2019. – 16,7 Мбайт (PDF). – С. 295–304.

24. Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. Исследование объективов для малогабаритных тепловизионных приборов с позиции модели двухкомпонентного объектива // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 245–261.

25. Gonzales-Acuna R. G., Chaparro-Romo H. A. General formula for bi-aspheric singlet lens design free of spherical aberration // Applied Optics. – 2018. – Vol. 57, No. 31. – P. 9341–9345.

26. Gonzales-Acuna R. G., Chaparro-Romo H. A., Gutierrez-Vega J. C. General formula for design a freeform singlet free of spherical aberration and astigmatism // Applied Optics. – 2019. Vol. 58, No. 4. – P. 1010–1015.

27. ZEMAX Optical Design Program. User's Guide. – Tucson, Arizona, USA: Zemax Development Corporation, 2009. – 732 p.

Получено 16.03.2020

© Т. Н. Хацевич, А. С. Греченевский, 2020

THE ANALYSIS OF OBJECTIVE LENS DESIGNS WITH EXTENDED EXIT PUPIL FOR THE THERMAL VISION DEVICES

Tatiana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph.D., Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Alexey S. Grechenevskiy

"Luggar", 11, Shevchenko St., Novosibirsk, 630102, Russia, Engineer; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (983)308-02-24, e-mail: grechenevskiy_alexey94@mail.ru

A classification of structural scheme of lenses of thermal imaging devices with cooled radiation detectors based on the 'position of the entrance pupil' is proposed. A mathematical model for the field of paraxial optics for two component lens objective combined with a cooled diaphragm for the case of placing the entrance pupil on the first component of the lens objective is presented. A solution area that takes into account overall device dimensions constraints and restrictions on the relative apertures of the components was determined. Using specific examples, it is shown that the number of lenses in the objective can be minimized to two due to the use of bi-aspheric lenses. The variants of two-lens schemes for focal lengths of 300 and 100 mm and relative apertures 1 : 2 and 1 : 4 accordingly are provided. The distance between the lens components is an effective correction parameter and cannot be minimized without complicating the design of the second lens component. Reducing the axial length of the lens leads to an increase in the relative apertures of the components

and, accordingly, to an increase in the number of lenses in the second component to two or more. The relation of the parameters of the lenses and the solution area obtained by the mathematical model of a two-component lens is noted. The proposed mathematical model provides a scientific and technical argumentation of the optimality of the developed optical systems of lenses for thermal imaging devices using cooled matrix radiation detectors. The use of the suggested relations can be used for practical development of new optical systems of lenses.

Key words: infrared devices, paraxial lens model, extended exit pupil, cooled diaphragm, structural analysis of optical systems, design of optical systems, bi-aspheric lenses.

REFERENCE

1. Oruzhie i tekhnologii Rossii. Enciklopediya XXI vek: T. 11, Optiko-elektronnye sistemy i lazernaya tekhnika [Russia's Arms and Technologies. XXI Century Encyclopedia: Vol. 11, Optoelectronic and Laser Systems]. Moscow: "Oruzhie i tekhnologii " Publ., 720 p. [in Russian].
2. Tarasov, V. V., & Yakushenkov, Y. G. (2004). *Infrakrasnye sistemy «smotryashchego» tipa [Infrared systems of "looking" type]*. Moscow: Logos Publ., 444 p. [in Russian].
3. Druzhkin, E. V., & Khatsevich, T. N. (2018). Implementation of general technical and special requirements in the development of small-sized thermal imaging observation devices and sights. *Pribory [Devices]*, 1(211), 43–50 [in Russian].
4. Tarasov, V. V., & Yakushenkov, Y. G. (2013). Trends in the development of foreign thermal imaging devices. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Herald of Information Technologies, Mechanics and Optics]*, 3(85), 1–13 [in Russian].
5. Tarasov, V. V., Torshina, I. P., & Yakushenkov, Y. G. (2014). *Sovremennyye problemy optotekhniki [Modern optical engineering problems]*. Moscow: MIIGAİK Publ., 82 p. [in Russian].
6. Garshin, A. S. (2016). Features of calculation of three-lens infrared lenses working with cooled receivers. *Opticheskiy zhurnal [Optical Journal]*, 83(4), 38–43 [in Russian].
7. Ulyanova, E. O. (2013). Optical systems for thermal imaging devices based on matrix photodetectors in the spectral range of 8-12 microns. *Opticheskiy zhurnal [Optical Journal]*, 80(6), 14–19 [in Russian].
8. Lebedev, O. A., Sabinin, V. E., & Solk, S. V. (2011). Patent 2434256 Russian Federation. Large-aperture wide-angle lens for the infrared [in Russian].
9. Khatsevich, T. N., & Tereshin, E. A. (2011). Patent 2419113 Russian Federation. Optical system with external aperture diaphragm for the mid-IR range of the spectrum [in Russian].
10. Tereshin, E. A., Khatsevich, T. N., & Kovtunenkov, E. V. (2010). Patent 2379723 Russian Federation. High-aperture pupil lens for IR IR range of the spectrum [in Russian].
11. Baloev, V. A., Ivanov, V. P., Raginov, S. V., & Skochilova, I. A. (2013). Patent 2522463 Russian Federation. Thermal Imaging Optical System [in Russian].
12. Anthony John Kirkham. (2006). US. 7136235, Int. Cl. G02B 9/00. Optical apparatus; assignee Thales Optics Ltd., date of patent 14.11.2006.
13. Anthony John Kirkham. (2002). US. 6424460, Int. Cl. G02B 15/14. Dual field-of-view objects system for the infrared; assignee Pilkington PE Limited, date of patent 23.07.2002.
14. Max Amon. (2002). US. 6423969, Int. Cl. G08B 13/14. Dual infrared band objective lens; assignee Lockheed Martin Corporation, date of patent 23.07.2002.
15. Kiselev, M. V., Maleev, N. M., & Mikhailov, V. N. (2009). Patent 2355003 Russian Federation. Optical system for imaging an object in two fields of view [in Russian].
16. Belousov, A. I. (2017). Patent 2629890 Russian Federation. Objective for the IR-region of the spectrum with passive athermalization [in Russian].
17. Khatsevich T. N., Druzhkin E. V., Mordvin N. N., & Volkova K. D. (2019). Patent for useful model 187815 Russian Federation. Two-lens-aperture objective for the infrared [in Russian].

18. Khatsevich, T. N., Druzhkin, E. V., Mordvin, N. N., & Volkova, K. D. (2019). Patent for useful model 187832 Russian Federation. Two-lens-aperture objective for the infrared [in Russian].
19. Tereshin, E. A., Khatsevich, T. N. (2008). The algorithm is efficient design multicomponent systems for the infrared spectral range. In *Sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoy konferentsii: Prikladnaya optika-2008 [Proceedings of International Conference: Applied Optics 2008]* (69–73). St. Petersburg [in Russian].
20. Khatsevich, T. N. (2011). Optics for thermal imaging devices. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2011: T. 5, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2011: Vol. 5, Part 1]* (pp. 36–39). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
21. Grechenevskiy, A. S., & Khatsevich, T. N. (2019). Lens Structure thermal imaging device with a cooled receiver. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2019: T. 6, No. 2. Magisterskaya nauchnaya sessiya "Pervye shagi v nauke" [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2019: Vol. 6, No. 2. Master's Scientific Session "First Steps in Science"]* (pp. 20–27). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
22. SCORPIO MW 640 x 512–15 μm pitch. (2020). Retrieved from <https://www.lynred.com> (accessed 10 February 2020).
23. Grechenevskiy, A. S., & Khatsevich, T. N. (2019). Development of a thermal imaging camera lens. In *Sbornik materialov VI Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya v ramkakh II Molodezhnogo foruma studentov i kursantov oboronnykh spetsial'nostey vuzov Rossii «S imenem Kalashnikova» [Proceedings of VI All-Russian Scientific and Practical Conference in the Framework of the II Youth Forum of Students and Cadets of Defense Specialties of Russian Universities "With the Name of Kalashnikov"]* (pp. 295–304). Izhevsk: IzhSTU Publ. [in Russian].
24. Khatsevich, T. N., Druzhkin, E. V. (2018). Exploring lenses for small thermal imaging devices from the position of a two-component lens. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 245–261 [in Russian].
25. Gonzales-Acuna, R. G., & Chaparro-Romo, H. A. (2018). General formula for bi-aspheric singlet lens design free of spherical aberration. *Applied Optics*, 57(31), 9341–9345.
26. Gonzales-Acuna, R. G., Chaparro-Romo, H. A., & Gutierrez-Vega, J. C. (2019). General formula for design a freeform singlet free of spherical aberration and astigmatism. *Applied Optics*, 58(4), 1010–1015.
27. *ZEMAX Optical Design Program*. (2009). User's Guide. Tucson, Arizona, USA: Zemax Development Corporation, 732 p.

Received 16.03.2020

© T. N. Khatsevich, A. S. Grechenevskiy, 2020