

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-09-40-52

УДК 535.015, 536.33

## Внеосевой охлаждаемый коллиматор с апертурой 600 мм в составе термовакuumного испытательного стенда

Игорь Юрьевич Дмитриев<sup>1</sup>, Анна Вячеславовна Завацкая<sup>2</sup>,  
Павел Михайлович Линский<sup>3</sup>, Владимир Сабитович Сиразетдинов<sup>4</sup>✉

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор  
Ленинградской обл., Россия

<sup>1</sup>dmitriy@niioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>

<sup>2</sup>anny-z@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0002-2763-7469>

<sup>3</sup>nnw19@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-9133-6719>

<sup>4</sup>v.sirazet@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-0133-5182>

### Аннотация

**Предмет исследований.** Тепловые режимы и оптические характеристики внеосевого коллиматора с охлаждаемыми зеркалами. Степень соответствия температурных параметров элементов коллиматора и системы охлаждения, полученных расчетным путем и в эксперименте. Оптическое качество коллиматора. **Цель работы.** Создание коллиматора с охлаждаемым зеркальным объективом для расширения функциональных возможностей существующего термовакuumного испытательного стенда за счет снижения теплового фона внутри вакуумной камеры и создания условий для испытаний оптико-электронной аппаратуры с фотоприемными устройствами, работающими в режиме ограничения фоном. **Описание метода.** Температурные параметры элементов коллиматора с системой охлаждения определены на основе разработанной теплофизической модели системы «объектив коллиматора – термостат – камера», в основу которой положены уравнения теплового баланса, выполняемого в стационарном режиме для каждого элемента, входящего в систему. Экспериментально температурные параметры элементов системы определены в выбранных контрольных точках элементов. Оптическое качество коллиматора контролировалось путем измерения коэффициента концентрации энергии излучения в плоскости автоколлимационного изображения точечного излучателя коллиматора. **Основные результаты.** В реализованной конструкции системы «объектив коллиматора – термостат – камера» диапазон температур радиационных экранов, охлаждающих до заданной температуры  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$  зеркала объектива коллиматора при условии минимизации их термодформаций, составляет от  $-45$  до  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Созданный охлаждаемый коллиматор имеет высокое оптическое качество: коэффициент концентрации энергии в плоскости автоколлимационного изображения точечного излучателя коллиматора составляет 70% по каналу имитации объекта и 75% — по каналу фона. **Практическая значимость.** Существенно расширены функциональные возможности действующего термовакuumного стенда: созданы условия для испытаний аппаратуры дистанционного зондирования Земли с фотоприемными устройствами, работающими в режиме ограничения фоном. Разработана теплофизическая модель созданной системы «объектив коллиматора – термостат – камера».

**Ключевые слова:** внеосевой коллиматор, термовакuumный стенд, охлаждающие радиационные экраны, тепловой баланс, терморасстраиваемость коллиматора, режим ограничения фоном

Ссылка для цитирования: Дмитриев И.Ю., Завацкая А.В., Линский П.М. Сиразетдинов В.С. Внеосевой охлаждаемый коллиматор с апертурой 600 мм в составе термовакuumного испытательного стенда // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 9. С. 40–52. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-40-52>

Код OCIS: 230.0230

## Off-axial cooled collimator with a 600-mm aperture as part of thermovacuum test facility

IGOR YU. DMITRIEV<sup>1</sup>, ANNA V. ZAVATSKAYA<sup>2</sup>,  
PAVEL M. LINSKY<sup>3</sup>, VLADIMIR S. SIRAZETDINOV<sup>4</sup>✉

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

<sup>1</sup>[dmitrieviy@niiioep.ru](mailto:dmitrieviy@niiioep.ru) <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>

<sup>2</sup>[anny-z@yandex.ru](mailto:anny-z@yandex.ru) <https://orcid.org/0009-0002-2763-7469>

<sup>3</sup>[nnw19@mail.ru](mailto:nnw19@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-9133-6719>

<sup>4</sup>[v.sirazet@mail.ru](mailto:v.sirazet@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-0133-5182>

### Abstract

**Subject of study.** Thermal modes and optical characteristics of an off-axial two-mirror collimator with cooled-down mirrors. Coincidence degree of the collimator elements temperature values obtained computationally and experimentally. Optical quality of the collimator. **Aim of study.** Design and set-up of the collimator with a cooled-down lens mirrors for expansion of the thermovacuum test facility functionality by decreasing thermal background inside the vacuum chamber and creating conditions for testing optoelectronic devices with photodetectors in the background-limited performance mode. **Method.** Collimator elements' temperatures were determined on the basis of the developed thermophysical model of the "collimator lens – thermostat – chamber" system. The model is based on heat balance equations derived for each element of the system in a stationary mode. Experimentally, temperatures of the system elements were recorded in certain checkpoints. Optical quality of the collimator was controlled by measuring radiation energy concentration factor in the autocollimation image plane of the collimator's radiation point-source. **Main results.** The suggested configuration of the "collimator lens – thermostat – chamber" system produces temperature range from –45 to –80 °C for the radiative shields, cooling collimator lens mirrors down to the given temperature –33 °C, subject to their minimized thermal deformation. The produced cooled collimator has high optical quality: radiation energy concentration factor in the autocollimation image plane of the collimator's radiation "point-source" is 70% for the object imitation channel and 75% for the background channel. **Practical significance.** Functionality of the operating thermovacuum facility has been considerably increased: testing conditions for Earth remote sensing equipment with photodetectors in background-limited performance mode have been created. Thermophysical model of the "collimator lens – thermostat – chamber" system has been developed.

**Keywords:** off-axial collimator, thermovacuum facility, cooling radiative shields, heat balance, collimator thermomismatch, background-limited mode

**For citation:** Dmitriev I.Y., Zavatskaya A.V., Linsky P.M., Sirazetdinov V.S. Off-axial cooled collimator with a 600-mm aperture as part of thermovacuum test facility [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. T. 91. № 9. С. 40–52. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-40-52>

OCIS code: 230.0230

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием проведения наземных испытаний оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) космического базирования является воссоздание на испытательном стенде ра-

бочих температур и пониженного давления, близких к эксплуатационным. В случае испытаний инфракрасной (ИК) ОЭА с фотоприемными устройствами, работающими в режиме ограничения фоном, необходимо обеспечить

снижение внешнего теплового фона до уровня, не превышающего внутриприборный. Это требует охлаждения элементов оборудования испытательного термовакuumного стенда, находящихся в поле зрения испытуемой ОЭА, к которым, прежде всего, следует отнести зеркала объектива коллиматора, имитирующего при испытаниях наблюдаемые объекты.

Цель настоящей работы — создание коллиматора с охлаждаемым зеркальным объективом для расширения функциональных возможностей существующего термовакuumного испытательного стенда за счет снижения теплового фона внутри вакуумной камеры и создания условий для испытаний ОЭА с фотоприемными устройствами, работающими в режиме ограничения фоном.

Поставленная цель требует создания в составе существующего термовакuumного испытательного стенда системы обеспечения низкофоновых температур (СОНТ), которую в вакуумных камерах с охлаждаемыми оптическими системами (ОС) конструируют, используя разные подходы [1]. В одних случаях [2, 3] радиационные панели охлаждения, входящие в состав СОНТ, монтируют вплотную к стенкам камеры для максимально возможного использования ОС и аппаратурой внутреннего пространства камеры. В других [1, 4] — с целью снижения общей мощности охлаждающих агрегатов выбирают модульный вариант СОНТ, когда каждый элемент ОС имеет свой отдельно регулируемый охлаждающий радиационный экран или проточную панель. В настоящей работе рассмотрен последний вариант, поскольку заданы невысокие требования по глубине охлаждения зеркал коллиматора ( $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а создаваемый коллиматор встраивается в уже существующую вакуумную камеру большого объема ( $150\text{ м}^3$ ) и сам по себе отличается большими габаритами: диаметр главного зеркала коллиматора (ГЗК) составляет 600 мм, а фокусное расстояние 11 000 мм. Охлаждение таких больших объемов потребовало бы неоправданно больших капитальных затрат. Для сравнения рассмотрим вакуумную камеру испытательного стенда, описанного в работе [2]. В ней охлаждается все пространство, занимаемое коллиматором. Камера имеет многократно меньший объем — около  $6\text{ м}^3$ , габаритные характеристики коллиматора оп-

ределяются диаметром ГЗК — 267 мм и его фокусным расстоянием — 1700 мм, а глубина охлаждения коллиматора была задана на уровне  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В настоящей работе требуется существенно меньшая глубина охлаждения элементов коллиматора, что обусловлено рабочей температурой испытуемой ОЭА. При этом создаваемый коллиматор должен сохранять оптическое качество во всем диапазоне температур от  $+20$  до  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . С учетом этого была рассмотрена конструкция СОНТ, предусматривающая индивидуальные охлаждение и регулирование температур ГЗК и плоского зеркала (ПЗ) объектива коллиматора путем радиационного теплообмена. Этот вид теплообмена [1] в заданном диапазоне рабочих температур коллиматора, не требующем глубокого охлаждения зеркал, происходит достаточно эффективно.

В ходе проектирования коллиматора с СОНТ использованы результаты работ [5–7] для создания рабочей теплофизической модели системы «объектив коллиматора – термостат – камера», включающей в себя независимые подсистемы «ГЗК – термостат – камера» и «ПЗ – термостат – камера». Термин «термостат» подразумевает комплект теплозащитных и охлаждаемых радиационных экранов, входящих в состав СОНТ.

Результаты расчетов позволили определить диапазон требуемых тепловых режимов работы охлаждаемых радиационных экранов термостатов, охлаждающих до заданной температуры зеркала объектива коллиматора при условии минимизации возникающих термоаббераций. Это осуществлялось подбором конструктивных и теплофизических характеристик элементов термостата, использовались также известные соотношения и подходы [8–11] для оценок аббераций, обусловленных общим охлаждением зеркал объектива коллиматора, а также присутствием в них поперечных и осевых градиентов температур. Расчеты подтвердили возможность выбора радиационного способа охлаждения зеркал коллиматора и построения системы охлаждения на основе контурных процесс-термостатов, использующих фреоновые или спиртовые хладагенты.

Важной задачей явились экспериментальные исследования созданного коллиматора

с СОНТ в составе термовакuumного испытательного стенда. Исследования процесса охлаждения зеркал объектива коллиматора позволили выполнить верификацию и корректировку расчетных теплофизических моделей. Оптическое качество коллиматора при разных температурах зеркал контролировалось измерениями коэффициента концентрации энергии (ККЭ) излучения в плоскости автоколлимационного изображения точечного излучателя коллиматора.

### ОПИСАНИЕ КОЛЛИМАТОРА С СИСТЕМОЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НИЗКОФОНОВЫХ ТЕМПЕРАТУР

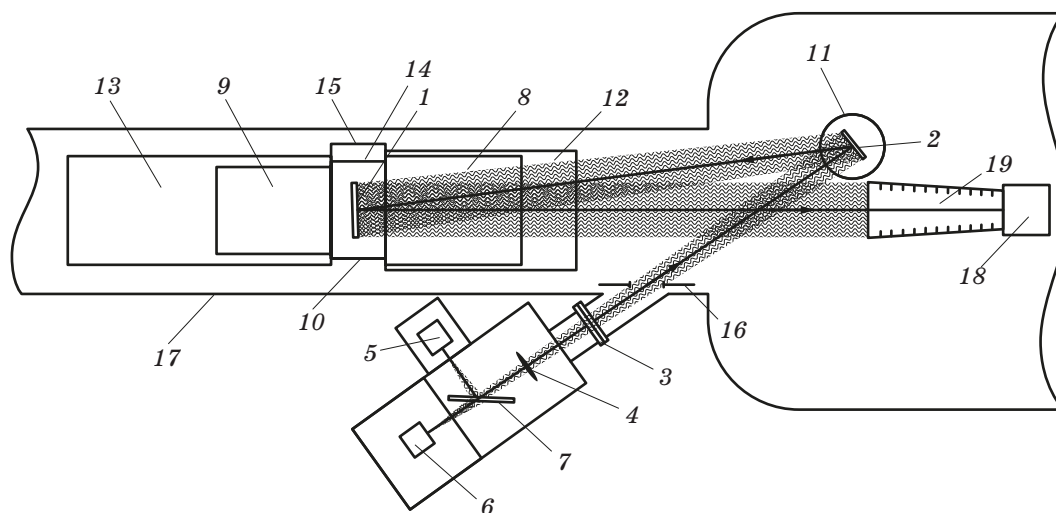
Двухканальный охлаждаемый коллиматор предназначен для формирования фонообъектной обстановки на бесконечности при испытании ОЭА в широких диапазонах рабочих температур и атмосферного давления. Один канал коллиматора, включающий модель абсолютно черного тела (АЧТ) и микродиафрагму в качестве тест-объекта в составе фокального узла, имитирует бесконечно удаленный

малоразмерный объект, другой с помощью модели АЧТ и специального тест-объекта (светопропускающей маски) имитирует излучение подстилающей поверхности фона в поле зрения испытуемой ОЭА. Тест-объекты расположены в фокальной плоскости коллиматора.

На рис. 1 приведена оптическая схема коллиматора и размещение в вакуумной камере охлаждаемых радиационных и теплозащитных экранов, входящих в состав СОНТ.

В состав коллиматора входят

- двухзеркальный объектив размещенный в объеме вакуумной камеры стенда, состоящий из ГЗК и ПЗ,
- иллюминатор, изготовленный из селенида цинка, установленный в патрубке вакуумной камеры,
- двухлинзовый компенсатор из фторида кальция для исправления полевых аберраций и, как следствие, увеличения поля зрения коллиматора,
- фокальный узел канала малоразмерных объектов и узел канала фона, размещенные вне вакуумной камеры,



**Рис. 1.** Схема коллиматора с элементами СОНТ в вакуумной камере испытательного стенда. 1 — ГЗК, 2 — ПЗ, 3 — иллюминатор, 4 — двухлинзовый компенсатор, 5 — фокальный узел канала фона, 6 — фокальный узел канала малоразмерных объектов, 7 — светоделитель, 8 и 9 — охлаждаемые радиационные экраны ГЗК, 10 — охлаждаемая подставка ГЗК, 11 — охлаждаемый радиационный экран ПЗ, 12–16 — теплозащитные экраны, 17 — вакуумная камера, 18 — испытуемая ОЭА, 19 — охлаждаемая блenda

**Fig. 1.** Collimator scheme with elements of the low-background temperature support system in the vacuum chamber of the test facility. (1) Main collimator mirror, (2) flat collimator mirror, (3) illuminator, (4) two-lenses compensator, (5) focal assembly of the background channel, (6) focal assembly of small-size objects, (7) beam splitter, (8) and (9) are cooled radiative shields for main collimator mirror, (10) cooled main collimator mirror platform, (11) cooled radiative shield for the flat collimator mirror, (12)–(16) are heat insulating shields, (17) vacuum chamber, (18) tested optical electronic equipment, (19) its cooled blend

– светоделитель — плоскопараллельная пластина из фторида кальция со светоделительным покрытием, расположенная под углом  $45^\circ$  к оптической оси коллиматора вблизи его фокальной плоскости.

Функционирование коллиматора осуществляется следующим образом: излучение, выходящее из фокальных узлов расширяющимся пучком, пройдя светоделитель и компенсатор, входит в вакуумную камеру через иллюминатор, отражается от ПЗ и падает на ГЗК объектива коллиматора. Главное зеркало коллиматора, имеющее форму внеосевой параболы, преобразует пучок ИК излучения в параллельный, имитирующий для испытуемой ОЭА засветку от бесконечно удаленного объекта.

При испытаниях или калибровке ОЭА, предназначенной для работы с низкотемпературными объектами, необходимо устранить или существенно снизить уровень собственного теплового излучения от конструктивных элементов стенда, расположенных в поле зрения аппаратуры. К таким элементам в первую очередь относятся зеркала объектива коллиматора, формирующие и направляющие пучок ИК излучения во входной зрачок ОЭА, а также стенки вакуумной камеры. Задачу снижения внешнего радиационного фона в поле зрения ОЭА выполняет созданная в составе стенда СОНТ, которая должна обеспечивать проведение испытаний, эксплуатируемой в условиях пониженной температуры внешнего фона до  $-33^\circ\text{C}$  и давлении не выше  $1,33 \times 10^{-3}$  Па.

В состав СОНТ входят (рис. 1)

- два охлаждаемых радиационных экранов и охлаждаемая подставка оправы ГЗК, регулирующие его температуру,

- охлаждаемый радиационный экран, регулирующий температуру ПЗ,

- четыре теплозащитных пассивных экрана и охлаждаемый теплозащитный экран, защищающие охлаждаемые радиационные экраны и зеркала объектива коллиматора от теплового потока со стенок вакуумной камеры,

- охлаждаемая блenda, ограничивающая фоновое излучение от стенок вакуумной камеры во входной зрачок объектива ОЭА,

- охлаждающие агрегаты (процесс-термостаты), блоки управления и контроля СОНТ (размещены вне объема вакуумной камеры и не показаны на рис. 1).

Оба радиационных экрана, охлаждающие ГЗК, изготовлены из листовой меди, имеют форму цилиндра с размерами  $\varnothing 1200 \times 1500$  мм и  $\varnothing 950 \times 1200$  мм соответственно. По внешним поверхностям цилиндров пропущены змеевики, обеспечивающие охлаждение их внутренних поверхностей, окрашенных для достижения высокого коэффициента теплового излучения. Охлаждение и термостатирование ГЗК на заданном уровне температуры происходит в основном за счет радиационного теплообмена поверхностей зеркала с внутренними поверхностями охлаждаемых экранов (8) и (9). Плоский медный экран (10) служит для охлаждения основания оправы ГЗК.

Радиационный экран (11), охлаждающий ПЗ, изготовлен из листовой меди в виде вертикально установленного цилиндра размером  $950 \times 604$  мм. В образующей цилиндра сделан проем размером  $520 \times 410$  мм для входа и выхода светового пучка, а его верхний торец закрыт листом меди. Внутренняя поверхность экрана имеет высокий коэффициент теплового излучения, по всей внешней поверхности пропущен охлаждающий змеевик. От потока тепла со стенки вакуумной камеры этот экран защищают несколько слоев экранно-вакуумной тепловой изоляции (ЭВТИ) на основе металлизированной пленки.

Теплозащитные экраны (12) и (13) с размерами  $\varnothing 1300 \times 2100$  мм и  $\varnothing 1100 \times 2900$  мм соответственно изготовлены из листовой полированной стали и имеют высокую отражающую способность. Теплозащитный экран (14) изготовлен из листовой меди в виде арки, расположенной над оправой ГЗК и перекрывающей зазор между двумя охлаждаемыми экранами ГЗК. Над ним установлен дополнительный экран (15) из листовой полированной стали размером  $\varnothing 1400 \times 600$  мм. Назначение теплозащитных экранов — снизить тепловые потоки, идущие со стенок вакуумной камеры на охлаждаемые радиационные экраны и ГЗК.

Теплозащитный экран (16), предназначенный для защиты ПЗ и ГЗК от потока тепла, излучаемого в поле зрения зеркал коллиматора участком стенки вакуумной камеры вокруг зоны входа пучка, выполнен охлаждаемым. Он размещен у стенки камеры в зоне стыковки с патрубком иллюминатора и выполнен в виде прямоугольного медного листа размером  $900 \times 500$  мм с эллиптическим

проемом размером 360×200 мм для прохождения пучка ИК излучения. От потока тепла со стенки вакуумной камеры экран защищают несколько слоев ЭВТИ.

Перечисленный выше комплект охлаждаемых и пассивных экранов позволил реализовать заданные для зеркал объектива коллиматора температурные параметры как по заданному значению (–33 °С), так и в части ограничений на осевые и радиальные градиенты температуры. Эти ограничения важно учитывать, поскольку и в обычном режиме, и в режиме захлаживания оптическое качество коллиматора должно оставаться высоким и удовлетворять предъявляемым требованиям при испытаниях ОЭА. Представленная выше конфигурация охлаждаемого коллиматора и СОНТ были определены посредством создания рабочей теплофизической модели системы «объектив коллиматора – термостат – камера», выполнения тепловых расчетов и выбором оптимальных режимов работы компонентов СОНТ.

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «ОБЪЕКТИВ КОЛЛИМАТОРА – ТЕРМОСТАТ – КАМЕРА»

В основе теплового расчета режимов охлаждения зеркал коллиматора положен метод теплового баланса [5–7]. Термовакuumная система «объектив коллиматора – термостат – камера» разбивается на две подсистемы — «ГЗК–термостат–камера» и «ПЗ–термостат–камера», каждая из которых находится в тепловом равновесии.

Методом теплового баланса строятся модели рассматриваемых подсистем, которые учитывают геометрические и теплофизические характеристики взаимодействующих между собой элементов при теплообмене излучением и за счет кондуктивных тепловых потоков. Эти характеристики определяют эффективность теплообмена, а следовательно, и установившиеся температуры составных частей в условиях теплового баланса термовакuumной системы. Метод теплового баланса позволяет рассчитать условия теплового равновесного состояния системы, определить перепады температуры по оси и по радиусу зеркала и, таким образом, задать оптимальные режимы работы СОНТ, обеспечивающие

сохранение в допуске осевых и радиальных градиентов температуры в зеркалах.

С целью определения этих режимов разработаны многопараметрические теплофизические модели равновесного теплового состояния подсистем «ГЗК–термостат–камера» и «ПЗ–термостат–камера», которые учитывают основные конструктивные и теплофизические характеристики их элементов, способные повлиять на режим охлаждения зеркал коллиматора.

Математически расчетная модель описывается системой уравнений теплового баланса каждого элемента в условиях теплового равновесия термовакuumной подсистемы в целом. В расчетной модели используется метод разбиения поверхностей зеркал на температурные зоны [5], позволяющий оценить распределения температуры и степень термодформации поверхностей. Так, для расчета радиального распределения температуры зеркала условно разбивается на несколько осесимметричных радиальных зон, для каждой из которых формулируется уравнение теплового баланса с соответствующими угловыми коэффициентами лучистого теплообмена. Тепловой поток между соседними поверхностями каждой зоны возникает за счет теплопроводности материала зеркала и влияет на условия теплового баланса каждой зоны.

Ниже приведено уравнение теплового баланса для зеркальной поверхности  $i$ -ой радиальной зоны зеркала в общем виде

$$\sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} \sigma_0 \varphi_{ij} F_i (T_i^4 - T_j^4) + \frac{\Lambda}{\delta_i} F_i (T_{i,s} - T_{i,b}) + \\ + \frac{\Lambda}{R_{i+1} - R_i} F_{\text{ext},i} \left( \frac{T_{i,s} - T_{i,b}}{2} - \frac{T_{i+1,s} - T_{i+1,b}}{2} \right) + \\ + \frac{\Lambda}{R_i - R_{i-1}} F_{\text{int},i} \left( \frac{T_{i,s} - T_{i,b}}{2} - \frac{T_{i-1,s} - T_{i-1,b}}{2} \right) = 0. \quad (1)$$

Здесь  $i, j$  — номера взаимодействующих элементов поверхности компонентов системы,  $\varepsilon_{ij}$  — приведенный коэффициент теплового излучения между поверхностями взаимодействующих элементов,  $\sigma_0 = 5,67 \times 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана–Больцмана,  $\varphi_{ij}$  — угловой коэффициент излучения между поверхностями,  $F_i$  — площадь поверхности  $i$ -го

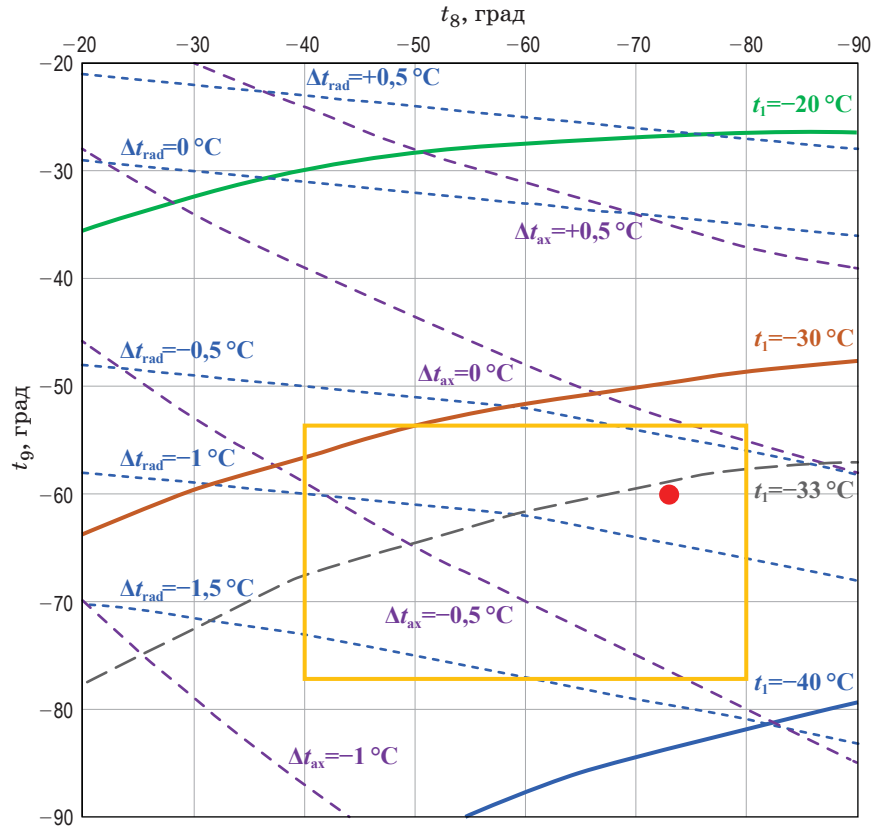
элемента зеркала,  $\text{м}^2$ ,  $F_{\text{ext},i}$ ,  $F_{\text{int},i}$  — площади соответственно внешней и внутренней торцевых поверхностей  $i$ -го элемента зеркала,  $\text{м}^2$ ,  $\Lambda$  — приведенный коэффициент теплопроводности материала зеркала,  $\text{Вт}/(\text{м К})$ ,  $\delta_i$  — толщина  $i$ -го элемента,  $\text{м}$ ,  $T_i$ ,  $T_j$  — температуры поверхности  $i$ -го и  $j$ -го элементов,  $\text{К}$ ,  $T_{i,s}$ ,  $T_{i,b}$  — температуры соответственно зеркальной и тыльной поверхностей  $i$ -ой радиальной зоны зеркала,  $\text{К}$ ,  $T_{i+1,s}$ ,  $T_{i+1,b}$  — температуры соответственно зеркальной и тыльной поверхностей  $(i + 1)$ -ой радиальной зоны зеркала,  $\text{К}$ ,  $T_{i-1,s}$ ,  $T_{i-1,b}$  — температуры соответственно зеркальной и тыльной поверхностей  $(i - 1)$ -ой радиальной зоны зеркала,  $\text{К}$ ,  $R_i$ ,  $R_{i+1}$  — радиусы  $i$ -ой и  $(i + 1)$ -ой зон,  $\text{м}$ .

Приведенный коэффициент теплового излучения определяется через угловые коэффициенты следующим образом [12]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{1 + \varphi_{ij} \left( \frac{1}{\varepsilon_i} - 1 \right) + \varphi_{ji} \left( \frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right)}, \quad \varphi_{ji} = \frac{F_i}{F_j} \varphi_{ij}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_i$  и  $\varepsilon_j$  — коэффициенты теплового излучения двух взаимодействующих элементов поверхностей.

Аналогичным образом записываются уравнения теплового баланса для элементов поверхностей каждого компонента подсистем «ГЗК–термостат–камера» и «ПЗ–термостат–камера», которые участвуют в теплообмене



**Рис. 2.** Номограмма распределения изотерм температуры ГЗК ( $t_1$ ), а также линий уровня радиальных ( $\Delta t_{\text{rad}}$ ) и осевых ( $\Delta t_{\text{ax}}$ ) перепадов температуры в зависимости от температуры охлаждаемых радиационных экранов ( $t_8$ ,  $t_9$ ). Красной точкой отмечен экспериментально полученный режим охлаждения ГЗК и ПЗ до температуры  $-33^\circ\text{C}$ , отвечающий температурам охлаждаемых экранов  $t_8 = -60^\circ\text{C}$ ,  $t_9 = -73^\circ\text{C}$  и  $t_{11} = -45^\circ\text{C}$ . Остальные пояснения см. в тексте

**Fig. 2.** Nomogram of an isotherm distribution for ( $t_1$ ) main collimator mirror temperature and isolines for ( $\Delta t_{\text{rad}}$ ) radial and ( $\Delta t_{\text{ax}}$ ) axis temperature drops, according to ( $t_8$ ,  $t_9$ ) cooled radiative shields' temperatures. The red dot marks the experimentally obtained cooling mode of the main collimator mirror and the flat mirror to a temperature of  $-33^\circ\text{C}$ , corresponding to the temperatures of the cooled shields  $t_8 = -60^\circ\text{C}$ ,  $t_9 = -73^\circ\text{C}$  and  $t_{11} = -45^\circ\text{C}$ . For other explanations, see the text

излучением с поверхностями компонентов системы, а также в кондуктивном теплообмене между собой.

Полученная система нелинейных алгебраических уравнений решается методом последовательных приближений. Предварительно она преобразуется в линейную систему уравнений, в которой в качестве искоемых неизвестных выступают отклонения температуры от заданных равновесных значений [7, 13, 14].

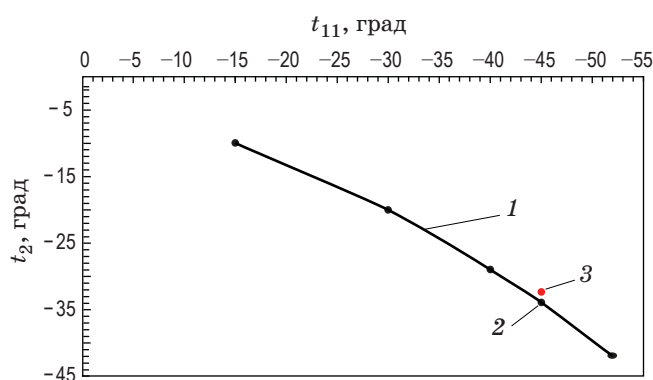
Решение линейной системы уравнений относительно указанных неизвестных находят методом Гаусса, дополненным методом последовательных приближений. Проверка полученного решения осуществлялась с использованием исходных уравнений после подстановки в них полученных значений температуры всех элементов. При этом дисбаланс тепловых потоков в каждом уравнении не превышает  $10^{-8}$  Вт.

Для определения оптимальных режимов на основе расчетов строится номограмма изотерм, отвечающих полученным значениям температуры ГЗК в условиях установившихся температур обоих его охлаждаемых радиационных экранов. Эта номограмма далее используется для выбора режима охлаждения зеркала до заданной температуры при минимальных градиентах температуры в нем. На рис. 2 приведена номограмма изотерм для ГЗК в диапазоне изменения температуры охлаждаемых радиационных экранов от  $+20$  до  $-90$  °С.

На номограмме сплошными линиями обозначены изотермы, соответствующие значениям температуры  $t_1$  в центре на тыльной поверхности ГЗК, полученным при задании различных комбинаций значений температур  $t_8$  и  $t_9$  на его охлаждаемых радиационных экранах (рис. 1, поз. 8 и 9). Пунктирными линиями обозначены линии уровня, соответствующие найденным значениям осевых ( $\Delta t_{ax}$ ) и радиальных ( $\Delta t_{rad}$ ) перепадов температуры на ГЗК. Точки пересечения конкретной изотермы  $t_1$  и пунктирных линий определяют осевой и радиальный перепады температуры, полученные при температурах экранов  $t_8$  и  $t_9$ , отвечающих этой точке. Желтой рамкой на поле номограммы выделена область оптимальных режимов охлаждения ГЗК для заданной изотермы  $t_1 = -33$  °С, при которых радиальный и осевой перепады

температуры в ГЗК находятся в пределах от нуля до  $\Delta t_{rad} \approx 1,5$  °С и  $\Delta t_{ax} \approx 0,7$  °С. Видно, что радиационный способ охлаждения ГЗК можно реализовать на основе контурных процесс-термостатов, использующих фреоновые или спиртовые хладагенты. Требуемая температура ГЗК достигается при температурах радиационных охлаждаемых экранов выше  $-80$  °С.

На рис. 3 приведена зависимость температуры  $t_2$  в центре на тыльной поверхности ПЗ от температуры  $t_{11}$  охлаждаемого экрана (поз. 11, рис. 1). В эксперименте значение температуры ПЗ  $t_2 = -33$  °С обеспечивается при температуре охлаждаемого экрана  $t_{11} = -(45 \pm 1)$  °С. Согласно расчетам при температуре охлаждаемого экрана  $-45$  °С температура ПЗ составляет  $-34$  °С, что мало отличается от экспериментально полученного значения. При этом радиальный перепад температуры в зеркале составляет  $1,5$  °С, а осевой —  $0,5$  °С.



**Рис. 3.** Зависимость температуры ПЗ ( $t_2$ ) от температуры охлаждаемого радиационного экрана ( $t_{11}$ ). (1) Рассчитанные температуры ПЗ, (2) рассчитанное и (3) экспериментально полученное значения температуры ПЗ при температуре охлаждаемого экрана  $t_{11} = -45$  °С. Точка (3) соответствует экспериментально полученному режиму охлаждения ГЗК и ПЗ до температуры  $-33$  °С, отвечающему температурам охлаждаемых экранов  $t_8 = -60$  °С,  $t_9 = -73$  °С и  $t_{11} = -45$  °С

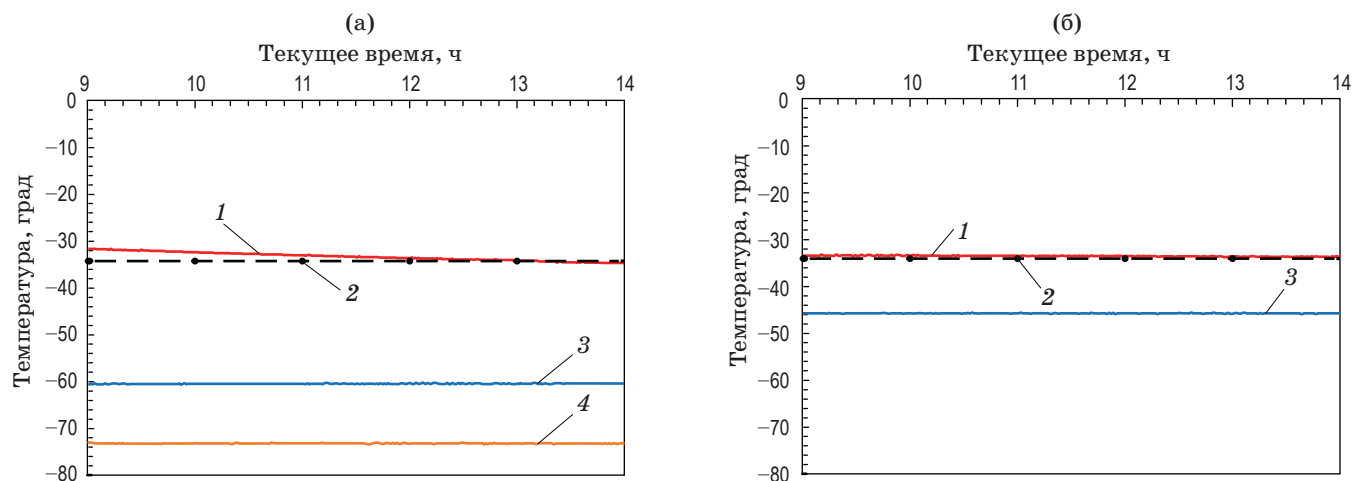
**Fig. 3.** Dependence of the temperature of the flat collimator mirror ( $t_2$ ) on the temperature of the cooled radiation shield ( $t_{11}$ ). (1) Calculated values of the flat collimator mirror temperature, (2) calculated and (3) experimentally obtained temperature values at cooled radiative shield temperature  $t_{11} = -45$  °С. Point (3) corresponds to the experimentally obtained cooling mode of the main collimator mirror and the flat mirror to a temperature of  $-33$  °С, corresponding to the temperatures of the cooled shields  $t_8 = -60$  °С,  $t_9 = -73$  °С and  $t_{11} = -45$  °С

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЕРИФИКАЦИИ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Представленные на рис. 1 элементы коллиматора и термостата смонтированы в вакуумной камере объемом  $150 \text{ м}^3$ , составляющей основу испытательного термовакуумного стенда ВК-150. При проведении испытаний остаточное давление в вакуумной камере не превышает  $1,33 \times 10^{-3} \text{ Па}$ . Как уже отмечалось, регулирование температуры расположенного внутри камеры объектива коллиматора осуществлялось охлаждаемыми радиационными экранами. Для эксперимента были задействованы четыре автономные системы охлаждения, каждая из которых включает свой процесс-термостат, магистрали доставки хладагента и охлаждаемые экраны. Контроль температуры на зеркалах осуществляется по трем датчикам, расположенным на их тыльной поверхности — в центре, на нижнем и на верхнем краях.

На рис. 4 представлены графики изменения температуры датчика, расположенного в центре тыльной поверхности зеркала, а также температуры охлаждаемых экранов в процессе захлаживания объектива колли-

матора. Для наглядности на графиках охвачен не весь временной интервал испытаний: пропущен начальный нестационарный этап захлаживания экранов. Стартовая температура зеркал коллиматора составляла  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . На каждом из рисунков наряду с экспериментальной кривой температуры в центре зеркала построена расчетная, полученная на основе разработанной теплофизической модели при реализованных в эксперименте температурах охлаждаемых экранов. С учетом того, что модель отвечает стационарному тепловому режиму системы, видно соответствие экспериментальных и расчетных данных на представленном заключительном отрезке времени при достижении ГЗК и ПЗ заданной температуры. Экспериментально полученный режим охлаждения ГЗК и ПЗ до температуры  $-33 \text{ }^\circ\text{C}$  отвечает температурам охлаждаемых экранов  $t_8 = -60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_9 = -73 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_{11} = -45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Этот режим обозначен на рис. 2 красной точкой, а на рис. 3 — точкой (3). Разница между экспериментальным и расчетным значениями температуры ГЗК и ПЗ не превышает  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ : при реализованных в эксперименте температурах охлаждаемых экранов  $t_8 = -60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,



**Рис. 4.** Температуры в центре тыльной поверхности ГЗК (а) и ПЗ (б) и охлаждаемых радиационных экранов в установившемся тепловом режиме. (а) — экспериментальные значения температуры ГЗК  $t_1$  (1), расчетные значения  $t_1$  (2), экспериментальные значения температуры экрана  $t_9$  (3), экспериментальные значения температуры экрана  $t_8$  (4). (б) — экспериментальные значения температуры ПЗ  $t_2$  (1), расчетные значения  $t_2$  (2), экспериментальные значения температуры экрана  $t_{11}$  (3)

**Fig. 4.** Temperatures in the center of the rear surfaces of (a) the main collimator mirror, (б) the flat collimator mirror and cooled radiative shields under steady-state thermal mode. (а): (1) experimental values for the main collimator mirror temperature  $t_1$ , (2) calculated values for  $t_1$ , (3) experimental values for shield temperature  $t_9$ , (4) experimental values for shield temperature  $t_8$ . (б): (1) experimental values for the flat collimator mirror temperature  $t_2$ , (2) calculated values for  $t_2$ , (3) experimental values for shield temperature  $t_{11}$

$t_9 = -73\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t_{11} = -45\text{ }^{\circ}\text{C}$  получены расчетные температуры ГЗК и ПЗ  $t_1 = t_2 = -34\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Близость значений температуры зеркал, рассчитанных и полученных в эксперименте, свидетельствует о корректности разработанной теплофизической модели охлаждения зеркал коллиматора.

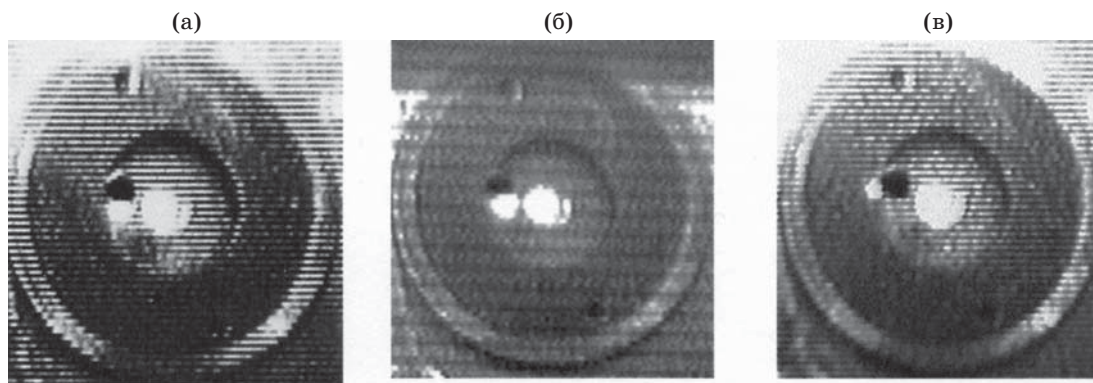
Отметим также, что измерения температуры в точках контроля, разнесенных по вертикали на края ГЗК и ПЗ, показали перепад температур от центра к краю около  $1,5$  и  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно. Расчет на основе теплофизической модели дал значения перепада немного меньше — около  $1$  и  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно.

Отмеченная корреляция расчетных и экспериментальных результатов была получена после корректировки параметров теплофизической модели — значений приведенного коэффициента теплового излучения взаимодействующих поверхностей и коэффициентов теплообмена между элементами системы «объектив коллиматора — термостат — камера». В ходе верификации модели путем сравнения экспериментальных и рассчитанных по модели температурных параметров наиболее существенной коррекции подвергся коэффициент теплового излучения внутренней поверхности экрана-арки над ГЗК (поз. 14, рис. 1).

Оптическое качество коллиматора контролировалось посредством измерения ККЭ энергии излучения в плоскости автоколлимационного изображения точечного излучателя коллиматора по методике, аналогичной изложенной в работе [15]. Для выполнения измерений в фокальной плоскости коллиматора в поз. 6 или 5 (см. рис. 1) располагают излучающую диафрагму измерительного устройства, которая имитирует точечный излучатель. В этот канал измерительного устройства входят также источник излучения подсветки диафрагмы (глобар), конденсор, селективный светофильтр и дисковый модулятор излучения. Коллимированное ГЗК излучение от точечного излучателя на выходе коллиматора отражается от высокоточного автоколлимационного зеркала, установленного в поз. 18 (рис. 1), проходит тракт коллиматора в обратном направлении и попадает в приемный канал. В состав приемного канала устройства входят сменная измерительная диафрагма, в плоскости которой строится автоколлима-

ционное изображение точечного излучателя, и фотоприемник с блоком регистрации сигнала. Малая диафрагма имеет диаметр кружка Эйри в соответствии с заданной длиной волны излучения, диаметр большой диафрагмы  $1\text{ мм}$ . Основной проблемой при измерении ККЭ в автоколлимационном изображении точечного излучателя коллиматора в процессе охлаждения зеркал является удержание изображения в центре измерительной диафрагмы. Это связано с тем, что при охлаждении несущие конструкции зеркал испытывают термодетформации, что может приводить к заклонам оптической оси коллиматора. В тех случаях, когда это происходит, осуществляют компенсацию отклонений оси с помощью дистанционных подвижек, которыми снабжены зеркала. Для исключения влияния переменного фона в схеме измерения используются модулированные сигналы.

Выполненные в таких условиях измерения показали, что реализованный ККЭ в пределах кружка Эйри имеет значения  $70$  и  $75\%$  по каналу малоразмерного объекта и по каналу фона соответственно. Полученные значения ККЭ позволяют путем пересчета [15] оценить среднеквадратическое отклонение волнового фронта пучка на световой апертуре зеркала не хуже  $0,06\lambda$  ( $\lambda = 4\text{ мкм}$ ). Важно отметить, что такая высокая степень концентрации энергии излучения, дважды прошедшего оптический тракт коллиматора и отраженного возвращающим зеркалом, была реализована и при температуре  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и при  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом следует учитывать, что при подготовке охлаждаемого коллиматора к испытаниям ОЭА микродиафрагму фокального узла коллиматора необходимо выставлять в плоскость наилучшей установки, чтобы учесть термонаведенную дефокусировку пучка, если она значительна. Термонаведенная дефокусировка может возникать как за счет изменения средней температуры зеркал коллиматора, так и за счет осевого или радиального градиента температуры, если они присутствуют в зеркалах. В то же время, оценки, выполненные на основе известных соотношений [8, 9, 11], показывают, что при общем охлаждении зеркал на  $53\text{ }^{\circ}\text{C}$  и перепадах осевых и радиальных температур, не превышающих  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , совокупное значение дефокусировки пучка не превышает допуск



**Рис. 5.** Автоколлимационное изображение светового пучка в фокальной плоскости коллиматора (пятно слева) при температурах зеркал 20 °С и атмосферном давлении в камере (а), при –33 °С в условиях высокого вакуума в камере (б), в процессе охлаждения зеркал в условиях высокого вакуума (в). Светлое пятно справа — подсвеченная микродиафрагма фокального узла коллиматора

**Fig. 5.** Autocollimating image of the light beam in the focal plane of the collimator (spot on the left side) (a) at the mirrors' temperature of 20 °C and an atmospheric pressure in the chamber, (б) at the mirrors' temperature of –33 °C and high vacuum in the chamber, (в) in the process of the mirrors' cooling in high vacuum in the chamber. The bright spot on the right is the illuminated microdiaphragm of the collimator focal point

по критерию Рэлея [11, 12], соответствующий  $\Delta F = 1,22\lambda(F/D)^2 \approx 1,6$  мм в случае длины волны 4 мкм при  $D = 600$  мм и  $F = 10900$  мм. Это значение приблизительно равно половине длины каустики сфокусированного пучка ИК излучения. В этих условиях дефокусировку пучка можно считать несущественной. Отметим, что указанный довольно жесткий допуск на перепад температуры 2 °C относится прежде всего к осевому градиенту температуры, изгибающему зеркало. Остальные температурные факторы влияют на дефокусировку пучка на порядок слабее, поскольку очень мал коэффициент линейного расширения ситалла С-115М, из которого изготовлено зеркало объектива коллиматора.

На рис. 5 приведены фотографии полученных в видимом диапазоне изображений пучка, сфокусированного в плоскости наилучшей установки микродиафрагмы фокального узла при нормальных условиях, т.е. при атмосферном давлении в камере и температуре зеркал +20 °C, а также в условиях высокого вакуума в камере и температуре зеркал –33 °C и в процессе охлаждения зеркал в условиях высокого вакуума.

На фотографиях световое пятно слева — изображение сфокусированного пучка, прошедшего оптический тракт коллиматора после отражения от высокоточного автоколлимационного зеркала, а светлое пятно справа —

подсвеченная микродиафрагма фокального узла коллиматора. Видно, что пятно практически осесимметрично, а размер его меньше диаметра фокальной микродиафрагмы. Это свидетельствует об отсутствии больших искажений волнового фронта пучка. Сравнение рис. 5а и 5в показывает, что сфокусированное пятно немного смещается относительно начального положения в процессе охлаждения зеркал — на рис. 5в фотография с наибольшим отклонением пятна. Сравнивая рис. 5а и 5б видим, что при выходе на заданный стационарный тепловой режим пятно практически возвращается на исходную позицию. Оценка максимального углового смещения пятна дает очень небольшое значение — не более 20". Отсюда можно сделать вывод, что темп охлаждения и реализованная динамика изменения температуры зеркал объектива коллиматора в процессе их захлаживания позволили избежать терморасстраиваемости оптической схемы.

Таким образом, приведенные выше оптические характеристики тестирующего коллиматора пучка свидетельствуют, что созданный коллиматор обладает хорошим оптическим качеством, соответствующим предъявляемым к нему требованиям, и характеризуется низкой терморасстраиваемостью в диапазоне температур от +20 до –33 °C. Последний фактор важен, поскольку существенно упрощает

условия эксплуатации коллиматора как в период подготовки оборудования к испытаниям ОЭА, так и в ходе непрерывного многодневного цикла их выполнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы в составе действующего термовакуумного испытательного стенда ВК-150М создан и введен в эксплуатацию длиннофокусный двухканальный коллиматор с охлаждаемыми зеркалами объектива в диапазоне от  $+20$  до  $-33$  °С. Отличительными особенностями двухзеркального объектива являются его широкая световая апертура (600 мм) и внеосевая схема, исключая центральное виньетирование выходного зрачка коллиматора. Смонтированы объективы внутри вакуумной камеры. Главное асферическое зеркало объектива и плоское зеркало охлаждаются до заданных температур путем радиационного теплообмена с охлаждаемыми экранами низкотемпературных термостатов, входящих в состав созданной СОНТ.

В ходе создания коллиматора были разработаны теплофизическая и соответствующая ей математическая модели системы «объектив коллиматора — термостат — камера», основанные на уравнениях теплового баланса,

выполняемого в стационарном режиме для каждого элемента системы. Путем моделирования были исследованы варианты конструкции СОНТ и определен диапазон требуемых режимов работы элементов низкотемпературного термостата, обеспечивающих необходимое охлаждение зеркал объектива и ограничение степени их термдеформаций. Определены возможности дальнейшей оптимизации конструкции СОНТ. Так, в частности, применение ЭВТИ для дополнительной теплозащиты охлаждаемых радиационных экранов позволит повысить их температуру примерно на  $20$  °С при заданном стационарном тепловом режиме зеркал коллиматора.

Экспериментальные исследования созданного коллиматора показали, что формируемый им пучок ИК излучения на длине волны  $4$  мкм, отвечающей заданному рабочему диапазону коллиматора, имеет практически дифракционное качество. Коэффициент концентрации энергии в пределах кружка Эйри в пучке, дважды прошедшем оптический тракт коллиматора, имеет значения  $70$  и  $75\%$  по каналу имитатора малоразмерного объекта и по каналу фона соответственно. Такая высокая степень концентрации энергии была реализована и при температуре  $-33$  °С, и при  $+20$  °С, что говорит о низкой терморасстраиваемости коллиматора.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Олейников Л.Ш. Кримооптические системы. СПб.: ИПК КОСТА, 2013. 352 с.
2. Hayes A.G., Downs G., Gabrielson A., et al. The seeker experimental system at MIT Lincoln laboratory // Proc. SPIE. 2006. V. 6208. P. 620809-1–620809-11. <https://doi.org/10.1117/12.663801>
3. Гектин Ю.М., Зорин С.М., Трофимов Д.О. и др. Криогенно-вакуумная установка // Патент РФ № RU2678923C1. Бюл. 2019. № 4.
4. Боровков Д.А., Буреца Г.А., Денисов Р.Н. и др. Вакуумно-криогенный стенд // Патент РФ № RU2591737C2. Бюл. 2016. № 20.
5. Дмитриев И.Ю., Котмакова А.А., Резунков Ю.А. Метод расчета термостата для наземных испытаний инфракрасных оптико-электронных систем // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 2. С. 223–231. <https://doi.org/10.21883/000000000000>
6. Дмитриев И.Ю., Котмакова А.А., Резунков Ю.А. Термооптика коллиматора, радиационно охлаждаемого в вакуумных условиях // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 4. С. 23–33. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-04-23-33>
7. Завацкая А.В., Резунков Ю.А. Метод теплового баланса для расчета режимов охлаждения крупногабаритной оптики в вакуумных условиях //

## REFERENCES

1. Oleinikov L.Sh. Cryooptical systems [in Russian]. St. Petersburg: IPK KOSTA Publ., 2013. 352 p.
2. Hayes A.G., Downs G., Gabrielson A., et al. The seeker experimental system at MIT Lincoln laboratory // Proc. SPIE. 2006. V. 6208. P. 620809-1–620809-11. <https://doi.org/10.1117/12.663801>
3. Gektin Y.M., Zorin S.M., Trofimov D.O., et al. Cryo-vacuum setup // RF Patent № RU2678923C1. Bull. 2019. № 4.
4. Borovkov D.A., Burets G.A., Denisov R.N., et al. Cryo-vacuum facility // RF Patent № RU2591737C2. Bull. 2016. № 20.
5. Dmitriev I.Y., Kotmakova A.A., Rezunkov Y.A. Computing method for designing a thermostat for laboratory tests of infrared optoelectronic systems // Tech. Phys. 2021. V. 66. № 2. P. 201–209. <https://doi.org/10.1134/S1063784221020092>
6. Dmitriev I.Y., Kotmakova A.A., Rezunkov Y.A. Thermal optics of a collimator radiatively cooled under vacuum // J. Opt. Technol. 2022. V. 89. № 4. P. 205–212. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000205>
7. Zavatskaya A.V., Rezunkov Y.A. Heat balance method of computing the cooling modes of large-sized optics in vacuum // Tech. Phys. 2023. V. 93. № 5. P. 566–573. <https://doi.org/10.21883/TP.2023.05.56061.253-22>

- ЖТФ. 2023. Т. 93. № 5. С. 607–614. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.05.55454.253-22>
8. Дзитоев А.М., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Термоабберация внеосевого зеркала, вызванная температурным перепадом по его толщине // Оптический журнал. 2017. Т. 54. № 8. С. 47–53.
  9. Дзитоев А.М., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Возможности повышения термостабильности приемного зеркала телескопа за счет управления условиями теплообмена на его тыльной поверхности // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 12. С. 35–41. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-12-35-41>
  10. Баева Ю.В., Ханков С.И. Влияние интенсивности теплоотдачи с поверхностей параболического зеркала на его термоабберацию положения изображения // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2014. № 2. С. 103–110.
  11. Абдусаматов Х.И., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Методы обеспечения термостабильности космического телескопа солнечного лимбографа. СПб.: изд. Политехн. ун-та, 2008. 194 с.
  12. Андрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. М.: Энергия, 1972. 464 с.
  13. Полак Л.С. Вариационные принципы механики: их развитие и применение в физике. М.: ЛИБРОКОН, 2017. 599 с.
  14. Ортега Дж., Рейнболт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными / пер. с англ. Вершкова Э.В. и др. под ред. Коновальцева И.В. М.: Мир, 1975. 558 с.
  15. ГОСТ Р 58566-2019. Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы исследования. Дата внедрения 2020.09.01.
  16. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 221 с.
  8. Dzitoev M., Lapovok E.V., Khankov S.I. Thermal aberration of an off-axis mirror caused by temperature dropoff over its thickness // J. Opt. Technol. 2017. V. 84. № 8. P. 542–547. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000542>
  9. Dzitoev M., Lapovok E.V., Khankov S.I. Possibilities for increasing the thermal stability of the receiving mirror of a telescope by controlling the conditions of the heat transfer on its back surface // J. Opt. Technol. 2018. V. 85 № 12. P. 768–773. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000768>
  10. Baeva Y.V., Khankov S.I. Influence of heat transfer intensity from parabolic mirror surface on image position thermoaberration [in Russian] // Radio Electronics Issues. Ser. Television Engineering. 2014. № 2. P. 103–110.
  11. Abdusamatov K.I., Lapovok E.V., Khankov S.I. Thermostability method for space telescope of solar limbograph [in Russian]. St. Petersburg: Politechnical Univ. Publ., 2008. 194 p.
  12. Andrianov V.N. Radiative and complex heat transfer principles [in Russian]. Moscow: "Energia" Publ., 1972. 464 p.
  13. Polak L.S. Variational principals of mechanics: development and application in physics [in Russian]. Moscow: "LIBROKON" Publ., 2017. 599 p.
  14. Ortega J.M., Rheinboldt W.C. Iterative solution of equations in several variables. N.Y. and London: ACADEMIC Press., 1970.
  15. GOST R (Russian National Standard) 58566-2019. Optics and Photonics. Lenses for optical electronic systems. Test methods. Date of implementation 2020.09.01.
  16. Sokolsky M.N. Tolerance and quality of optical image [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1989. 221 p.

## АВТОРЫ

**Игорь Юрьевич Дмитриев** — доктор технических наук, начальник отдела, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор, Ленинградская область, 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>; [dmitrieviy@nioep.ru](mailto:dmitrieviy@nioep.ru)

**Анна Вячеславовна Завацкая** — младший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор, Ленинградская область, 188540, Россия; <https://orcid.org/0009-0002-2763-7469>; [anny-z@yandex.ru](mailto:anny-z@yandex.ru)

**Павел Михайлович Линский** — начальник лаборатории, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор, Ленинградская область, 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-9133-6719>; [nnv19@mail.ru](mailto:nnv19@mail.ru)

**Владимир Сабитович Сиразетдинов** — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор, Ленинградская область, 188540, Россия; Scopus ID 6701424147; <https://orcid.org/0000-0002-0133-5182>; [v.sirazet@mail.ru](mailto:v.sirazet@mail.ru)

## AUTHORS

**Igor Yu. Dmitriev** — Dr. Sci. (Engineering), Head of Department, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>; [dmitrieviy@nioep.ru](mailto:dmitrieviy@nioep.ru)

**Anna V. Zavatskaya** — Junior Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0009-0002-2763-7469>; [anny-z@yandex.ru](mailto:anny-z@yandex.ru)

**Pavel M. Linsky** — Head of Laboratory, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-9133-6719>; [nnv19@mail.ru](mailto:nnv19@mail.ru)

**Vladimir S. Sirazetdinov** — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; Scopus ID: 6701424147; <https://orcid.org/0000-0002-0133-5182>; [v.sirazet@mail.ru](mailto:v.sirazet@mail.ru)