

## Метод теплового баланса для расчета режимов охлаждения крупногабаритной оптики в вакуумных условиях

© А.В. Завацкая, Ю.А. Резунков

АО „Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения“,  
188540 Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия  
e-mail: anny-z@yandex.ru

Поступило в Редакцию 24 ноября 2022 г.  
В окончательной рецензии 7 февраля 2023 г.  
Принято к публикации 14 февраля 2023 г.

Разработан метод теплового баланса для оптимизации режимов охлаждения крупногабаритной оптики в вакуумных условиях с использованием специальных криовакуумных систем и с учетом сложного теплообмена между составными частями системы, обеспечивая при этом минимальные термодформации оптики.

**Ключевые слова:** теплообмен излучением, кондуктивный теплообмен, тепловой баланс, термостат, коллиматор.

DOI: 10.21883/JTF.2023.05.55454.253-22

### Введение

Необходимым этапом разработки перспективной инфракрасной оптико-электронной аппаратуры (ИК ОЭА) является тестирование ее пространственного и энергетического разрешения в вакуумных условиях. Испытания ИК ОЭА проводятся при низком температурном фоне за счет охлаждения оптического оборудования, входящего в состав термовакуумного стенда [1–3]. Важным элементом этого оборудования является оптический коллиматор, согласующий поля зрения испытываемого прибора и испытательного оборудования. При охлаждении коллиматора от комнатных до криогенных температур необходимо исключить возможность возникновения термодформаций его элементов, влияющих на оптическое качество (юстировку) коллиматора. В [4] было предложено проводить охлаждение коллиматора за счет теплообмена излучением оптических элементов со специальными криогенными экранами, устанавливаемыми в вакуумной камере испытательного стенда. При этом для расчета режимов охлаждения использовался метод теплового баланса, обеспечиваемого в стационарном состоянии радиационным теплообменом крупногабаритной оптики с термостатом.

Расчет сложного теплообмена излучением внутри замкнутой теплофизической системы, состоящей из отдельных элементов с различными физическими характеристиками, может быть проведен в ПК ANSYS [5]. При этом находится стационарное решение нестационарных уравнений теплопроводности для каждого элемента системы с граничными условиями, составленными по методу теплового сальдо [6]. В методе сальдо — это уравнения, связывающие результирующий поток излучения и температуру каждой поверхности с тепловыми потоками от остальных поверхностей. В общем виде

уравнение теплового баланса для  $k$ -й поверхности имеет следующий вид:

$$\sum_{j=1}^N \left( \delta_{kj} - \varphi_{kj} \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \right) \frac{Q_j}{F_j} = \sum_{j=1}^N (\delta_{kj} - \varphi_{kj}) \sigma T_j^4, \quad (1)$$

где  $Q_j$  — результирующий тепловой поток с поверхности  $j$ ;  $T_j$  — температура  $j$ -й поверхности;  $F_j$  — площадь  $j$ -й поверхности;  $\varepsilon_j$  — степень черноты поверхности;  $\varphi_{kj}$  — угловой коэффициент теплообмена между поверхностями  $k$  и  $j$ ;  $\sigma_0$  — постоянная Стефана–Больцмана,  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ;  $\sigma_{kj}$  — символ Кронекера. Индекс  $k$  соответствует выбранной поверхности, а индекс  $j$  — остальным поверхностям замкнутой области.

Однако последовательное решение нестационарных уравнений при необходимости построения сложных расчетных сеток приводит к значительному увеличению времени счета в ПК ANSYS. И тем не менее полученное решение зависит как от корректности сформулированной теплофизической модели процесса охлаждения, так и от точности вычисления угловых коэффициентов теплообмена излучением.

В настоящей работе рассматривается обобщение предложенного нами ранее метода теплового баланса на случай теплового равновесия внутри замкнутой системы „главное зеркало коллиматора (ГЗК)–термостат–вакуумная камера“, когда учитывается как теплообмен излучением, так кондуктивный теплообмен, обусловленный теплопроводностью материалов охлаждаемых элементов.

В предлагаемом методе кондуктивный теплообмен учитывается без привлечения нестационарных уравнений теплопроводности. Это сокращает время счета и позволяет относительно быстро оптимизировать как

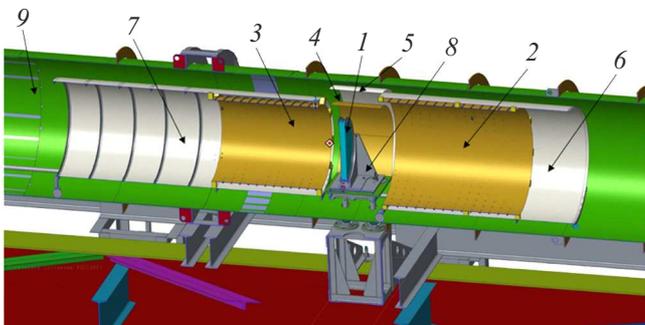
структуру термостата, так и режимы охлаждения оптики, зависящие от многих структурных и теплофизических параметров элементов, входящих в теплофизическую систему. Для решения формируемой в таком случае системы нелинейных алгебраических уравнений теплового баланса используется метод последовательных приближений, аналогичный методу Ньютона и реализованный в программе Mathcad.

Метод теплового баланса позволяет также оценить температурные градиенты в элементах крупногабаритной оптики при их охлаждении в термовакуумных условиях. Оптимальным считается такой режим охлаждения, при котором обеспечиваются минимальные температурные градиенты в оптических элементах, определяемые требованием сохранения оптического качества коллиматора.

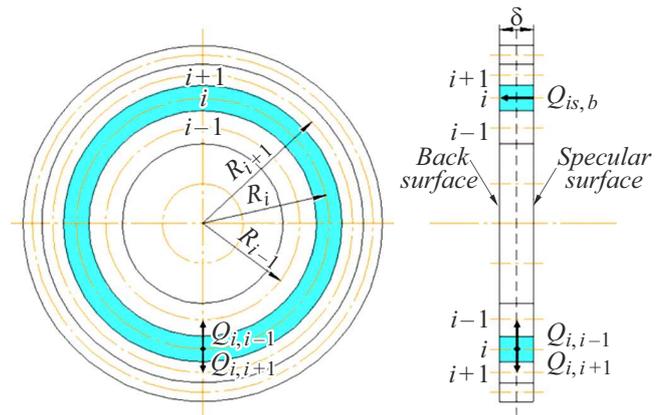
Сходимость метода контролируется по исходным уравнениям теплового баланса, когда в них подставляются значения температуры, полученные на каждом шаге итерации. С точностью до  $10^{-8}$  W условия теплового баланса каждого элемента соблюдались.

## 1. Теплофизическая модель термовакуумной системы охлаждения и температурной стабилизации типа термостат

Разработанная структура системы охлаждения крупногабаритной оптики в вакуумных условиях — термостат, представлена на рис. 1 [4]. Его конструкция представляет собой набор криоэкранов (т.е. специальных экранов, охлаждаемых внешней криосистемой) и теплозащитных экранов, совместно расположенных внутри цилиндрической вакуумной камеры. В силу особенностей построения оптических систем коллиматора и условий тестирования ИК ОЭА необходимо сохранять свободным пространственный объем в пределах углового поля зрения коллиматора и испытываемой аппаратуры. Это достигается применением криоэкранов и теплозащитных экранов цилиндрической формы.



**Рис. 1.** Структурная схема термостата, совмещенная с ГЗК: 1 — главное зеркало коллиматора, 2, 3 — цилиндрические криоэкраны, 4–7 — теплозащитные экраны, 8 — подставка под зеркало, 9 — стенки вакуумной камеры.



**Рис. 2.** Схема расчета кондуктивного теплообмена локальных зон в осевом и радиальном направлениях по зеркалу.

В термостате можно выделить три группы теплофизических объектов, а именно:

- тепловые источники, т.е. стенки вакуумной камеры 9, и стоки, т.е. криоэкраны 2, 3 с индивидуальным охлаждением;
- теплозащитные металлические экраны 4–7 с экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ);
- охлаждаемые элементы коллиматора (в данном случае главное зеркало коллиматора 1 и подставка 8).

Охлаждение ГЗК до заданной температуры  $T_1$  осуществляется за счет теплообмена излучением между зеркалом и цилиндрическими криоэкранами с двух сторон с независимым управлением их температурой ( $T_2$ ,  $T_3$ ). Геометрические размеры криоэкранов выбираются из условия обеспечения максимальной эффективности теплообмена между зеркалом и экранами. Температура стенок вакуумной камеры  $T_9$  считается постоянной и равной температуре окружающего воздуха.

В силу конструктивных особенностей теплообмен излучением между частями термостата (слева и справа от ГЗК), разделенными зеркалом, сильно ограничен. Поэтому тепловой баланс внутри термостата будет также зависеть и от кондуктивного теплообмена между соответствующими поверхностями ГЗК. Тыльная и зеркальная поверхности зеркала имеют разные степени черноты, что приводит к асимметрии эффективности теплообмена зеркала с криоэкранами. Следует также иметь в виду, что отдельные элементы, например зеркало и подставка под ним, находятся в непосредственном тепловом контакте, что приводит к необходимости учета дополнительного теплового потока между этими элементами. Следует также отметить, что часть теплового потока от стенок вакуумной камеры, расположенных вне теплозащитных экранов, попадает на зеркало.

Для расчета радиального распределения температуры в ГЗК зеркало условно разбивается на несколько осесимметричных радиальных зон (рис. 2), для каждой из которых записывается уравнение теплового баланса с соответствующими угловыми коэффициентами лучи-

стого теплообмена. Мы рассматриваем установившийся режим теплового баланса со стационарным распределением температуры в каждом элементе. Для охлаждаемого зеркала, которое можно рассматривать как плоскую пластину с малым отношением толщины к диаметру, это распределение носит линейный характер от одной поверхности (тыльной) до другой (зеркальной), так как внутри зеркала нет дополнительных тепловых источников. Также линейный характер носит и распределение температуры в кольцевой радиальной зоне, на которую разбивается зеркало по его радиусу. Тепловой поток между соседними поверхностями каждой зоны возникает за счет теплопроводности материала зеркала и влияет на условия теплового баланса каждой зоны.

Для внешней (торцевой) поверхности зеркала задаются условия теплообмена излучением с теплозащитным экраном, расположенным вокруг зеркала.

Ниже в качестве примера приведено уравнение теплового баланса для зеркальной поверхности  $i$ -й зоны ГЗК в общем виде:

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

где  $\varepsilon_{ij}$  — приведенная степень черноты между поверхностями взаимодействующих элементов;  $\sigma_0$  — постоянная Стефана–Больцмана,  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ;  $\varphi_{ij}$  — угловой коэффициент излучения между поверхностями;  $F_i$  — площадь поверхности  $i$ -го элемента ГЗК;  $F_{i\text{ext}}$  — площадь внешней торцевой поверхности  $i$ -го элемента ГЗК;  $F_{i\text{int}}$  — площадь внутренней торцевой поверхности  $i$ -го элемента ГЗК;  $\lambda_i$  — приведенный коэффициент теплопроводности материала ГЗК;  $\delta_i$  — толщина  $i$ -го элемента;  $T_{i,s}$  — температура зеркальной поверхности  $i$ -й радиальной зоны ГЗК;  $T_{i,b}$  — температура тыльной поверхности  $i$ -й радиальной зоны ГЗК;  $T_{i+1,s}$  — температура зеркальной поверхности  $i + 1$ -й радиальной зоны ГЗК;  $T_{i+1,b}$  — температура тыльной поверхности  $i + 1$ -й радиальной зоны ГЗК;  $T_{i-1,s}$  — температура зеркальной поверхности  $i - 1$ -й радиальной зоны ГЗК;  $T_{i-1,b}$  — температура тыльной поверхности  $i - 1$ -й радиальной зоны ГЗК.

Приведенная степень черноты определяется через угловые коэффициенты следующим образом [7]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{1 + \varphi_{ij} \left( \frac{1}{\varepsilon_i} - 1 \right) + \varphi_{ji} \left( \frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right)}, \quad \varphi_{ji} = \frac{F_i}{F_j} \varphi_{ij}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_i$  и  $\varepsilon_j$  — степени черноты двух взаимодействующих поверхностей.

Аналогичным образом записываются уравнения теплового баланса для поверхностей каждого  $i$ -го элемента системы „ГЗК–термостат–вакуумная камера“, которые участвуют в теплообмене излучением с поверхностями элементов этой секции, а также в кондуктивном теплообмене между собой.

## 2. Метод расчета температурных параметров в условиях теплового баланса системы „ГЗК–термостат–вакуумная камера“

Условия теплового баланса системы „ГЗК–термостат–вакуумная камера“ описываются системой нелинейных алгебраических уравнений на основе (2) и (3) относительно неизвестных температурных параметров охлаждаемых элементов оптики и теплозащитных экранов. Управление режимами охлаждения осуществляется с помощью криоэкранов, температурные параметры которых также входят в эти уравнения. Расчет режима охлаждения ГЗК сводится к нахождению таких значений температуры криоэкранов, при которых зеркало охлаждается до заданной температуры. Оптимальным считается такой режим, который обеспечивает минимальные температурные градиенты в оптических элементах, возникающие при охлаждении.

Для решения полученной системы нелинейных алгебраических уравнений используется метод последовательных приближений с предварительным преобразованием неизвестных температурных параметров к виду вариаций относительно значений температуры криоэкранов. Эти преобразования для каждой отдельной части термостата выглядят следующим образом:  $\delta T_i = T_i - T_2$  для правой части термостата и  $\delta T_j = T_j - T_3$  для левой части. Соответственно преобразуются как радиационные (4), т. е. обусловленные теплообменом излучением, так и кондуктивные (5) слагаемые:

$$T_i^4 - T_j^4 = (T_i - T_j)(T_i + T_j)(T_i^2 + T_j^2) = (\delta T_i - \delta T_j)(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j), \quad (4)$$

$$\frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{ik} - T_{i,k+1}) = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (\delta T_{i,k} - \delta T_{i,k+1} + \Delta T_{2,3}). \quad (5)$$

Тогда, преобразовав уравнение (2) к линейному виду относительно вариаций  $T_i$ , получим

$$(P_i + J_i + Q_i + R_i + S_i) \delta T_{i,s} + Q_i \delta T_{i+1,s} + R_i \delta T_{i-1,s} + (Q_i - J_i + R_i) \delta T_{i,b} + Q_i \delta T_{i+1,b} + R_i \delta T_{i-1,b} - P_i \delta T_j = S_i \Delta T_{92} - J_i \Delta T_{23}, \quad (6)$$

где

$$P_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \varepsilon_{ij} \sigma_0 \phi_{ij} F_i (T_i + T_j) (T_i^2 + T_j^2), \quad J_i = \frac{\lambda_i}{\delta_i} F_i,$$

$$Q_i = \frac{\lambda_i}{2(r_{i+1} - R_i)} F_{i\text{ext}}, \quad R_i = \frac{\lambda_i}{2(R_i - R_{i-1})} F_{i\text{int}},$$

$$S_i = \varepsilon_{i9} \sigma_0 \phi_{i9} F_i (T_i + T_9) (T_i^2 + T_9^2)$$

являются коэффициентами теплоотдачи теплообмена излучением и кондуктивного теплообмена, имеют размерность [W/K]. А  $\delta T_{i,s} = T_{i,s} - T_2$ ,  $\delta T_{i+1,s} = T_{i+1,s} - T_2$ ,  $\delta T_{i-1,s} = T_{i-1,s} - T_2$ ,  $\delta T_j = T_j - T_2$ ,  $\delta T_{i,b} = T_{i,b} - T_3$ ,  $\delta T_{i+1,b} = T_{i+1,b} - T_3$ ,  $\delta T_{i-1,b} = T_{i-1,b} - T_3$ ,  $\Delta T_{23} = T_2 - T_3$ ,  $\Delta T_{92} = T_9 - T_2$  — вариации температур элементов термовакuumной системы относительно температур криоэкранов с размерностью [K].

При этом в преобразованных уравнениях появляются дополнительные слагаемые с  $\Delta T_{23} = T_2 - T_3$ ,  $\Delta T_{92} = T_9 - T_2$ . Для тыльной поверхности в последнем слагаемом вместо  $\Delta T_{92}$  появляется  $\Delta T_{93} = T_9 - T_3$ . Разница значений температуры криоэкранов, а также температуры этих экранов с температурой стенок вакуумной камеры и определяют конечные условия теплового баланса в термостате.

Аналогичным образом записываются уравнения и для остальных элементов термостата. В каждом уравнении типа (6) имеются слагаемые, зависящие как от температуры конкретных элементов, участвующих в теплообмене, так и от их теплофизических характеристик, а именно от степени черноты поверхности и теплопроводности материала элементов.

Следует отметить, что уравнения (6) выражают тепловое равновесие рассматриваемой системы охлаждения на основе общих дифференциальных принципов изменения температуры ее составных элементов относительно заданных температурных параметров криоэкранов [8]. Выбор оптимального режима охлаждения зеркала, когда градиенты температуры в нем находятся в пределах допуска, задаваемого требованиями к оптической системе коллиматора, осуществляется по номограммам изотерм теплового состояния ГЗК, составленных в виде функций температуры зеркала  $T_2$  и градиентов температуры в нем от  $T_2$  и  $T_3$ .

Полученная система уравнений решается известным методом Гаусса относительно  $\delta T$  в среде MathCAD с соблюдением условий сходимости этого метода. Сходимость метода последовательных приближений задается необходимым условием, чтобы главный определитель матрицы коэффициентов системы уравнений типа (6) не был равен нулю. В качестве условия окончания итераций в вычислениях используется правило  $T_i^n - T_i^{n-1} \leq \xi$ . Здесь  $n$  — номер итерации,  $\xi$  — погрешность вычислений. В расчетах задавалось  $\varepsilon = 10^{-5}$ . Проверка полученного решения осуществлялась с использованием

исходных уравнений (2) после подстановки в них полученных значений температуры всех элементов. При этом величина теплового дисбаланса в каждом уравнении не превышала  $10^{-8}$  W.

### 3. Режимы охлаждения крупногабаритной оптики (главного зеркала коллиматора) в термостате

Важными параметрами в уравнениях (2) являются угловые коэффициенты теплообмена излучением  $\phi_{ij}$  между элементами системы „ГЗК—термостат—вакуумная камера“. Для расчета конкретных значений  $\phi_{ij}$  между поверхностями различной формы (например, зеркала и цилиндрического экрана) использовался алгебраический метод [6], позволяющий обобщать аналитические выражения простых частных случаев на более сложные конфигурации взаимодействующих поверхностей.

Расчет угловых коэффициентов теплообмена излучением с использованием алгебры угловых коэффициентов позволяет значительно упростить анализ результатов тепловых расчетов по оптимизации системы охлаждения. Величина угловых коэффициентов помимо того, что определяет точность результатов теплового расчета, дает также возможность оценить взаимное влияние элементов системы друг на друга, на тепловой баланс, на среднюю температуру охлаждаемого элемента и градиенты температуры в нем.

Для примера рассмотрим теплообмен излучением между двумя конечными поверхностями  $F_i$  и  $F_m$ , где  $F_i$  — диск,  $F_m$  — внутренняя поверхность цилиндра (рис. 3), которые обозначают поверхности ГЗК и внутренней поверхности стенок вакуумной камеры. В рассматриваемой нами теплофизической модели все поверхности элементов в замкнутой системе „ГЗК—термостат—вакуумная камера“ считаются диффузно-серыми.

Используя алгебру угловых коэффициентов излучения, запишем

$$\phi_{m,i} = \phi_{m,i+j} - \phi_{m,j}.$$

Для определения  $\phi_{m,i+j}$  и  $\phi_{m,j}$  можно воспользоваться расчетной формулой углового коэффициента между

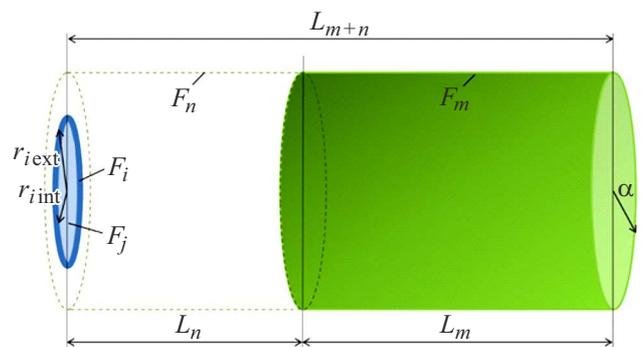


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая применение алгебраического метода определения углового коэффициента  $\phi_{m,i}$ .

внутренней поверхностью прямого цилиндра и диска в его основании [9]. Для этого продлим поверхность  $m$  до пересечения с плоскостью поверхности  $i$ . Получим дополнительную условную поверхность  $n$ .

На основании алгебры угловых коэффициентов справедливо [6]:

$$F_{m+n} = F_m + F_n \quad \text{и} \quad F_{i+j} = F_i + F_j,$$

$$F_{m+n}\varphi = F_m\varphi_{m,j} + F_n\varphi_{n,j},$$

$$F_{m+n}\varphi_{m+n,i+j} = F_m\varphi_{m,i+j} + F_n\varphi_{n,i+j},$$

где  $F_{m+n}$  — суммарная площадь поверхностей  $m$  и  $n$ ,  $F_n$  — площадь мнимой цилиндрической поверхности  $n$ ,  $F_i$  — площадь поверхности кольца.

Тогда

$$\varphi_{m,i+j} = \frac{F_{m+n}\varphi_{m+n,i+j} - F_n\varphi_{n,i+j}}{F_m},$$

$$\varphi_{m,j} = \frac{F_{m+n}\varphi_{m+n,j} - F_n\varphi_{n,j}}{F_m}.$$

После ряда преобразований для искомого коэффициента  $\varphi_{m,i}$  имеем

$$\varphi_{m,i} = \frac{F_{m+n} \left[ \sqrt{L_{m+n}^4 + 2L_{m+n}^2(a^2 + r_{iext}^2) + (a^2 - r_{iext}^2)^2} - (a^2 - r_{iext}^2) - L_{m+n}^2 \right]}{4aL_{m+n}F_m} - \frac{F_n \left[ \sqrt{L_n^4 + 2L_n^2(a^2 + r_{iext}^2) + (a^2 - r_{iext}^2)^2} - (a^2 - r_{iext}^2) - L_n^2 \right]}{4aL_nF_m} - \frac{F_{m+n} \left[ \sqrt{L_{m+n}^4 + 2L_{m+n}^2(a^2 + r_{iint}^2) - (a^2 - r_{iint}^2) - L_{m+n}^2} \right]}{4aL_{m+n}F_m} - \frac{\left[ \sqrt{L_n^4 + 2L_n^2(a^2 + r_{iint}^2)^2 - (a^2 - r_{iint}^2)^2 - (a^2 - r_{iint}^2) - L_n^2} \right]}{4aL_nF_m}, \quad (7)$$

где  $L_{m+n}$  — высота цилиндра  $F_{m+n}$ ,  $a$  — радиус цилиндра  $F_{m+n}$ ,  $r_{iext}$  — радиус диска  $F_{i+j}$ ,  $L_n$  — высота цилиндра  $F_n$ ,  $r_{iint}$  — радиус диска  $F_j$ .

конкретных значений осевых и радиальных перепадов температуры в зеркале.

На рис. 4 приведено решение системы уравнений (6) в виде зависимости температуры зеркальной поверхности ГЗК коллиматора от температуры криоэкранов ( $T_2$  и  $T_3$ ) для параметров термостата, указанных в [4]. Из рисунка следует, что требуемого значения температуры ГЗК можно достичь при разных комбинациях значений температуры криоэкранов. В силу асимметрии структуры термостата относительно ГЗК и степени черноты поверхностей зеркала наблюдается соответствующая асимметрия распределения температуры, что приводит к возникновению осевых градиентов температуры в зеркале.

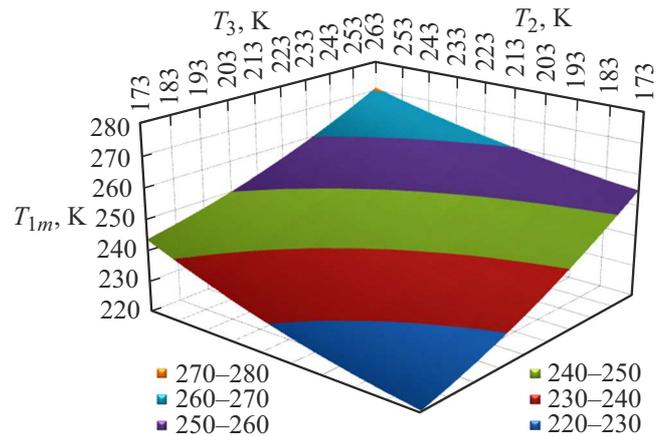


Рис. 4. Зависимость температуры центральной зоны зеркальной поверхности ГЗК  $T_{1m}$  от температуры криоэкранов  $T_2$  и  $T_3$ .

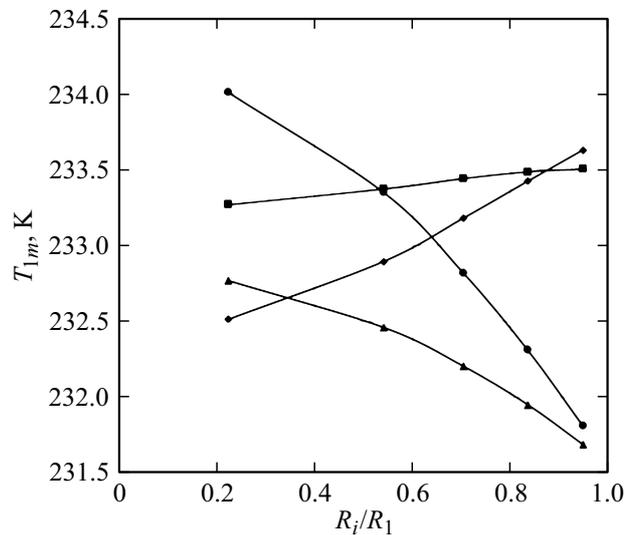


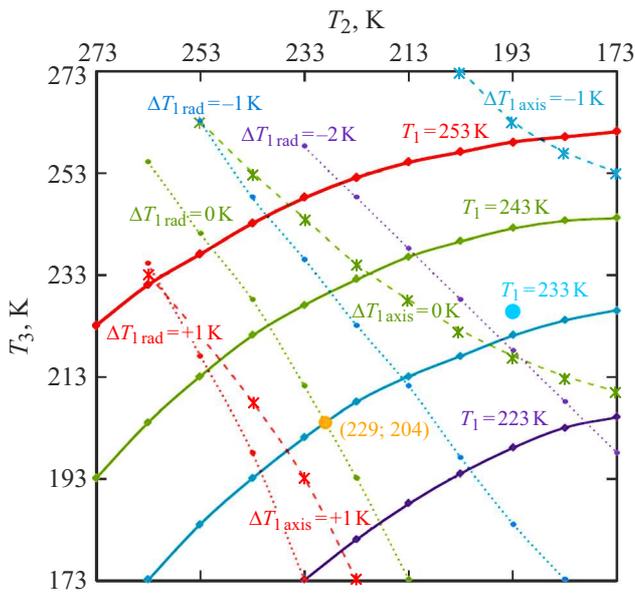
Рис. 5. Радиальное распределение температуры по зеркальной поверхности ГЗК при разных значениях температуры криоэкранов: —◆—  $T_2 = 243$  К,  $T_3 = 193$  К; —▲—  $T_2 = 210$  К,  $T_3 = 210$  К; —■—  $T_2 = 233$  К,  $T_3 = 203$  К; —●—  $T_2 = 193$  К,  $T_3 = 223$  К.

На рис. 5 приведены графики изменения температуры по радиусу зеркальной поверхности ГЗК, охлажденного до температуры  $T_{1m} = 233$  К, при разных значениях температуры криоэкранов  $T_2$  и  $T_3$ . Видим, что радиальное распределение температуры в зеркале меняется в зависимости от комбинации значений температуры криоэкранов. По результатам расчетов можно определить такие значения температуры  $T_2$  и  $T_3$ , при которых радиальный перепад температуры по зеркалу будет минимальным.

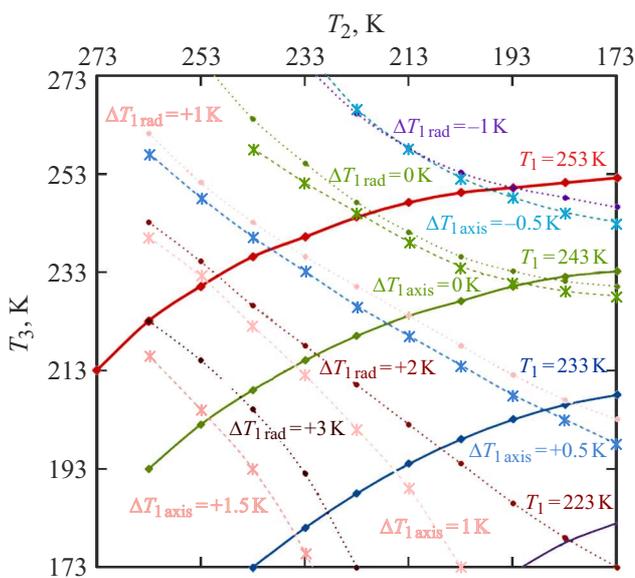
В частности, из результатов тепловых расчетов следует, что температуры экрана 4 и подставки 8 определяют радиальный перепад температуры в зеркале. Чем больше разница между ними и температурой ГЗК, т.е.  $\Delta T_{8-1}$ ,  $\Delta T_{4-1}$ , тем больше радиальный перепад температуры в

зеркале. Тенденция изменения температуры от центра к краю ГЗК также зависит от разницы температуры зеркала и экрана 4. При  $T_4 < T_1$ ,  $T_1$  от центра к краю понижается, при  $T_4 > T_1$  — повышается.

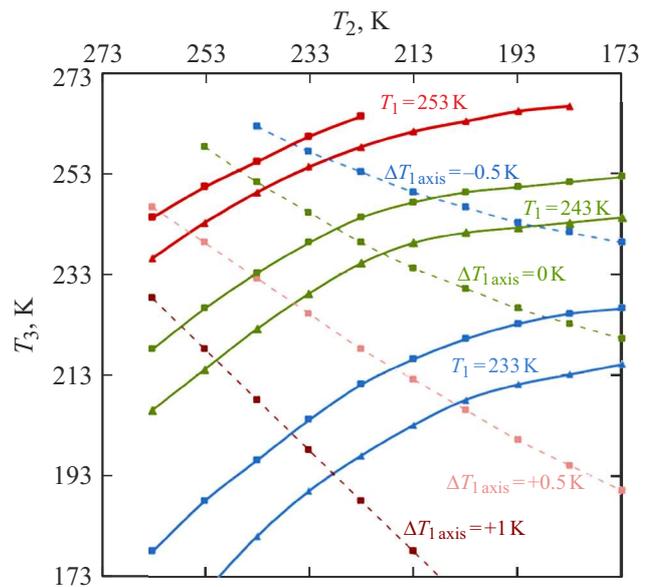
Для определения оптимальных режимов охлаждения результаты расчетов представляются в виде номограмм изотерм ГЗК, а также постоянных значений перепадов осевых и/или радиальных распределений температуры в нем (рис. 6, 7). На рис. 6 приведена номограмма температурных параметров зеркала при степени черно-



**Рис. 6.** Номограмма распределения изотерм температурного состояния ГЗК в зависимости от температуры криоэкранов при  $\epsilon_4 = 0.57$ .



**Рис. 7.** Номограмма распределения изотерм температурного состояния ГЗК в зависимости от температуры криоэкранов в отсутствие ЭВТИ на криоэкранах и при  $\epsilon_4 = 0.1$ .



**Рис. 8.** Номограмма структуры термостата без ЭВТИ при  $\epsilon_4 = 0.57$ :  $\blacktriangle$  —  $T_8 = 223$  К,  $\blacksquare$  —  $T_8 = 203$  К.

ты теплозащитного экрана над ним  $\epsilon_4 = 0.57$ , соответствующая степени черноты поверхности медного листа. Здесь же на рисунке в виде локального значка (голубой кружок (в онлайн версии)) приведен результат расчета этой же структуры термостата в [4]. Отметим, что полученный ранее результат совпадает с более полной картиной расчета теплового состояния системы ГЗК, но с точностью до

Из номограммы рис. 6 следует также, что охлаждение ГЗК до конкретной температуры может быть обеспечено только в определенном диапазоне изменений температуры криоэкранов. Однако в этом диапазоне будут меняться градиенты температуры как по оси зеркала ( $\Delta T_{axis}$ ), так и по его радиусу ( $\Delta T_{rad}$ ). Поэтому оптимальным режимом охлаждения зеркала выбирается такой режим, при котором эти градиенты минимальны. В частности, для температуры  $T_1 = 233$  К (рис. 6) этому условию соответствуют  $T_2 = 229$  К и  $T_3 = 204$  К, т.е. нулевому радиальному перепаду температуры при осевом перепаде менее 1 К.

Очевидно, что изменение структуры термостата приведет и к изменению режимов охлаждения ГЗК (рис. 7). Так, в отсутствие ЭВТИ и при степени черноты экрана 4  $\epsilon_4 = 0.1$  требуемые значения температуры криоэкранов значительно снижаются, чтобы обеспечить условие теплового баланса при  $T_1 = 233$  К, а именно  $T_3$  снижается с 213 до 194 К при постоянной  $T_2 = 213$  К. При этом возрастают как осевые, так и радиальные перепады температуры в зеркале до 1–2 К.

Приведенные номограммы иллюстрируют возможности разработанного метода расчета режимов охлаждения крупногабаритной оптики в вакуумных условиях с использованием различных структур термостат.

**Таблица 1.** Условия оптимального теплового баланса системы при режимах охлаждения ГЗК до температуры  $T_1 = 233$  К

Вариант структуры	ЭВТИ	$\varepsilon_4$	$T_2, \text{К}$	$T_3, \text{К}$	$\Delta T_{\text{axis}}, \text{К}$	$\Delta T_{\text{rad}}, \text{К}$	$T_1 - T_4, \text{К}$
1	+	0.1	197	209	0.4	0	0.5
2	-	0.1	173	187	1.1	4.2	-18.2
3	+	0.57	229	204	0.8	0	-0.3
4	-	0.57	193	203	0.5	1.2	-4.7

**Таблица 2.** Условия теплового баланса системы при режимах охлаждения ГЗК до температуры  $T_1 = 233$  К без охлаждения и с дополнительным охлаждением подставки

Вариант конструкции	Температура подставки $T_8, \text{К}$	$\varepsilon_4$	$T_2, \text{К}$	$T_3, \text{К}$	$\Delta T_{\text{axis}}, \text{К}$	$T_1 - T_4, \text{К}$
1	230.4*	0.1	-90	-90	1.0	-17.3
2	231.5*	0.57	-80	-69	0.5	-3.5
3	223**	0.1	-100	-58	0	1.2
4	223**	0.57	-60	-70	0.8	-4.5
5	203**	0.1	-80	-50	0	0.5
6	203**	0.57	-60	-60	0.5	-1.1

Примечание.\* — температура подставки в условиях теплового равновесия в системе; \*\* — заданная температура подставки.

Влияние наличия ЭВТИ на экране 4 и степени черноты его внутренней поверхности на радиальный перепад температуры в ГЗК иллюстрируют результаты анализа номограмм, приведенные в табл. 1 для случая охлаждения ГЗК до  $T_1 = 233$  К.

Из табл. 1 видно, что при наличии ЭВТИ и  $\varepsilon_4 = 0.1$  (вариант 1) разница между температурами экрана 4 и зеркала незначительна и составляет  $T_1 - T_4 = 0.5$  К, что обеспечивает практически отсутствие радиального перепада температуры в зеркале. В этом случае температура зеркала выше температуры экрана 4, так как тепловой поток от стенок вакуумной камеры 9 ограничен ЭВТИ с высоким тепловым сопротивлением, а экран 4 активно охлаждается криоэкранами. Степень черноты  $\varepsilon_4 = 0.1$  при наличии ЭВТИ способствует минимальной разнице температур экрана 4 и зеркала.

При отсутствии ЭВТИ и  $\varepsilon_4 = 0.1$  (вариант 2) разница  $T_1 - T_4 = -18.2$  К, температура экрана 4 выше температуры ГЗК, так как тепловой поток от стенок вакуумной камеры 9 увеличился по сравнению с вариантом 1, где присутствует ЭВТИ на экране 4. При этом радиальный перепад в зеркале более 4 К.

При более высокой степени черноты внутренней поверхности экрана 4  $\varepsilon_4 = 0.57$  (вариант 3) и наличии ЭВТИ в условиях теплового баланса системы  $T_1 - T_4 = -0.3$  К, что соответствует нулевому радиальному перепаду температуры в зеркале. Температура зеркала в данном случае немного ниже температуры экрана 4, так как, имея более высокую степень черноты по сравнению с вариантом 2, внутренняя поверхность экрана 4 сильнее охлаждается криоэкранами.

В отсутствие ЭВТИ при той же степени черноты внутренней поверхности экрана 4  $\varepsilon_4 = 0.57$  (вариант 4) разница между температурами зеркала и экрана 4 со-

ставляет  $T_1 - T_4 = -4.7$  К. Температура экрана 4 выше по сравнению с вариантом 3, так как тепловой поток от стенок камеры 9 через экран 5 возрос из-за отсутствия ЭВТИ.

Важно отметить, что в отсутствие ЭВТИ обеспечить температуру зеркала 233 К возможно, задав более низкие значения температуры криоэкранов, чем в структуре термостата с наличием ЭВТИ. Влияние степени черноты экрана 4 меняется в зависимости от наличия или отсутствия ЭВТИ. При наличии ЭВТИ предпочтительнее  $\varepsilon_4 = 0.57$ , так как радиальный перепад температуры в зеркале в этом случае меньше и температура криоэкранов выше. При отсутствии ЭВТИ предпочтительнее выбрать  $\varepsilon_4 = 0.1$  по той же причине.

При расчете всех вариантов структуры термостата, значения осевых перепадов температуры в ГЗК находились в пределах допуска. Следует также отметить, что при этом в условиях теплового баланса термостата и ГЗК температура подставки под зеркало всегда была близка к температуре зеркала.

Для оценки влияния дополнительного охлаждения подставки на условия теплового баланса системы „ГЗК–термостат–вакуумная камера“ были проведены расчеты режимов охлаждения зеркала при разных значениях температуры подставки. Результаты расчетов при температуре подставки  $T_8 = 223$  и 203 К представлены ниже на номограмме (рис. 8). Для анализа этих результатов следует обратиться к номограмме равновесных состояний этого варианта структуры термостата, но без дополнительного охлаждения подставки (рис. 6).

При отсутствии дополнительного охлаждения подставки в условиях теплового баланса температура подставки устанавливалась равной  $T_8 = 230.4$  К (табл. 2). Принудительное охлаждение подставки до 223 К немно-

го снизило нагрузку на криоэкраны и теперь охладить зеркало до 233 К возможно при более высоких температурах криоэкранов  $T_2$  и  $T_3$ . При температуре подставки  $T_8 = 203$  К достичь той же температуры зеркала можно при еще более высоких температурах криоэкранов.

Таким образом, обеспечение оптимального режима охлаждения оптических элементов в термостате существенно зависит от конкретной структуры термостата. Разработанный метод теплового расчета позволяет определить возможный диапазон изменения значений температуры криоэкранов, в котором обеспечиваются минимальные градиенты температуры, когда термодформации элементов оптики находятся в пределах расчетного допуска.

## Заключение

Предложен метод расчета режимов охлаждения крупногабаритной оптики на основе модели стационарного теплового баланса замкнутой системы твердых тел в вакуумных условиях, обеспечиваемого как теплообменом излучения, так и кондуктивной теплопередачей за счет теплопроводности материалов охлаждаемых элементов. Кондуктивный теплообмен учитывается без привлечения нестационарных уравнений теплопроводности, что значительно сокращает время счета и позволяет относительно быстро оптимизировать как структуру термостата, так и режимы охлаждения оптики. При этом управление режимами охлаждения осуществляется с помощью криоэкранов, температурные параметры которых могут меняться независимо друг от друга.

Определение оптимального режима охлаждения оптических элементов сводится к нахождению таких значений температуры криоэкранов, при которых зеркало охлаждается с минимальными градиентами температуры. Показано, что представление результатов тепловых расчетов в виде номограмм температурного состояния оптических элементов дает возможность нахождения такого диапазона изменения значений температуры криоэкранов, в котором возникающие градиенты температуры минимальны или находятся в пределах оптического допуска.

Метод теплового баланса позволяет значительно ускорить оптимизацию решения многопараметрической задачи охлаждения оптических элементов в зависимости как от конструктивных, так и теплофизических параметров системы охлаждения и оптики.

Метод теплового баланса может быть использован и в других задачах разработки систем глубокого охлаждения крупногабаритной оптики вплоть до криогенных температур, что потребует учета изменения теплофизических свойств оптических материалов.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Л.Ш. Олейников. *Методы и средства стабилизации оптических параметров криотелескопов космического базирования и наземных имитационно-испытательных комплексов*. Дисс. д.т.н. (СПб, 2004)
- [2] J.A. Clinea, J. Quenneville, R. Taylor, T.R. Deschenes, M. Braunstein, H. Legner, B.D. Green. Proc. SPIE, **8876**, 88760R (2013). DOI: 10.1117/12.2024371
- [3] С.В. Кравченко, С.Б. Нестеров, В.А. Романько, Н.А. Тестодов, В.И. Халиманович. Инж. журн.: наука и инновации, **1** (13) (2013). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-598
- [4] И.Ю. Дмитриев, А.А. Котмакова, Ю.А. Резунков. ЖТФ, **91** (2), 213 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2023.05.55454.253-22
- [5] ANSYS. Ed. by P. Kohnke, Ph.D. (Ansys Inc., 1994)
- [6] Р. Зигель, Дж. Хауэлл. *Теплообмен излучением* (Мир, М., 1975)
- [7] В.Н. Андрианов. *Основы радиационного и сложного теплообмена* (Энергия, М., 1972)
- [8] Г.А. Голицин, А.П. Левич. *Философские науки*, **1**, 105 (2004).
- [9] A.J. Bushman, Jr., C.M. Pittman. *Technical Note/Langley Research Center/Langley Air Force Base/National Aeronautics and Space Administration* (Washington, 1961)