

На правах рукописи

Мешков Вадим Ростиславович

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ
КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

01.04.14 — теплофизика и теоретическая теплотехника

05.07.02 — проектирование, конструкция и производство
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2005 г.

Работа выполнена на кафедре «Космические летательные аппараты и двигатели» ГОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет (ВОЕНМЕХ)» и на кафедре «Теоретические основы теплотехники» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научные руководители —
кандидат технических наук, профессор
Королев Сергей Иванович

доктор технических наук, профессор
Кириллов Александр Иванович

Официальные оппоненты —
доктор технических наук, профессор
Емельянов Владислав Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор
Исаев Сергей Александрович

Ведущая организация —
ФГУП Всероссийский научный центр
«Государственный оптический институт
им. С. И. Вавилова»

Защита состоится 17 июня 2005 г., в 14 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан 28 апреля 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. т. н., проф.

Кортиков Н. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Качество изготовления и юстировки современных оптических систем (ОС) позволяет достичь дифракционного предела разрешения. Однако высокоточные ОС оказываются чувствительными даже к малым отклонениям от штатных условий эксплуатации. Для космических ОС особенно важно точно поддерживать номинальную температуру всех элементов, поэтому к системам терморегулирования ОС предъявляются высокие требования.

Отклонение температуры от номинальной и возникающие при этом тепловые напряжения влияют на показатель преломления. Кроме того, в результате теплового расширения изменяются размеры элементов ОС. Это приводит к возникновению так называемых волновых аберраций, ухудшающих качество изображения.

Важно установить прямую связь между тепловым состоянием ОС и оптическими искажениями, что позволит затем сформулировать обоснованные требования к системе терморегулирования.

Цель и задачи работы. Основная цель работы состоит в построении адекватной математической модели теплового состояния ОС, позволяющей исследовать связь теплового режима с качеством изображения. По результатам такого исследования можно сформулировать обоснованные требования к системе терморегулирования ОС.

ОС — лишь одна из подсистем, входящих в общую тепловую схему космического аппарата. При моделировании теплового состояния аппарата в целом каждая из подобных подсистем должна быть представлена простой, но достаточно точной моделью. Полную тепловую модель ОС использовать для этого невозможно, поскольку она слишком сложна и громоздка. Поэтому важной задачей работы является создание простой модели, которая позволяла бы получить достаточно полную информацию о поле температуры при произвольном тепловом состоянии ОС.

Объект исследования. В работе изучается телескопическая ОС, установленная на борту космического аппарата и предназначенная для фотографирования Земной поверхности. Предполагается, что аппарат находится на круговой околоземной орбите высотой 200 км с периодом обращения около 90 мин. Объектив телескопа состоит из 7 линз (диаметр первой линзы составляет около 670 мм) и размещен в вакууме внутри термостатирующей оболочки (рис. 1).

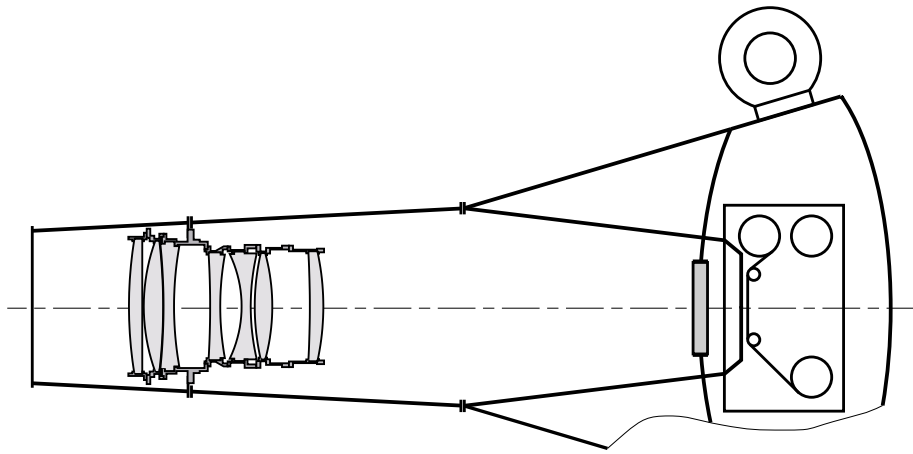


Рис. 1 Схема установки оптической системы на КА

Методика исследования. Исследуемая ОС в тепловом отношении представляет собой линейную систему, состояние которой полностью определяется законом изменения температуры теплоносителя на входе в оболочку, а также изменением внешних тепловых потоков через входное отверстие бленды.

Поле температуры в объективе можно приближенно характеризовать, зная температуры в нескольких выбранных точках. Термоабберации являются линейными функционалами поля температуры, поскольку выражаются через интегралы поля температуры и поля напряжений вдоль лучей, а также через деформации линз и корпуса. Значения волновой абберации также достаточно определять лишь в нескольких точках выходного зрачка и пользоваться интерполяцией по этим опорным значениям. Следовательно, вся необходимая информация о тепловом состоянии ОС и об оптических искажениях содержится в сравнительно небольшом наборе характерных значений температуры и аббераций. Поскольку система линейна, а число каналов воздействия на нее конечно, искомые температуры и абберации при произвольном тепловом воздействии полностью определяются заданием соответствующих *весовых функций*, т. е. реакций на единичные импульсные возмущения по каждому из «входов» системы. Такой подход позволяет рассматривать ОС как «черный ящик», заданный матрицей весовых функций. Подробная модель теплового состояния ОС используется при этом лишь для получения решений особого вида — весовых функций.

Задача моделирования ОС поэтапно включает:

- решение задачи теплопроводности в пространстве изображений по Лапласу;
- вычисление весовых функций в изображениях;
- численное обратное преобразование Лапласа.

В пространстве изображений система уравнений теплопроводности для элементов ОС переходит в систему модифицированных уравнений Гельмгольца, зависящих от параметра преобразования p . Эта система должна быть решена для последовательности специально выбранных значений $p = p_n$. К полученной последовательности решений применяется алгоритм обращения.

Преобразование Лапласа особенно эффективно в сочетании с методами граничных интегральных уравнений (ГИУ). При больших значениях параметра преобразования p решение резко изменяется вблизи границы области. Поэтому чтобы обеспечить хорошую точность при использовании методов с дискретизацией области (например, МКЭ) требуется весьма «густая» сетка. Методы ГИУ не требуют разбиения области на элементы и дают точное решение при любых значениях p .

Тепловые напряжения и деформации в линзах, в соответствии с принятым подходом, вычислялись в пространстве изображений. Задача термоупругости также решалась методом граничных элементов, причем использовалось то же разбиение поверхности линз, что и для решения задачи теплопроводности.

Поскольку объектив ОС находится в вакууме, а кондуктивные тепловые связи между его элементами достаточно слабы, важное значение при формировании поля температуры имеет теплообмен излучением. В линейном приближении теплообмен излучением в замкнутой системе поверхностей описывается интегральными уравнениями. Здесь также возможно применить уже упоминавшееся разбиение поверхностей линз на элементы.

Единый, «интегральный» подход к задачам теплопроводности, термоупругости и теплообмена излучением оказался эффективным и позволил получить решение с требуемой точностью.

Для численного обращения преобразования Лапласа опыт проведенных вычислений позволяет рекомендовать метод Гавера.

Научная новизна работы сводится к следующему.

1. Разработана методика высокоточного моделирования теплового состояния ОС.
2. Подробно исследованы свойства фундаментального решения модифицированного уравнения Гельмгольца в осесимметричной постановке. Для больших и малых значений параметра преобразования p получены асимптотические разложения решения уравнения Гельмгольца.

3. Разработан метод вычисления поля внутренних тепловыделений, вызванных поглощением излучения видимого диапазона.
4. Получены выражения для элементарных угловых коэффициентов теплообмена излучением для осесимметричной системы сферических и конических поверхностей.
5. Исследовано влияние пьезооптического эффекта на термоабберации; показано, что эта составляющая абберации существенно влияет на показатели качества изображения.
6. Предложен метод построения полихроматического изображения при наличии аббераций; исследовано влияние поля температуры на цветовые характеристики изображения.
7. Построены квадратурные формулы гауссовского типа для вычисления сингулярных интегралов с логарифмическими особенностями, возникающих при использовании методов ГИУ в плоских и осесимметричных задачах.

Достоверность результатов. Методы, использованные в работе, были успешно протестированы на задачах с известными аналитическими решениями. Все допущения, принятые при построении математической модели, подробно описаны и обоснованы в тексте диссертации.

Практическая ценность работы заключается в возможности сформулировать, исходя из показателей качества изображения, обоснованные требования к системе терморегулирования ОС, что позволит исключить либо скомпенсировать влияние температурного фактора на оптическое изображение. Полученная в заключительной части работы модель ОС в весовых функциях может быть использована при разработке системы обеспечения теплового режима космического аппарата в целом.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методика математического моделирования теплового состояния сложной ОС.
2. Методика построения и оценки качества изображения по заданному полю температуры.
3. Модель ОС в весовых функциях, позволяющая определять оптические характеристики системы при сложном тепловом воздействии.

Апробация результатов и публикации. Основные результаты работы доложены и обсуждены на Всероссийских молодежных научных конференциях «XXIII Гагаринские чтения» и «XXIV Гагаринские чтения» (Москва, 1997, 1998); международной научной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные проблемы механики и теплообмена» (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998); V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» (Санкт-Петербург, СПбГТУ, 2001). Материалы диссертационного исследования опубликованы в 7 научных трудах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 79 наименований и четырех приложений. Работа содержит 181 страниц текста, 82 рисунка и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы, описывается структура диссертации.

Глава 1 посвящена построению высокоточной модели тепловых процессов в ОС. Показано, что для вычисления весовых функций системы целесообразно использовать преобразование Лапласа.

В пространстве изображений по Лапласу уравнение теплопроводности переходит в стационарное уравнение Гельмгольца

$$\nabla^2 U - \kappa^2 U = -q/k_T,$$

где $U \doteq T$ — изображение по Лапласу температуры, $\kappa^2 = p/a$, q — поле внутренних источников тепла, k_T — коэффициент теплопроводности. При этом решение нестационарной задачи заменяется решением ряда несвязанных однотипных задач для различных значений параметра преобразования p .

Решение уравнений Гельмгольца осуществляется методом ГИУ (разд. 1.3, 1.4), который наилучшим образом приспособлен для линейных эллиптических задач в областях сложной формы.

На рис. 2 показано разбиение поверхностей линз на элементы. Центры граничных элементов выделены точками. Полное число элементов в использованной модели — 209.

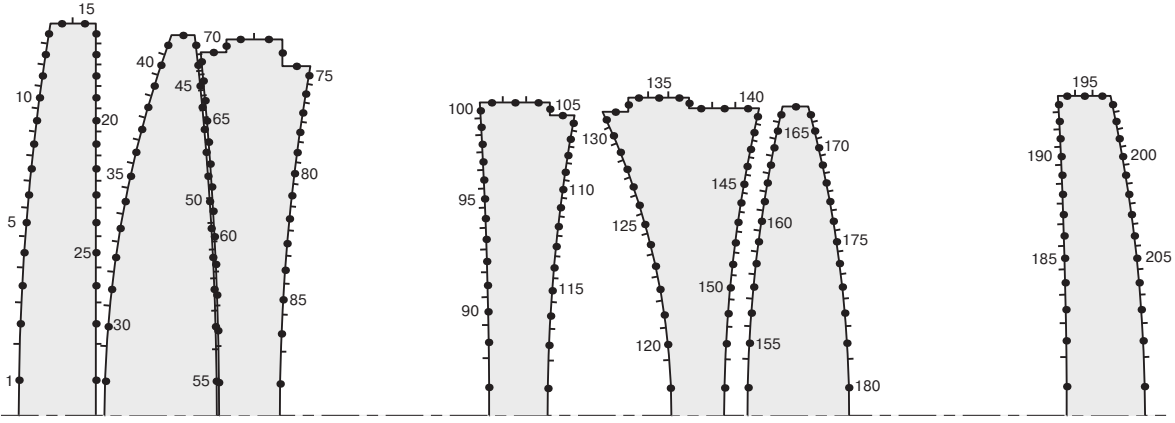


Рис. 2 Разбиение поверхностей линз на граничные элементы. Цифры соответствуют номерам граничных элементов.

Интегральное представление осесимметричной задачи для уравнения Гельмгольца имеет вид

$$2\pi U(\xi) = \int_{\Gamma} \left[\mathcal{G}(\xi, \mathbf{x}) \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial n} - U(\mathbf{x}) \frac{\partial \mathcal{G}(\xi, \mathbf{x})}{\partial n} \right] r(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}). \quad (1)$$

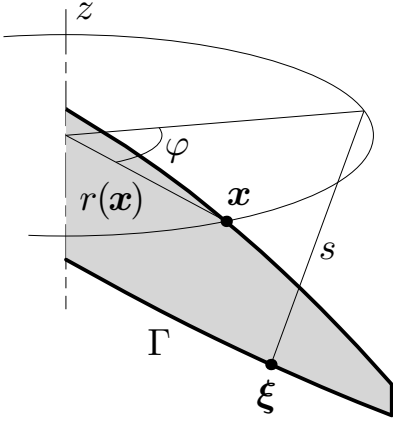


Рис. 3

Здесь $\mathcal{G}(\xi, \mathbf{x})$ — фундаментальное решение:

$$\mathcal{G}(\xi, \mathbf{x}) = \int_0^{2\pi} \frac{e^{-\kappa s(\varphi)}}{s(\varphi)} d\varphi, \quad (2)$$

обозначения ясны из рис. 3.

После разбиения границы Γ на элементы уравнение (1) переходит в матричное уравнение относительно узловых температур и нормальных производных:

$$2\pi U = \mathbf{G}\partial U - \mathbf{H}U.$$

Свойства фундаментального решения (2) изучаются в разд. 1.5. Найденные в этом разделе асимптотические формулы предназначены для выделения сингулярной части интегралов, возникающих при вычислении диагональных элементов матриц влияния \mathbf{G} и \mathbf{H} .

В разд. 1.6 получены асимптотические разложения решения уравнения Гельмгольца для больших и малых значений параметра κ . Асимптотика решения при больших κ имеет вид

$$U(\xi) = \left(\frac{\partial U(\xi)}{\partial n} + U(\xi)H(\xi) \right) \frac{1}{\kappa} + \frac{q(\xi)}{k_T} \frac{1}{\kappa^2} + O(\kappa^{-3}),$$

где $H(\xi)$ — средняя кривизна поверхности в точке ξ .

Использование этих разложений позволяет существенно уменьшить объем вычислений и увеличить точность численного восстановления весовых функций.

Известно, что оптические стекла поглощают часть энергии в полосе пропускания, в результате чего во время съемки в линзах происходит объемное выделение тепла. Этот эффект изучается в разделе 1.7. Поле тепловыделений описывается выражением

$$q(r, z) = \sigma i_0 n^2 \int_{\Omega(r, z)} e^{-\sum_k \sigma_k L_k} d\omega,$$

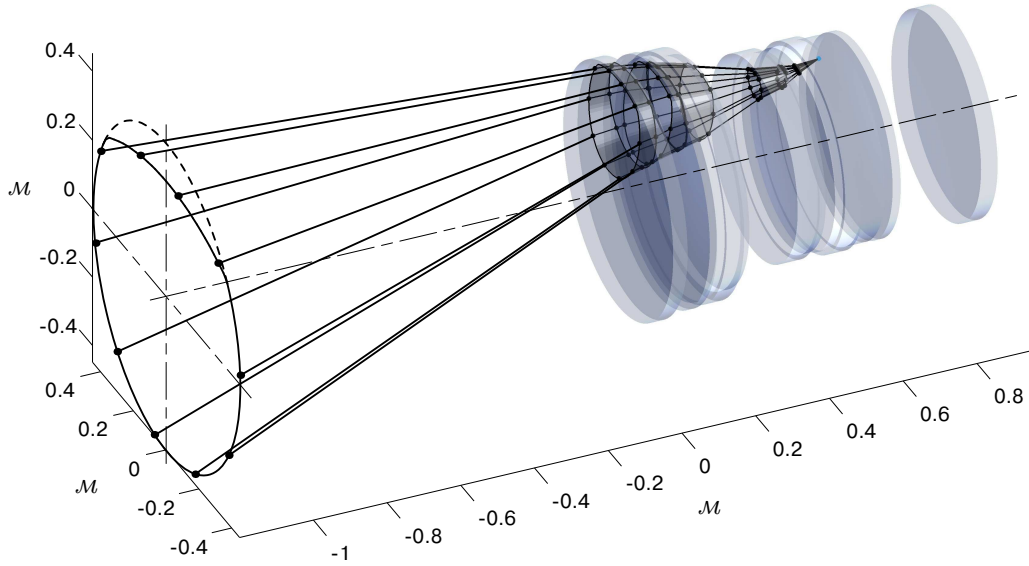


Рис. 4 Внутренние тепловыделения: конус видимости

где σ — показатель поглощения в рассматриваемой точке, i_0 — плотность потока излучения, n — показатель преломления, L_k и σ_k — длина k -го участка луча и соответствующий показатель поглощения; интегрирование происходит по телесному углу $\Omega(r, z)$ (конусу видимости).

Теплообмен излучением в замкнутой системе поверхностей описывается интегральным уравнением для температуры «условной среды» (разд. 1.8)

$$T_e(\xi) = \oint \left[(1 - \varepsilon(\mathbf{x})) T_e(\mathbf{x}) + \varepsilon(\mathbf{x}) T(\mathbf{x}) \right] d\Phi_{\xi-\mathbf{x}},$$

которое удачно сопрягается с граничными интегральными уравнениями теплопроводности.

Методика решения задачи теплообмена для системы связанных тел описана в разд. 1.9.

Разд. 1.10 посвящен вычислению функционалов поля температуры, в частности, таких как интегралы вдоль лучей, связанные с оптическими искажениями.

В разд. 1.11 построена модель теплового состояния термостатирующей оболочки. Найдены весовые функции поперечного сечения и оболочки в целом.

Разд. 1.12 посвящен методике определения тепловых напряжений и деформаций неравномерно нагретых линз. Здесь используется интегральная постановка задачи в перемещениях:

$$\frac{1}{2} \mathbf{u}(\boldsymbol{\xi}) = \int_{\Gamma} \mathbf{U}^{\top}(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{x}) \mathbf{p}(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) - \int_{\Gamma} \mathbf{P}^{\top}(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{x}) \mathbf{u}(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) + \alpha_T \int_{\Omega} T(\mathbf{x}) \mathbf{Z}(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{x}) d\Omega(\mathbf{x}),$$

где символ \int означает интеграл в смысле главного значения по Коши. Тензоры \mathbf{U} , \mathbf{P} , \mathbf{Z} связаны с фундаментальным решением уравнений теории упругости. Показано, что для вычисления интегралов от напряжений вдоль лучей достаточно знать лишь сумму нормальных напряжений во внутренних точках линзы. Определение этой последней сводится к вычислению граничных интегралов.

Заключительный разд. 1.13 посвящен алгоритму численного обращения преобразования Лапласа. Описан метод обращения Гавера. В силу особых свойств восстанавливаемых зависимостей (весовых функций) этот метод обеспечивает высокую точность.

Глава 2 посвящена теории термооптических аберраций и анализу качества изображения при наличии термоабберраций.

В разд. 2.1 рассмотрены составляющие аберраций, появляющиеся при изменении температуры. Это, во-первых, аберрации, происходящие от температурного изменения показателя преломления

$$W_{\lambda}^T(\rho, \varphi) = \sum_{i=1}^N \beta_{\lambda i} \int_{L_i} (T - T_0) dl$$

(ρ, φ — полярные координаты в плоскости выходного зрачка; N — число линз в объективе, $\beta_{\lambda i}$ — температурный коэффициент показателя преломления, T_0 — номинальная температура, L_i — i -й участок луча; индекс λ указывает на зависимость от длины волны). Во-вторых — аберрации, вызванные тепловыми деформациями линз и корпуса объектива

$$W^U(\rho, \varphi) = \sum_{i=1}^{2N} \delta_i (n'_i \cos \varepsilon'_i - n_i \cos \varepsilon_i),$$

(δ_i — деформация i -й преломляющей поверхности в точке пересечения с лучом, $\varepsilon_i, \varepsilon'_i$ — углы падения и преломления, n_i, n'_i — соответствующие показатели преломления) и, наконец, aberrации, связанные с пьезооптическим эффектом

$$W_j^\Sigma = \sum_{i=1}^N \frac{1}{n_i} \int_{L_i} [C_{2i}\Sigma + C_{1i}\sigma_j] dl, \quad j = 1, 2$$

(n_i, C_{1i}, C_{2i} — показатель преломления и упругооптические коэффициенты на i -м участке луча, σ_1, σ_2 — квазиглавные напряжения в плоскости, перпендикулярной лучу, Σ — сумма нормальных напряжений).

Как показывают вычисления, все составляющие одного порядка. Последняя составляющая, хотя и бывает обычно меньше остальных, заметно влияет на изображение. Пьезооптическому эффекту посвящен разд. 2.1.2.

Разд. 2.2 посвящен исследованию дифракционной структуры изображения при наличии aberrаций. Большое внимание уделяется анализу цветного изображения и хроматических aberrаций, поскольку термоaberrации зависят от длины волны излучения (это связано с дисперсией температурного коэффициента показателя преломления и упругооптических постоянных). Представляют интерес также цветовые характеристики изображения полихроматических объектов. Во второй части раздела анализируется изображение тестовых объектов на поверхности Земли (рис. 5).



Рис. 5 Идеальное и искаженное изображения тест-объекта

Завершает главу разд. 2.4, в котором описаны основные критерии качества изображения и способы их вычисления. Рассмотрены критерии, основанные на функции размытия точки и оптической передаточной функции (ОПФ), а также интегральные критерии (параметры Линфута), характеризующие качество изображения протяженных объектов. Качество полихроматического изображения оценивается интегральными по спектру критериями.

Глава 3 посвящена построению модели ОС в весовых функциях, позволяющей определять тепловые и оптические характеристики системы при сложном тепловом воздействии. Характерные точки для вычисления тепловых и оптических весовых функций показаны на рис. 6.

В разд. 3.1 ОС рассматривается как линейная система управления с заданным числом каналов возмущений и контролируемых параметров. Состояние такой системы при сложном тепловом воздействии определяется интегралом Дюамеля

$$\mathbf{y}(t) = \int_0^t \mathbf{W}(t - \tau) \mathbf{f}(\tau) d\tau,$$

где $\mathbf{W}^{[(N+M) \times K]}$ — матрица весовых функций, $\mathbf{y}^{[K]}$ — вектор температурных реакций, $\mathbf{f}^{[N+M]}$ — вектор воздействий на систему.

Важный разд. 3.2 посвящен способу аппроксимации весовых функций. Естественной формой представления весовых функций является экспоненциальное разложение

$$w(\mathbf{x}, t) = \sum_k \alpha_k(\mathbf{x}) e^{-\beta_k t},$$

Показано, что эффективным методом вычисления коэффициентов экспоненциальной аппроксимации является метод Прони.

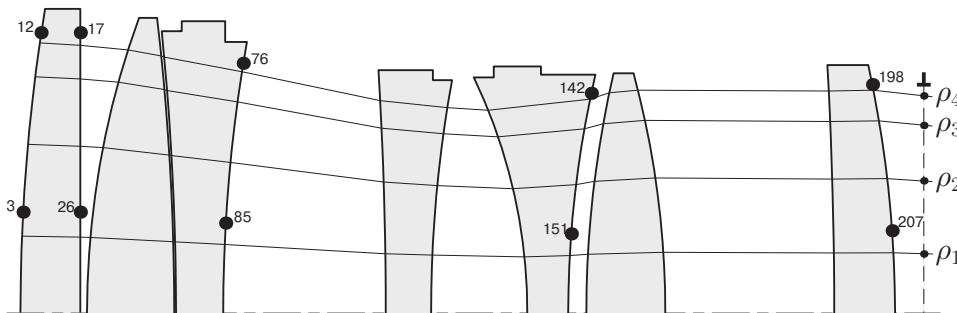


Рис. 6 Точки для вычисления весовых функций

В разд. 3.3 обсуждаются результаты вычисления температурных реакций, полученные с использованием модели первого уровня. Приведены графики изменения во времени волновых aberrаций и характерных температур для всех типов возмущений, а также таблицы коэффициентов экспоненциального приближения, найденных при помощи алгоритма разд. 3.2.

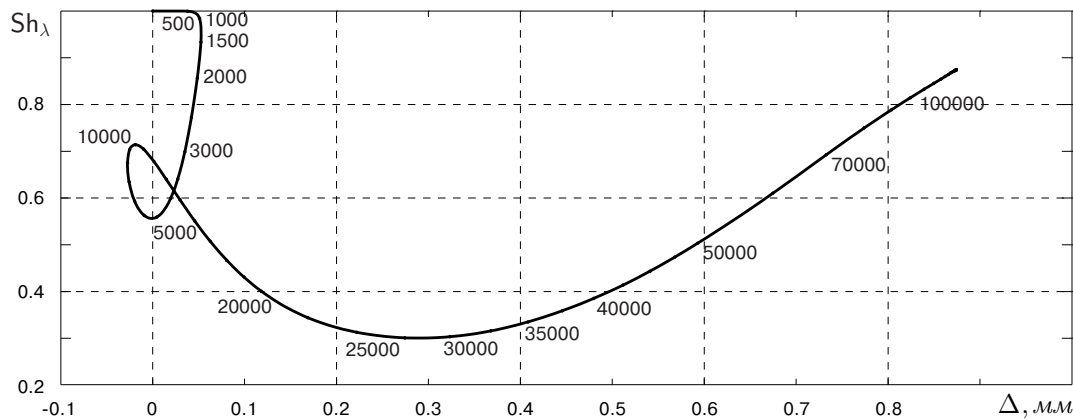


Рис. 7 Кривая Штреля (яркость – дефокусировка): возмущение — скачок температуры оболочки. Числа — время в секундах.

Одной из основных задач работы является изучение связи между тепловым состоянием объектива и качеством изображения. Тепловые переходные процессы сопровождаются изменением оптических характеристик и показателей качества изображения ОС (рис. 7). Результаты соответствующих расчетов приводятся в разд. 3.4. Для некоторых характерных моментов времени в работе построены изображения тестового объекта, находящегося на поверхности Земли (см. рис. 5).

В разд. 3.5 рассматривается поведение ОС при сложном тепловом режиме. Приведен пример вычисления волновых aberrаций при комбинированном тепловом воздействии.

В заключительном разд. 3.6 кратко рассматриваются возможные способы обеспечения теплового режима объектива.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

В **Приложении 1** содержатся справочные данные по оптическим и теплофизическим свойствам оптических стекол.

В **Приложении 2** описывается обобщенный метод арифметико-геометрического среднего, используемый для вычисления фундамен-

тальных решений осесимметричных задач теплопроводности и термоупругости.

В **Приложении 3** изложен метод Федера для построения хода лучей через систему сферических преломляющих поверхностей.

В **Приложении 4** построены квадратурные формулы наивысшей степени точности для интегрирования логарифмических полиномов:

$$\int_{-1}^1 f(x) dx \approx \sum_{i=1}^n w_i f(x_i), \quad f(x) = P(x) + \ln|x|Q(x).$$

где $P(x)$ и $Q(x)$ — многочлены; приводятся таблицы коэффициентов x_i, w_i для формул различных порядков.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана высокоточная математическая модель теплового состояния спутниковой ОС с телескопом-рефрактором.
2. Исследованы оптические искажения, вызываемые неравномерным полем температуры, в том числе, связанные с пьезооптическим эффектом.
3. Исследовано влияние термоаббераций на цветовую структуру изображения.
4. Определены критерии качества изображения, характеризующие ОС дистанционного зондирования как динамическую систему, формирующую полихроматическое (или монохроматическое) изображение.
5. Показано, что динамика тепловых и оптических характеристик объектива может быть полностью описана небольшим набором весовых функций; указанные функции вычислены.
6. Исследованы изменения характеристик изображения, сопровождающие переходные тепловые процессы в системе. Вычислены полихроматические изображения тестового объекта.
7. Рассмотрены вопросы управления тепловым состоянием ОС (и, соответственно, качеством получаемого изображения) в процессе функционирования космического аппарата на орбите для различных режимов эксплуатации.
8. Разработан комплекс программ для имитационного моделирования динамики изображения при изменении теплового состояния ОС.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *В. Р. Мешков* Моделирование линейной нестационарной теплопроводности с использованием асимптотических решений уравнения Гельмгольца // Тез. докл. V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах». — СПб., 2001. — С. 100.
2. *В. Р. Мешков* Хроматические термоабберации высокоточного линзового объектива // Тез. докл. V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах». — СПб., 2001. — С. 134.
3. *В. Р. Мешков, С. И. Королев* Влияние теплового режима высоко разрешающих оптических систем на качество изображения // Тез. докл. Всероссийской молодежной научной конференции «XXIII гагаринские чтения». — М., 1997. — Часть 3. — С. 83–84.
4. *В. Р. Мешков* Способ расчета поля объемного тепловыделения в линзовых системах, обусловленного поглощением излучения видимого спектра // Исследование и проектирование элементов конструкций космических аппаратов и двигательных установок: сборник статей. — СПб.: БГТУ, 1997. — С. 85–92.
5. *В. Р. Мешков* Об искажении траекторий лучей в оптических системах, вызываемом температурным фактором // Исследование и проектирование элементов конструкций космических аппаратов и двигательных установок: сборник статей. — СПб.: БГТУ, 1997. — С. 92–99.
6. *В. Р. Мешков* Управление тепловым режимом космического линзового телескопа // Тезисы докладов международной научной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные проблемы механики и теплообмена». — М., МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. — С. 112.
7. *V. R. Meshkov* Design of the high-precision thermal-control system of a space vehicle with a lens telescope // Proceedings of the International Symposium on Space Technology. — Harbin, 2000.

Подписано к печати 25 апреля 2005 г. Заказ №73. Тираж 100 экз. Объем 1 п. л.
Отпечатано в типографии Санкт-Петербургского университета технологии и дизай-
на. 191028, Санкт-Петербург, ул. Моховая, 26.