

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ ТЕЛ С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ, ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

© С. В. Писецкий¹, И. С. Виноградов²

¹МДТУ ш.м. М. Е. Баумана

²АКЦ ФІАН ім. П. Н. Лебедєва

Розглядається методика та алгоритм чисельного розрахунку процесів радіаційного теплопереносу між участками (елементами) оптичних поверхонь з урахуванням залежності поглинальної, випромінювальної та відбивальної здатностей від довжини хвилі випромінювання, а також від кута між нормаллю та напрямом падаючого і/чи відбитого потоку. Методика базується на узагальненому зональному методі в рамках наближення спектральних смуг. При розрахунку враховується перевипромінювання між зонами екранів, що перебувають у взаємній прямій видимості, а також залежність оптичних властивостей поверхні від температури зони.

В настоящее время проводятся предварительные исследования в направлении проектирования системы обеспечения теплового режима крупногабаритного криогенного космического телескопа (КККТ).

Для работы в миллиметровом диапазоне длин волн к зеркалу и приемнику излучения КККТ предъявляются особые требования по температуре, которая не должна превышать 4 К. Охлаждение оптики до столь низкой температуры позволяет уменьшить засветку приемников до предельного уровня, определяемого космическим фоном.

Криостатированию подлежат очень габаритные и массивные объекты, среди которых выделяется первичное зеркало, имеющее массу порядка двух тонн, составляющую 98 % от общей статируемой массы. Первичное зеркало имеет наружный диаметр 12 м и для обеспечения требуемой температуры при ограниченной мощности активной охлаждающей машины необходимо разработать эффективную радиационную тепловую защиту, при минимальных массе и размерах обеспечивающую теплоприток к поверхности зеркала не более одного ватта. Тепловая защита представляет собой систему радиационных экранов, защищающих оптику телескопа от прямых и отраженных солнечных лучей, а также от теплового излучения других «опасных» объектов.

Необходимость определения температурных полей в проектируемой конструкции с учетом зависимости оптических характеристик от направления излучения, уточнения условий теплообмена между конструкцией и окружающей ее средой, и, в конеч-

ном итоге, оптимизация геометрии и выбор подходящих оптических свойств материалов, явились причинами, подтолкнувшими к разработке методики уточненного численного расчета процессов радиационного теплопереноса.

На основе разработанного алгоритма строится программа для определения температурного состояния системы с учетом зависимости поглотительной, излучательной и отражательной способностей от температуры поверхности, длины волны излучения, а также от угла между нормаллю и направлением приходящего и/или исходящего (собственного или отраженного) потока.

За основу взят зональный метод, являющийся наиболее распространенной разновидностью алгебраической аппроксимации интегральных уравнений радиационного теплообмена. Согласно данному методу вся излучающая система делится на определенное число зон, и в пределах каждой зоны радиационные свойства и плотности излучения усредняются, либо с известным допущением принимаются постоянными. С учетом такого деления и принятых допущений исходные интегральные уравнения радиационного теплообмена могут быть аппроксимированы системой линейных алгебраических уравнений, в которых фигурируют искомые средние плотности излучений по зонам. Число уравнений при этом равно числу зон системы и числу неизвестных средних плотностей излучения. Очевидно, что точность зонального метода возрастает с увеличением числа зон, на которые делится излу-

чающая система.

В общем случае радиационные свойства поверхностей, образующих систему, могут изменяться в зависимости от направления, частоты излучения и координаты, а температура может быть различной в каждой точке поверхности. Поэтому для учета более широкого диапазона оптических характеристик реальных материалов были приняты следующие допущения.

1. Радиационные свойства поверхности постоянны в пределах каждой зоны, но зависят от направления и частоты излучения.

2. Для каждой зоны в первом приближении заданы либо постоянная температура, либо постоянная плотность теплового потока, и в процессе расчета значения уточняются.

3. Излучение и отражение постоянно в пределах каждой зоны, но зависит от направления и частоты излучения (как следствие 1-го допущения).

4. Плотность потока эффективного излучения постоянна в пределах каждой зоны.

5. Поверхности непрозрачны.

Замкнем рассматриваемую систему тел при помощи дополнительных условных поверхностей с определенными характеристиками. Уравнения радиационного теплообмена в такой системе, заполненной диатермической средой, могут быть получены из уравнения энергетического баланса для падающего, отраженного и собственного излучения для элементарной площадки на ограничивающей поверхности.

Спектральная интенсивность эффективного излучения $I_v(r, \Omega)$, покидающего элементарную площадку в окрестности точки пространства с координатой r в некотором направлении Ω , равна сумме интенсивностей собственного и отраженного излучений и может быть записана в виде

$$I_v(r, \Omega) = \varepsilon_v(r, \Omega) I_{0v}(T(r)) +$$

$$+ \int_{\Omega'=2\pi} R_v(r, \Omega') f_v(r, \Omega', \Omega) I_v(r, \Omega') I_v(r, \Omega') \cos \theta' d\Omega', \quad (1)$$

где $\varepsilon_v(r, \Omega)$ — спектральная направленная степень черноты, $I_{0v}(T(r))$ — интенсивность согласно функции Планка при температуре $T(r)$, Ω' — направление падающего на площадку потока, $R_v(r, \Omega')$ — спектральная отражательная способность, $f_v(r, \Omega', \Omega)$ — индикатриса отражения, $I_v(r, \Omega')$ — спектральная интенсивность падающего излучения, θ' — угол между падающим лучом и нормалью к поверхности. Первый член в правой части уравнения (1) соответствует собственному направленному излучению поверхности, а второй — излучению, падающему на площадку со всех направлений и

отраженному в направлении Ω .

Плотность потока результирующего излучения $q_{рез}(r)$, равна разности плотностей эффективного и падающего потоков излучения и описывается выражением

$$q_{рез}(r) = \int_{v=0}^{\infty} \left[\int_{\Omega=2\pi} I_v(r, \Omega) \cos \theta d\Omega \right] dv - \int_{v=0}^{\infty} \left[\int_{\Omega'=2\pi} I_v'(r, \Omega') \cos \theta' d\Omega' \right] dv, \quad (2)$$

где первый и второй члены в правой части соответствуют эффективному и падающему в тепловым потокам. Тепловой поток считается положительным, когда он направлен вдоль положительного направления нормали n .

Рассмотрим замкнутую систему, поверхности которой разбиты на N зон, причем для каждой зоны радиационные свойства, температура и интенсивность эффективного излучения постоянны в пределах каждой зоны, но зависят от направления и частоты излучения. Предположим, что A_i , A_j и A_k — три произвольные зоны, причем $i \neq j$, $k \neq j$ (см. рис. 1).

С учетом сделанных допущений уравнения (1) и (2) примут вид

$$I_{j-i,v}(\Omega_{j-i}) = \varepsilon_{j-i,v}(\Omega_{j-i}) I_{0j,v}(T_j) + \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^N [1 - \varepsilon_{j,v}(\Omega_{k-j})] \times \\ \times f_{k-j-i,v}(\Omega_{k-j}, \Omega_{j-i}) I_{k-j,v}(\Omega_{k-j}) \cos \theta_{k-j} \Delta \Omega_{k-j}, \quad (3)$$

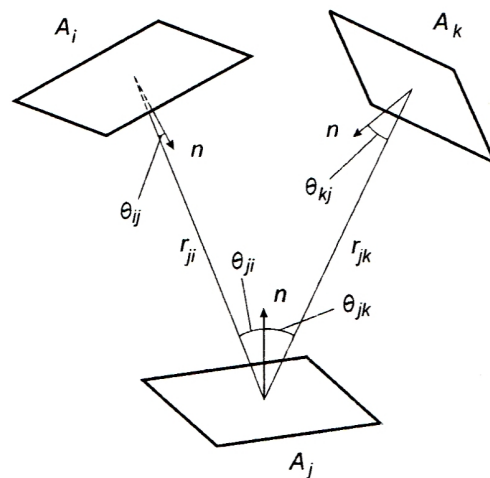


Рис. 1. Координаты в задаче о переносе излучения в условно замкнутой системе

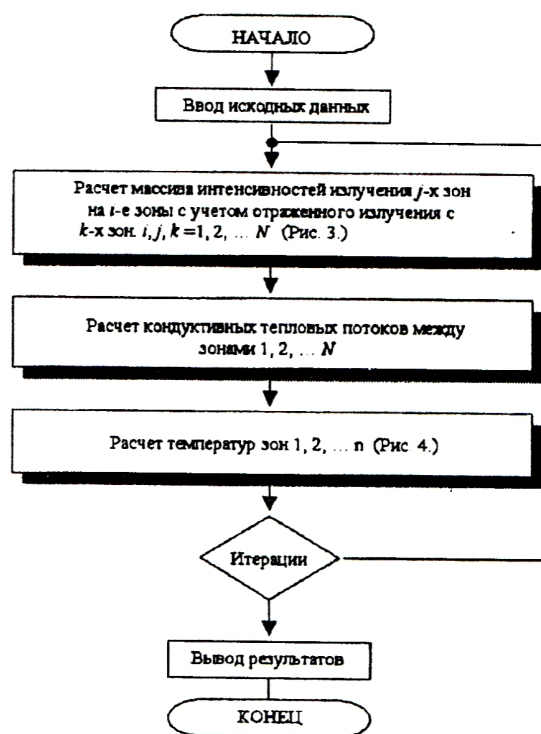


Рис. 2. Общая блок-схема расчета

$$q_{j, \text{рез}} = \int_{\nu=0}^{\infty} \left[\sum_{i=0}^N I_{j-i, \nu}(\Omega_{j-i}) \cos \theta_{j-i} \Delta \Omega_{j-i} \right] d\nu - \int_{\nu=0}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^N I_{k-j, \nu}(\Omega_{k-j}) \cos \theta_{k-j} \Delta \Omega_{k-j} \right] d\nu. \quad (4)$$

Учитывая, что эффективное излучение есть сумма собственного и отраженного излучения, уравнение (4) можно переписать в виде

$$q_{j, \text{рез}} = \varepsilon_j \sigma T_j^4 - \int_{\nu=0}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^N \varepsilon_{j, \nu}(\Omega_{j-k}) I_{k-j, \nu}(\Omega_{k-j}) \cos \theta_{k-j} \Delta \Omega_{k-j} \right] d\nu, \quad (5)$$

где ε_j — интегральная полусферическая степень черноты j -й зоны, σ — постоянная Стефана — Больцмана, T_j — температура j -й зоны, $\varepsilon_{j, \nu}(\Omega_{j-k})$ — спектральная направленная (в направлении на зону k степень черноты j -й зоны).

Для упрощения учета зависимости параметров от частоты излучения весь энергетический спектр делится на конечное число полос, и радиационные свойства предполагаются постоянными в пределах каждой из полос. Данный подход называется приближением спектральных полос.

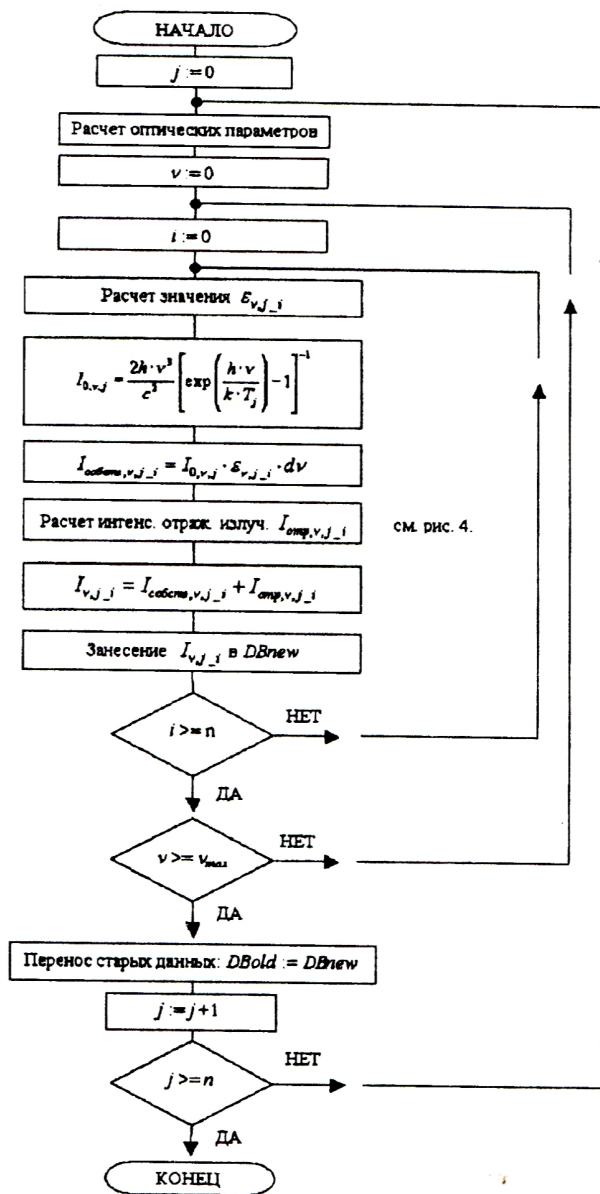


Рис. 3. Блок-схема расчета массивов интенсивностей излучения j -х зон на i -е зоны

Разобьем спектр излучения на конечное число полос шириной $\Delta \nu_m$, $m = 1, 2, \dots, M$ таким образом, что радиационные свойства можно принять постоянными в пределах каждой из полос. В приближении спектральных полос уравнения (3) и (5) преобразуются к виду

$$I_{j-i,m}(\Omega_{j-i}) = \varepsilon_{j-i,m}(\Omega_{j-i}) I_{0,m}(T_j) + + \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^N [1 - \varepsilon_{j-i,m}(\Omega_{k-j})] \times \times f_{k-j-i,m}(\Omega_{k-j}, \Omega_{j-i}) I_{k-j,v}(\Omega_{k-j}) \cos \theta_{k-j} \Delta \Omega_{k-j}, \quad (6)$$

$$q_{j, \text{рез}} = \varepsilon_j \sigma T_j^4 - \sum_{m=0}^M \left[\sum_{k=0}^N \varepsilon_{j,v}(\Omega_{k-j}) I_{k-j,v}(\Omega_{k-j}) \cos \theta_{k-j} \Delta \Omega_{k-j} \right] \Delta \nu_m, \quad (7)$$

где $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, N, i \neq j, k \neq j, m = 1, 2, \dots, M$,

$$I_{0,m}(T_j) = \int_{\Delta \nu_m} I_{0,v}(T_j) d\nu, \quad \varepsilon_j = \sum_{m=0}^M \left(\frac{1}{2\pi} \sum_{i=0}^N \varepsilon_{j-i,m}(\Omega_{j-i}) \Delta \Omega_{j-i} \right) \Delta \nu_m.$$

Если температура и радиационные свойства для каждой зоны в первом приближении известны, то (6) представляет собой систему из N алгебраических уравнений с N неизвестными $I_{j-i,m}(\Omega_{j-i})$ для каждой полосы частот $\Delta \nu_m$. В последующих приближениях температура поверхности зоны определяется на основании уравнения (7).

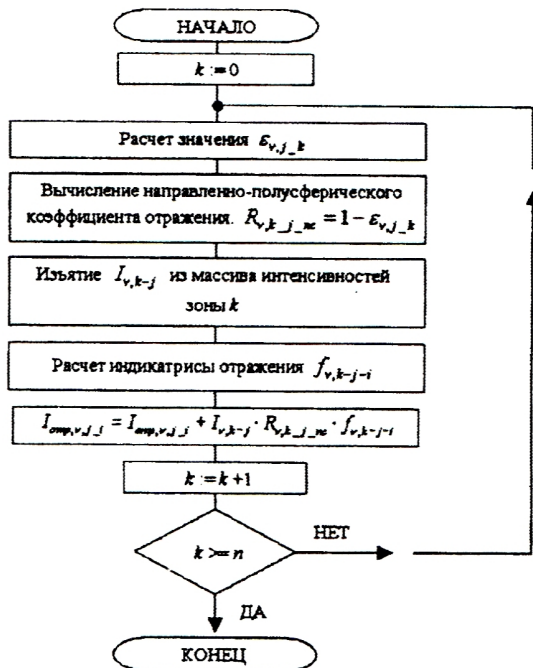


Рис. 4. Блок-схема расчета интенсивности отраженного излучения $I_{отр, v, j-i}$

На основе приведенной методики разработан алгоритм расчета температурного состояния замкнутой системы. Расчет производится итерационным методом по схеме, представленной на рис. 2.

На каждом этапе приближения по известным температурам рассчитываются спектральные направленные характеристики для каждой j -й зоны для каждой спектральной полосы d_n (см. рис. 3).

Затем производится перебор всех i -х зон для каждой спектральной полосы, причем для каждой i -й зоны, в свою очередь, производится перебор

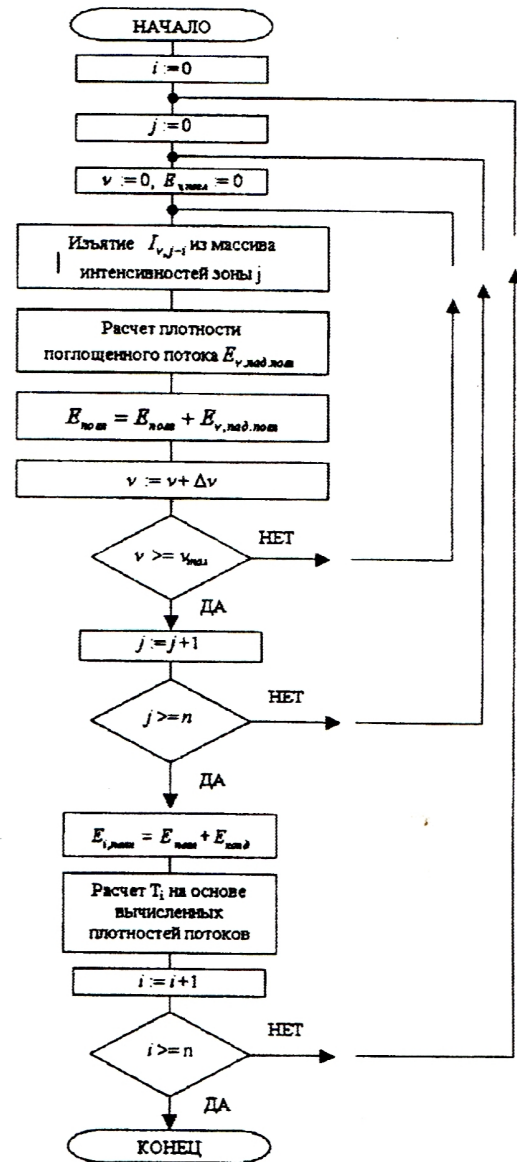


Рис. 5. Блок-схема расчета температур зон

всех k -х зон для вычисления значения интенсивности излучения, пришедшего с k -й зоны и отраженного от j -й зоны (см. рис. 4).

Расчет кондуктивного теплообмена между зонами выполняется стандартными методами в рамках общего итерационного процесса на основе температур, известных из предыдущего шага приближения, и в данной статье не рассматривается.

На заключительном этапе на основе ранее рассчитанных массивов интенсивностей радиационных потоков между зонами, а также на основе интенсивностей кондуктивных тепловых потоков могут быть вычислены температуры каждой из них (см. рис. 5).

При этом аналогичным образом производится перебор всех i -х зон системы, для каждого из них производится перебор j -х зон, и для каждой спектральной полосы производится изъятие соответствующей интенсивности радиационного потока с j -й зоны на i -ю. Зная суммарную плотность поглощенной тепловой энергии и интегральную полусферическую степень черноты i -й зоны можно рассчитать ее температуру. Интегральная полусферическая степень черноты находится интегрированием спектральной направленной степени черноты по частоте и по направлению.

В соответствии с изложенным выше алгоритмом решения задачи, направленные спектральные радиационные свойства оптических поверхностей должны быть заданы. При отсутствии информации о требуемых характеристиках необходимо провести ряд дополнительных экспериментальных измерений на соответствующем оборудовании. Для проверочных расчетов можно воспользоваться формулами Френеля. Также на основании данного алгоритма можно проводить расчеты в рамках приближения серого тела с зеркально и диффузно отражающими поверхностями.

1. Адрианов В. Н., Основы радиационного и сложного теплообмена. — М.: Энергия, 1972.
2. Опсик М. Н. Сложный теплообмен. — М.: Мир, 1976.
3. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. — М.: Мир, 1976.
4. Кардашев Н. С., Андреянов В. В., Буякас В. И. и др. Проект миллиметрона // Тр. Физ. ин-та им. П. Н. Лебедева. Радиоастрономическая техника и методы.—2000.—228.

This paper presents an algorithm of numerical calculations of radiation heat transfer between optical surface elements. The algorithm is based on a generalised zonal method with spectral strip approximation and allows dependence of optical properties (reflectance, absorptance and emittance) on the temperature of the element, wave length, and direction of radiation to be taken into consideration.