

ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ЗЕРКАЛЬНО-ДИФФУЗНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

© 2019 г. *Д.К. Винокуров*

ФГУП ЦНИИмаш

dkvin@mail.ru

DOI: 10.1134/S0234087919020047

Рассмотрены особенности компьютерного моделирования лучистого теплообмена космических аппаратов в зеркально-диффузном приближении характера отражения поверхностей по алгоритмам, реализующим непосредственный расчет разрешающих угловых коэффициентов методом Монте-Карло, и по алгоритму автора, реализующему расчёт через определение полуразрешающих угловых коэффициентов поглощённого излучения. Показано влияние способа аппроксимации поверхностей геометрической модели и расчётного алгоритма на результаты расчёта потоков и температур.

Ключевые слова: лучистый теплообмен, алгоритм, зеркально-диффузное приближение, разрешающие угловые коэффициенты.

SPECIAL FEATURES OF THE COMPUTER SIMULATIONS OF RADIATION HEAT EXCHANGE OF THE SPACECRAFT IN SPECULAR-DIFFUSE APPROXIMATION

D.K. Vinokurov

FSUE TsNIIMash

The special features of the computer simulations of the radiation heat exchange calculations of spacecraft with specular-diffuse approximation of the nature of the surfaces reflection according to the algorithms, which realize the direct calculation of the radiation exchange factors by the Monte Carlo method, and to the algorithm of the author, which realizes calculation through the determination of semi total absorbed radiation exchange factors are considered. Effects of geometric model surfaces approximation method and calculation algorithm on fluxes and temperature results are shown.

Key words: heat radiation, algorithm, specular-diffuse approximation, radiation exchange factors.

1. Введение

На внеатмосферном участке полёта на тепловые нагрузки на элементы конструкции космического аппарата (КА) определяющее влияние оказыва-

ют переменные по времени поля лучистых потоков от внешних источников излучения – Солнца и планет. Особенностью расчёта лучистого теплообмена для этих условий является то, что отсутствие среды позволяет свести уравнения переноса излучения к виду, в котором интегрирование осуществляется только по поверхностям системы. Широкое применение при практических расчётах получил зональный метод [1]. На результаты расчётов лучистого теплообмена при этом оказывает влияние ряд факторов: используемые приближения характера отражения; аппроксимация поверхностей расчётными зонами; используемые алгоритмы определения лучистых связей.

Имеется несколько приближений для описания характера отражения излучения поверхностями: диффузное (модель Ламберта), зеркально-диффузное, двунаправленное (направленно-направленное или двухпараметрическое). Самое простое и распространённое из них – диффузное. Диффузная модель отражения применима для широкого класса задач, при этом при расчёте лучистого теплообмена используются диффузные угловые коэффициенты (УК) φ_{i-j} , которые обладают теми достоинствами, что они не зависят от радиационных свойств поверхностей.

Однако существуют задачи, в которых диффузное приближение приводит к значительному завышению или занижению величин падающих переотраженных потоков из-за того, что многие элементы конструкции (зеркала, панели солнечных батарей, радиационные теплообменники и современные экранно-вакуумные теплоизоляции) имеют поверхности с ярко выраженной зеркальной составляющей отраженного излучения. Вопрос о необходимости учета зеркальности был поставлен давно [2, 3] и является актуальным до настоящего времени [4]. В зеркально-диффузной модели отражения индикатриса отражения представляется в виде суперпозиции диффузной и зеркальной составляющих. Применение указанного приближения упрощается тем, что для задания оптических характеристик покрытий, помимо коэффициента поглощения α , необходимо знание двух дополнительных коэффициентов: диффузного ρ^d и зеркального ρ^{sp} отражения. Зеркальная составляющая при этом может быть узконаправленная, описываемая δ -функцией Дирака по законам геометрической оптики, а может быть описана неким распределением, например, Гаусса, или моделью Фонга, широко используемой в компьютерной графике. Сложность применения распределения Гаусса и модели Фонга при расчёте теплообмена заключается в том, что для выполнения закона сохранения энергии необходимо вводить нормирующий множитель, который зависит от угла падения луча.

Двунаправленное приближение позволяет точнее моделировать лучи-

стый теплообмен, но обладает рядом недостатков: сложность алгоритма, высокая ресурсоёмкость и необходимость иметь большой объём исходных данных по оптическим характеристикам поверхностей (четырёхмерная функция), которые в большинстве случаев отсутствуют или недостоверны.

Зеркально-диффузное приближение с δ -функцией Дирака является на сегодняшний день достаточным для решения задач, в которых присутствуют диффузные поверхности и поверхности с ярко выраженными зеркальными свойствами, к которым относятся задачи определения теплового режима КА и оптического оборудования. При этом относительно невысокая ресурсоёмкость метода позволяет проводить вычисления на персональных ЭВМ.

Среди алгоритмов расчёта лучистого теплообмена в зеркально-диффузном приближении широко используются алгоритмы, реализующие непосредственный расчет разрешающих УК методом Монте-Карло (МК) [5, 6]. В общем случае алгоритм сводится к следующим шагам.

Шаг 1. Для одного испытания разыгрывается акт диффузного испускания – определение на исходной поверхности i точки и направления луча с заданной долей энергии излучения.

Шаг 2. Определяется поверхность j , на которую попал исходный луч, и в зависимости от алгоритма разыгрывается состояние, определяемое оптическими характеристиками поверхности:

а) поглощение, диффузное отражение, зеркальное отражение при неизменной энергии луча;

б) диффузное или зеркальное отражение с уменьшением энергии отражённого луча на коэффициент поглощения.

Шаг 3. В зависимости от результата розыгрыша:

– поглощение: энергия добавляется к поверхности j ;

– зеркальное отражение: определяется направление отражённого луча по законам геометрической оптики и осуществляется дальнейшее слежение за лучом (шаг 2);

– диффузное отражение: разыгрывается акт диффузного отражения (шаг 1).

Для диффузного УК абсолютная ошибка в методе МК оценивается выражением [7]

$$\Delta\varphi_1 = x_\beta \sqrt{\varphi_1(1-\varphi_1)/N},$$

где x_β – корень уравнения $\Phi(x) = \beta$, $\Phi(x)$ – интеграл вероятностей; N – полное количество испытаний (испущенных с поверхности лучей).

Алгоритмы трассировки лучей с использованием метода МК для моде-

лирования события в случае попадания луча на площадку обладают той особенностью, что при каждом переотражении диффузного характера погрешность определения диффузного переотражения возрастает, так как она обратно пропорциональна квадратному корню из числа испытаний. В зеркально-диффузном приближении в результате первого переотражения количество испытаний с диффузным отражением на шаге $2a$ составит $\rho^d \varphi_1 N$, т.е. погрешность определения диффузных потоков увеличивается в $(\rho^d \varphi_1)^{-0.5}$ раз (например, при $\varphi_1 = 0.2$ и $\rho^d = 0.2$ – в 5 раз). При учёте каждого следующего переотражения погрешность продолжает расти, а, начиная с некоторого переотражения, количество испытаний, связанное с диффузным отражением, вообще может стать равным нулю.

Теоретически при неограниченном возрастании количества лучей N значения коэффициентов лучистого теплообмена сходятся по вероятности к точным значениям. Однако учитывая, что на практике значение N ограничено, для зеркально-диффузного приближения имеем ошибки, трудно поддающиеся оценке [8]. Сложности в оценке возникают из-за того, что распределение значения, которое отвечает за поглощение энергии, имеет вид, зависящий от количества и типов переотражений.

С учетом особенностей зеркально-диффузного приближения с использованием δ -функцией Дирака автором предложен алгоритм определения лучистого теплообмена, реализованный в решателе VF_1M к вычислительной системе «СОТР» [9]. Алгоритм позволяет учитывать зеркальный характер отражений при одновременном учёте диффузных переотражений с той же точностью, что и в диффузном приближении. Кроме того, в отличие от метода МК, в котором не каждое отражение от зеркальной поверхности является зеркальным, данный алгоритм учитывает все зеркальные отражения.

2. Математическая постановка

В основе предложенного автором алгоритма лежит использование зонального метода с учётом селективности излучения по диапазонам спектра. Поглощённый i -й зоной поток Q_i определяется выражением

$$Q_i = \sum_{\lambda} \sum_j^{N_p} G_{\lambda, i-j} Q_{\lambda, j}^{\text{out}}, \quad (1)$$

где λ – индекс, показывающий зависимость величины от спектрального диапазона или длины волны; N_p – количество зон в расчётной модели.

$G_{\lambda,i-k}$ – разрешающие УК поглощённого излучения (коэффициенты Гехбарта [10]); $Q_{\lambda,j}^{\text{out}}$ – собственное излучение зоны j в спектральном диапазоне λ .

В диффузном приближении коэффициенты Гехбарта определяются на основе диффузных УК решением системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$G_{\lambda,i-k} - \sum_{j=1}^{N_p} \rho_{\lambda,j} G_{\lambda,i-j} \varphi_{j-k} = \varphi_{i-k} \alpha_{\lambda,k}, \quad (2)$$

где α_j , ρ_j – соответственно коэффициенты поглощения и отражения j -й площадки.

В зеркально-диффузном приближении коэффициенты Гехбарта рассчитываются на основе полуразрешающих УК поглощённого излучения $f_{\lambda,i-j}$ по формуле (суммирование осуществляется по всем зонам системы)

$$G_{\lambda,i-j} = f_{\lambda,i-j} \frac{\alpha_{\lambda,j}}{\alpha_{\lambda,j} + \rho_{\lambda,j}^d} + \sum_p \frac{\rho_{\lambda,p}^d}{\alpha_{\lambda,p} + \rho_{\lambda,p}^d} f_{\lambda,i-p} G_{\lambda,p-j}, \quad (3)$$

где d – индекс, указывающий на диффузный характер коэффициента.

Полуразрешающий угловой коэффициент поглощённого излучения равен доле потока собственного (исходящего) излучения поверхности i , достигшего с учётом недиффузной составляющей в отражении излучения поверхности j и поглощённого или диффузно отражённого ею [11]. $f_{\lambda,i-j}$ можно определить по формуле

$$f_{\lambda,i-j} = (\alpha_{\lambda,j} + \rho_{\lambda,j}^d) \left\{ \varphi_{i-j} + \sum_k \varphi_{i(k)j} \rho_{\lambda,k}^{\text{sp}} + \sum_m \sum_k \varphi_{i(k,m)j} \rho_{\lambda,m}^{\text{sp}} \rho_{\lambda,k}^{\text{sp}} + \dots + \sum_n \dots \sum_m \sum_k \varphi_{i(k,m,\dots,n)j} \rho_{\lambda,n}^{\text{sp}} \dots \rho_{\lambda,m}^{\text{sp}} \rho_{\lambda,k}^{\text{sp}} + \dots \right\}, \quad (4)$$

где sp – индекс, указывающий на зеркальный характер коэффициента; $\varphi_{i(k,m,\dots,n)j}$ – зеркальные УК между площадками i и j с учётом зеркальных отражений площадками k, m, \dots, n .

Выражение (4) может быть разбито на диффузную и зеркальную составляющие. Диффузная составляющая определяется диффузным УК. Для учета зеркальной составляющей отражения необходимо вычислить сумму ряда

$$\begin{aligned}
 g_{\lambda,i-j} = & \sum_k \varphi_{i(k)j} \rho_{\lambda,k}^{\text{sp}} + \sum_m \sum_k \varphi_{i(k,m)j} \rho_{\lambda,m}^{\text{sp}} \rho_{\lambda,k}^{\text{sp}} + \dots \\
 & + \sum_n \dots \sum_m \sum_k \varphi_{i(k,m,\dots,n)j} \rho_{\lambda,n}^{\text{sp}} \dots \rho_{\lambda,m}^{\text{sp}} \rho_{\lambda,k}^{\text{sp}} + \dots .
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Аналитические решения для зеркальных УК имеются лишь для ряда простейших случаев [12], которые не применимы для объектов сложной формы, поэтому $g_{\lambda,i-j}$, как правило, находится численно.

3. Описание алгоритма

Алгоритм определения разрешающих УК состоит из следующих этапов:

- расчёт $f_{\lambda,i-j}$: определение диффузного УК φ_{i-j} с одновременной трассировкой лучей для вычисления зеркальной составляющей $g_{\lambda,i-j}$ полуразрешающего УК поглощённого излучения;
- корректировка УК для выполнения принципов замкнутости и взаимности. При использовании областей взаимооблучённости [13] возникают дополнительные ограничения на значения УК;
- расчёт разрешающих УК $G_{\lambda,i-j}$ решением СЛАУ (3).

Диффузный УК в зависимости от особенностей геометрической модели рассчитывается по одному из алгоритмов, например:

- попарным методом МК;
- методом МК «один ко многим»;
- детерминированными методами с заданным количеством точек и направлений;
- интегрированием по площадям детерминированным методом или методом МК;
- контурным интегрированием квадратурами Гаусса с определением экранирующего множителя и др.

Во всех этих методах присутствует луч \mathbf{r} и точка его происхождения \mathbf{p} , которые используются для дальнейшей трассировки луча при наличии зеркальной составляющей в отражении для определения $g_{\lambda,i-j}$. В качестве начальной энергии отражённого луча берётся вектор энергии $\mathbf{e} = [\rho_{\lambda_1,j}^{\text{sp}}, \rho_{\lambda_2,j}^{\text{sp}}, \dots]^T$, позволяющий учитывать селективность излучения по диапазонам спектра. При этом количество членов ряда (5) ограничивается либо заданным максимальным количеством переотражений одного луча N_{max} , либо заданной погрешностью учёта недиффузной составляющей отражения ε_p (участвуют только члены ряда, норма коэффициентов которых, т.е. максимальное зна-

чение по диапазонам спектра $\|\rho_{\lambda,n}^{\text{sp}} \dots \rho_{\lambda,m}^{\text{sp}} \rho_{\lambda,k}^{\text{sp}}\| < \varepsilon_\rho$). Остаток энергии луча при досрочном прерывании ряда суммируется с f_{i-z} , где z – зона, на которой произошло прерывание. Процесс определения отраженного луча сводится к решению задачи пересечения падающего луча с поверхностью в системе координат, в которой поверхность имеет базовый вид. Определяется точка попадания, нормаль в точке и луч, зеркально отраженный от поверхности. При наличии в моделируемом объекте зеркальных криволинейных поверхностей, которые могут быть аналитически описаны как поверхности второго порядка, в модель вводятся суперэлементы – поверхности второго порядка с параметрически заданными границами. При каждом попадании луча на поверхность зоны определяются приращения к соответствующим УК.

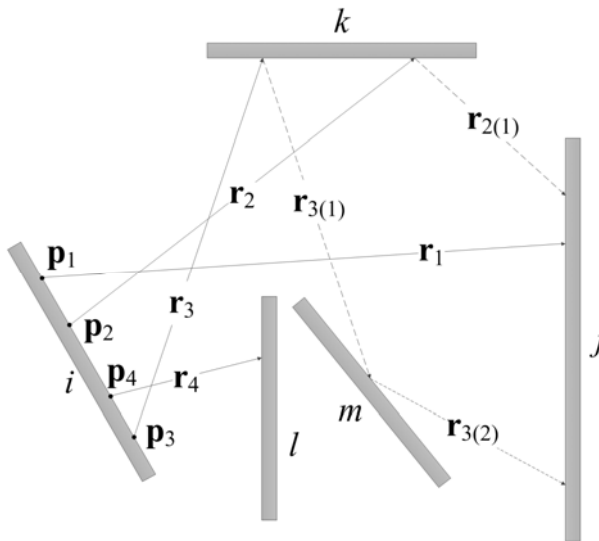


Рис.1. Схема учёта зеркальной составляющей при расчёте УК.

Поясним работу алгоритма на примере системы зон, приведённой на рис.1. Пусть зоны l и j отражают только диффузно, а зоны k и m – зеркально-диффузно. В качестве исходных выступают лучи r_r ($r=1, \dots, 4$) с вершинами в точках p_r с энергиями e_r , которые возникли при определении диффузных УК с зоны i на зоны j, k, l, m . Энергия луча e_r определяется как доля излучения, ушедшего с зоны i . Так как зоны l и j отражают только диффузно, дальнейшего наблюдения за лучами r_1 и r_4 не производится. Зона k отражает зеркально, поэтому осуществляется дальнейшее слежение за лучами r_2 и r_3 , в результате чего получаем приращения коэффициентов $f_{\lambda,i-j}$ и $f_{\lambda,i-m}$ на величины $\delta f_{\lambda,i-j} = (\alpha_{\lambda,j} + \rho_{\lambda,j}^d)(\rho_{\lambda,k}^{\text{sp}} e_{\lambda,2} + \rho_{\lambda,k}^{\text{sp}} \rho_{\lambda,m}^{\text{sp}} e_{\lambda,3})$ и $\delta f_{\lambda,i-m} =$

$= (\alpha_{\lambda,m} + \rho_{\lambda,m}^d) \rho_{\lambda,k}^{sp} e_{\lambda,3}$. Если $N_{\max}=2$ или $\left\| \rho_{\lambda,k}^{sp} \rho_{\lambda,m}^{sp} \rho_{\lambda,j}^{sp} \right\| < \varepsilon_\rho$ (в частности, при $\left\| \rho_{\lambda,j}^{sp} \right\| = 0$), приращение $\delta f_{\lambda,i-j} = (\alpha_{\lambda,j} + \rho_{\lambda,j}^d) \rho_{\lambda,k}^{sp} e_{\lambda,2} + \rho_{\lambda,k}^{sp} \rho_{\lambda,m}^{sp} e_{\lambda,3}$.

4. Влияние аппроксимации поверхностей

Покажем влияние способа аппроксимации поверхностей геометрической модели на результаты расчёта результирующих потоков излучения в системе тел с зеркально-диффузным характером отражения, а также проведем верификацию реализации алгоритма расчёта лучистого теплообмена в программном модуле VF_1M.

Рассмотрим систему, состоящую из двух концентрических сфер (внутренняя F_1 и внешняя F_2 с температурами T_1 и T_2 и степенями черноты ε_1 и ε_2 соответственно), для которой задача лучистого теплообмена в зеркально-диффузном приближении имеет точное аналитическое решение [1]. Результирующий поток Q_1 на поверхность F_1 при различных оптических характеристиках поверхностей определяется выражениями:

– F_1 зеркально или диффузно отражающая, F_2 – диффузно отражающая

$$Q_1 = \frac{F_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{1/\varepsilon_1 + (F_1/F_2)(1/\varepsilon_2 - 1)}; \quad (6)$$

– F_1 зеркально или диффузно отражающая, F_2 – зеркально отражающая

$$Q_1 = \frac{F_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}. \quad (7)$$

Рассмотрим три модели. Радиусы сфер зададим $R_1 = 0.5$ м и $R_2 = 1.0$ м. Модель А: сферы аппроксимированы плоскими площадками по 128 площадок на одну сферу (рис.2а). Модель Б: сферы аппроксимированы криволинейными треугольниками по 224 площадки на одну сферу (рис.2б) (при расчётах УК криволинейный треугольник представляется набором из 9 плоских треугольников). Модель В: то же, что и модель Б, но каждой сфере в соответствие поставлен суперэлемент – сфера соответствующего радиуса.

Результаты расчётов результирующего потока Q_1 на поверхность F_1 в Вт при $T_1=100$ К и $T_2=200$ К для различных характеров отражения при значениях коэффициентов $\varepsilon_1=0.4$, $\varepsilon_2=0.6$ представлены в табл.1. В таблице использованы обозначения: «д» – поверхность отражает диффузно; «з» – поверхность отражает зеркально; «з+д» поверхность отражает и зеркально, и диффузно, при этом принято для F_1 : $\rho_1^d = \rho_1^{sp} = 0.3$; «теор.» – теоретическое

значение, рассчитанное по формулам (6), (7) по точным значениям площадей сферы; «аналит.» – значение, рассчитанное по формулам (6), (7) по значениям площадей, полученным при аппроксимации; «расчётн.» – значение, рассчитанное по программному модулю VF_1M.

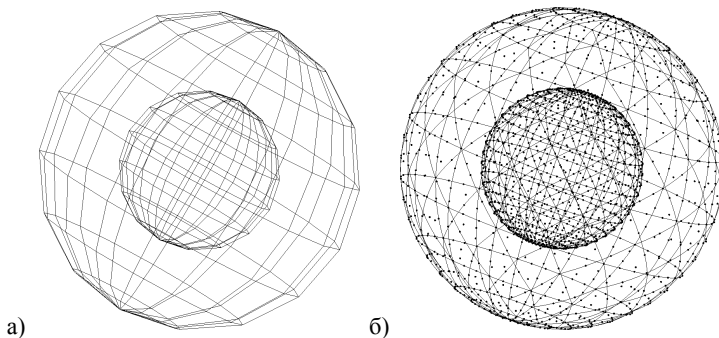


Рис.2. Модель – две концентрические сферы.

Таблица 1. Результаты расчётов результирующего потока для концентрических сфер.

Объект	Площадь, м ²		Тип величины	Значение величины					
	F_1	F_2		$F_1 - д,$ $F_2 - д$	$F_1 - з,$ $F_2 - д$	$F_1 - з+д,$ $F_2 - д$	$F_1 - д,$ $F_2 - з$	$F_1 - з,$ $F_2 - з$	$F_1 - з+д,$ $F_2 - з$
Теория	3.142	12.566	теор. Q_1 , Вт	100.20	100.20	100.20	84.38	84.38	84.38
Модель А	3.042	12.167	аналит. Q_1 , Вт	97.01	97.01	97.01	81.69	81.69	81.69
			расчётн. Q_1 , Вт	97.01	97.03	97.02	89.03	88.76	88.9
			ошибка аналит.	0.0%	0.0%	0.0%	9.0%	8.7%	8.8%
			ошибка теор.	-3.2%	-3.2%	-3.2%	5.5%	5.2%	5.4%
Модель Б	3.130	12.521	аналит. Q_1 , Вт	99.84	99.84	99.84	84.07	84.07	84.07
			расчётн. Q_1 , Вт	99.65	99.85	99.85	86.78	86.70	86.75
			ошибка аналит.	-0.2%	0.0%	0.0%	3.2%	3.1%	3.2%
			ошибка теор.	-0.5%	-0.3%	-0.3%	2.8%	2.8%	2.8%
Модель В	3.130	12.521	аналит. Q_1 , Вт	99.84	99.84	99.84	84.07	84.07	84.07
			расчётн. Q_1 , Вт	99.65	99.85	99.85	84.52	84.60	84.57
			Ошибка аналит.	-0.2%	0.0%	0.0%	0.5%	0.6%	0.6%
			ошибка теор.	-0.5%	-0.3%	-0.3%	0.2%	0.3%	0.2%

Из таблицы видно, что расчёт для модели В даёт в сравнении с теоретическим значением относительную ошибку не более 0.5% для всех вариантов отражения поверхностей.

Исследуем возможные источники ошибок для моделей А и Б.

В теории, при наличии зеркальности у обеих сфер, исходный и все последующие отражённые лучи лежат в одной плоскости. Кроме того, луч, ушедший с поверхности внутренней сферы, колеблется между сферами, а луч, ушедший с внешней сферы, но не попавший сразу на внутреннюю, так и будет отражаться только поверхностью внешней сферы. Для модели В с суперэлементами вычислительные эксперименты подтверждают, что это происходит именно так – все лучи лежат в одной плоскости, как и должно быть в теории. Анализ хода лучей без суперэлементов показывает, что лучи выходят за плоскость. Этот эффект еще более заметен, когда радиусы сфер отличаются ненамного. Например, при отношении радиусов 11:10 при аппроксимациях без суперэлементов лучи ведут себя совершенно непредсказуемо: они не только выходят из плоскости, но и меняют отражающие поверхности, что приводит к перераспределению уходящего излучения по сферам, отличному от теоретического (рис.3а и 3б). При аппроксимации с суперэлементами луч остается в одной плоскости (рис. 3в).

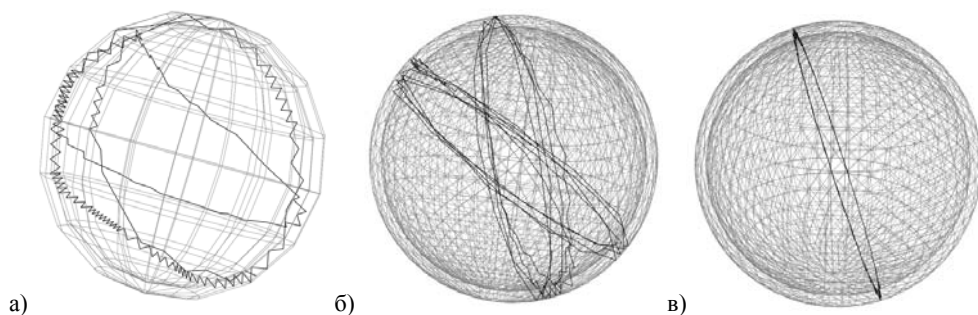


Рис.3. Ход одного из лучей в моделях с отношением радиусов сфер 11:10.

Еще более наглядным является пример, когда в районе полюсов между сферами расположены цилиндры. Луч, испущенный с боковой поверхности верхнего цилиндра, в теории после ряда зеркальных отражений обязательно попадет на боковую поверхность нижнего цилиндра. При наличии суперэлементов именно это и происходит (рис.4а, сами поверхности не показаны). При аппроксимации плоскими площадками лучи «гуляют» по всей поверхности сфер (рис.4б).

Таким образом, использование в расчётной модели суперэлементов (поверхностей второго порядка с параметрически заданными границами) позволяет воспроизвести физически адекватную картину отраженных лучей и заметно повысить точность расчета УК и, как следствие, результирующего потока.

5. Влияние алгоритма определения лучистых связей

Покажем влияние алгоритма определения лучистых связей в зеркально-диффузном приближении на результаты расчётов температур. Для этого проведем расчёты по программе VF_1M и по двум коммерческим программным продуктам (КПП1 и КПП2), в которых реализованы алгоритмы расчёта разрешающих УК в зеркально-диффузном приближении методом МК.

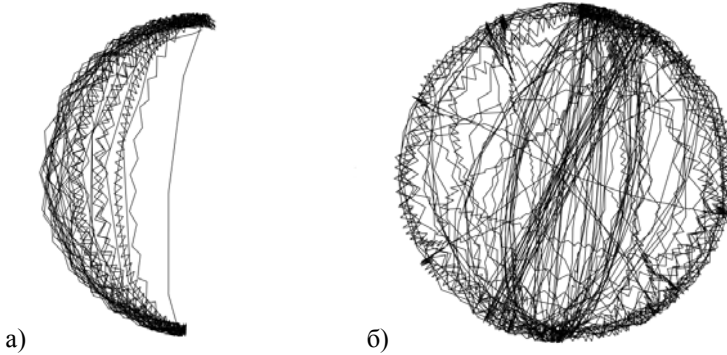


Рис.4. Ход лучей при наличии цилиндрических поверхностей.

В качестве метода расчёта диффузных УК в VF_1M воспользуемся алгоритмом, в котором методом МК на поверхности площадки выбирается случайная равномерно распределённая точка, которая принимается за вершину луча (кванта), энергия луча полагается равной единице, а выбор направления луча осуществляется случайным образом с учётом диффузного характера излучения.

В качестве примера рассмотрим внутреннюю поверхность куба с теплоизолированными стенками. Проведем расчёты температур для следующих условий. Пусть каждая грань куба разделена на 121 зону. Температура одной зоны, расположенной в центре грани $+X$, задана равной 300 К, температура зоны в центре грани $-X$ задана равной 600 К. Эти две грани будем называть торцевыми, а остальные – боковыми. Теплофизические характеристики зададим так, чтобы теплоемкость каждой зоны равнялась 0.01 Дж/К. Определим температуры остальных зон в нестационарном и стационарных режимах.

Рассмотрим три варианта со следующими оптическими характеристиками поверхностей:

- 1) $\alpha=\varepsilon=0.01$; $\rho^d=0.01$; $\rho^{sp}=0.98$;
- 2) $\alpha=\varepsilon=0.01$; $\rho^d=0.98$; $\rho^{sp}=0.01$;
- 3) $\alpha=\varepsilon=0.01$; $\rho^d=0.99$; $\rho^{sp}=0.00$.

Выбор подобных характеристик обусловлен тем, что эти варианты

должны привести к практически одинаковым значениям средних температур поверхностей куба по времени. Наличие зеркальной составляющей в вариантах 1 и 2 приводит к необходимости использовать зеркально-диффузное приближение. Количество испытаний во всех расчётах зададим равным 20000.

Изменение температуры поверхности по времени τ для девяти решений приведено на рис.5. Сплошным кривым соответствуют три решения по VF_1M, три решения по КПП2 и решение для диффузного варианта по КПП1, пунктирным – два решения по методу МК КПП1. Видно, что первые семь решений практически совпадают. Это говорит о согласованности результатов алгоритмов диффузного приближения VF_1M и КПП1, а также зеркально-диффузных по VF_1M и КПП2. Решения по КПП1 методом МК в зеркально-диффузном приближении запаздывают по времени, что, скорее всего, вызвано потерей энергии при определении лучистых связей, так как сумма разрешающих коэффициентов может существенно превышать единицу и методы нормирования, к которым прибегают при расчёте диффузных УК, для разрешающих УК не подходят. Похожая ситуация наблюдается и в КПП2, если в задаваемых параметрах расчётов ограничить количество переотражений при трассировке лучей так, что часть энергии луча останется потерянной. Однако алгоритмы, использующие лучистые связи, позволяют сохранять баланс энергии, несмотря на наличие ошибок в рассчитанных величинах лучистых потоков, что в ряде случаев не позволяет пользователю оценить величину погрешности результатов.

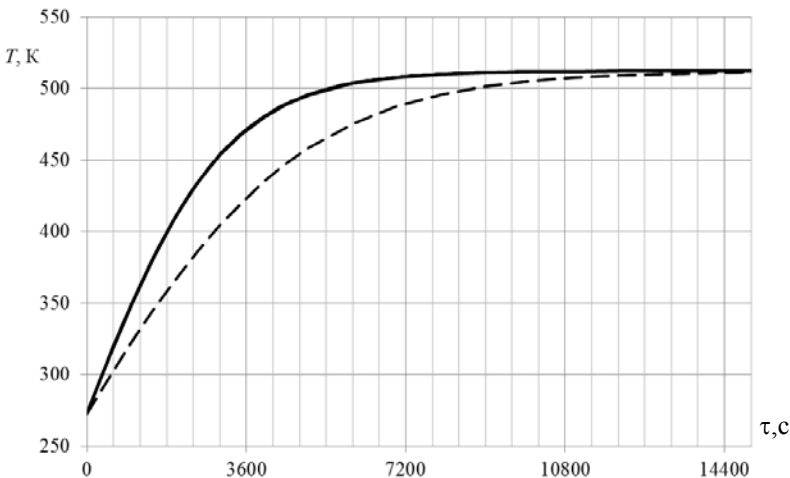


Рис.5. Температуры поверхности куба по вариантам расчёта.

Теоретическое значение для температуры установления равно $T = \sqrt[4]{(T_1^4 + T_1^4)/2} \approx 512.24$ К. Расчётные значения приведены в табл.2.

Таблица 2. Температуры установления по расчётным вариантам.

Программный продукт	$\rho^d=0.98; \rho^{sp}=0.01$	$\rho^d=0.01; \rho^{sp}=0.98$	$\rho^d=0.99$
КПП1	512.16	511.9	512.08
КПП2	512.67	512.26	512.65
VF_1M	512.23	512.24	512.24

Различия в результатах, полученных по упомянутым алгоритмам, также затронули поле температур. Распределение температур по зонам для вариантов $\rho^d=0.01; \rho^{sp}=0.98$ приведено на рис.6. Слева – расчет по КПП1, по середине – по КПП2, справа – по VF_1M.

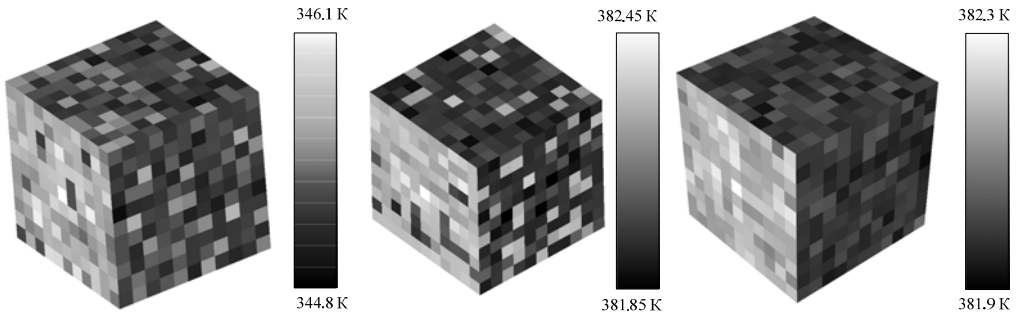


Рис.6. Распределение температур в момент времени 1500 с по трём методам при $\rho^d=0.01; \rho^{sp}=0.98$.

Во всех вариантах можно видеть влияние зеркального характера отражений – температуры торцевых граней выше температур боковых граней. Также присутствует неравномерность температур. Диапазон значений температур, приведённых на рисунке (а следовательно, неравномерность) в КПП1 равна 1.3 К, в КПП2 – 0.6 К, а в VF_1M – 0.4 К. При этом средние температуры составили 345.5, 382.1 и 382.1 К соответственно.

Распределение температур по зонам для вариантов $\rho^d=0.98; \rho^{sp}=0.01$ приведено на рис.7.

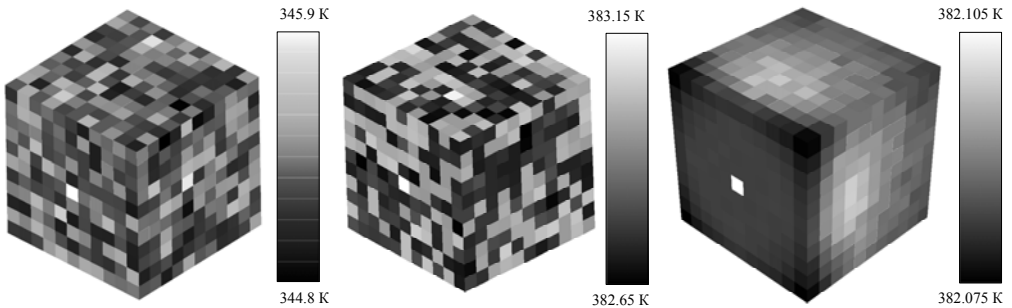


Рис.7. Распределение температур в момент времени 1500 с по трём методам при $\rho^d=0.98; \rho^{sp}=0.01$.

В варианте, рассчитанном по VF_1M, четко заметно преобладание диффузных переотражений, в то время как в вариантах по КПП1 и КПП2 присутствует некий вероятностный характер распределения потоков. Неравномерность температур в КПП1 составила 1.1 К, в КПП2 – 0.5 К, а в VF_1M – менее 0.03 К. При этом средние температуры составили 345.3, 382.9 и 382.1 К соответственно, что в случаях КПП1 и КПП2 не совпадает с соответствующими вариантами при $\rho^d=0.01$, $\rho^{sp}=0.98$. По результатам расчётов видно, что предложенный автором алгоритм приводит к получению более гладкого поля температур.

6. Выводы

Численные методы, реализующие зеркальное отражение, реализованы в различных программных продуктах по-разному, и говорить о точности и достоверности метода можно только зная особенности его реализации. Непосредственный расчёт разрешающих УК методом МК при наличии зеркального отражения приводит к ухудшению в учёте диффузных переотражений лучистых потоков. Предложенный автором алгоритм определения лучистого теплообмена, реализованный в решателе VF_1M, основан на том, что разрешающие УК рассчитываются через полуразрешающие УК поглощенного излучения. При этом производится определение диффузного УК с одновременной трассировкой лучей для вычисления зеркальной составляющей полуразрешающего УК. Это позволяет учитывать зеркальный характер отражений при одновременном учёте диффузных переотражений с той же точностью, что и в диффузном приближении.

Показано, что способ аппроксимации геометрической модели оказывает существенное влияние на результаты расчёта результирующих потоков излучения в системе тел с зеркально-диффузным характером отражения. Аппроксимация поверхностей второго порядка плоскими зонами может приводить к драматическому перераспределению энергии в системе поверхностей. Для адекватного воспроизведения физической картины зеркального отражения необходимо использовать уравнения этих поверхностей, что может быть получено введением в расчётную модель суперэлементов (поверхностей второго порядка с параметрически заданными границами).

При использовании зеркально-диффузного приближения необходимо тщательно проанализировать особенности моделируемой конструкции, выбрать расчетный алгоритм, а также способ аппроксимации геометрической модели для того, чтобы результаты действительно оказались близкими к реальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *John R. Howell, M. Pinar Mengüç, Robert Siegel.* Thermal radiation heat transfer – 6th ed. – Boca Raton; London; New York: CRC press; Taylor & Francis Group, 2016, 970, [34] p. – ISBN 978-1-4987-5774-4.
2. *E.R.G. Eckert, E.M. Sparrow.* Radiative heat exchange between surfaces with specular reflection // *IJHMT*, 1961, v.3, Iss.1, p.42-54.
3. *S. Lucas.* Verification of RadCAD: Specular Capabilities // *Proceedings of the Eighth Annual Thermal and Fluids Analysis Workshop*, 1997, 15 p.
4. *L. Maricic Lina, A. Louis.* The Effect of Solar Specularity and Ray-Tracing Modeling in NX Thermal Solver on Thermal Analysis of SWOT Mission // *Thermal and Fluids Analysis Workshop Proceedings*. Huntsville. August 21–25, 2017.
5. *J.R. Howell.* The Monte Carlo Method in Radiative Heat Transfer // *Journal of Heat Transfer*, 1998, v.120, p.547-560.
6. *P. Vueghs.* Innovative Ray Tracing Algorithms for Space Thermal Analysis. – PhD thesis, University of Liège, 2009, 253 p.
7. *И.М. Соболев.* Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973, 312 с.;
I.M. Sobol. Chislennyye metody Monte-Karlo. – М.: Nauka, 1973, 312 s.
8. *P.P. Almazan.* Accuracy Control in MonteCarlo Radiative Calculations // *Fifth Annual Thermal and Fluids Analysis Workshop, NASA Conferen. Publicat.* 10122, 1993, p.47-62.
9. *Д.К. Винокуров.* Программа расчёта угловых коэффициентов излучения и лучистых потоков от внешних источников излучения в зеркально-диффузном приближении методом Монте-Карло – VF_1M V2.0, ФАП РКТ, 2016, Рег. № 4244.
D.K. Vinokurov. Programma rascheta uglovykh koeffitsientov izlucheniia i luchistykh potokov ot vneshnikh istochnikov izlucheniia v zerkalno-diffuznom priblizhenii metodom Monte-Karlo – VF_1M V2.0, FAP RKT, 2016, Reg. №4244.
10. *B. Gebhart.* Heat transfer / Benjamin Gebhart. – New York; Toronto; London: McGraw-Hill Book Company, Inc.: 1961, 454, [10] p.
11. *А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков.* Теплообмен излучением. – М.: Энергоатомиздат, 1991, 432 с.;
A.G. Blokh, Yu.A. Zhuravlev, L.N. Ryzhkov. Teploobmen izlucheniem. – М.: Energoatomizdat, 1991, 432 s.
12. *Э.М. Спэрроу, Р.Д. Сесс.* Теплообмен излучением: Пер. с англ. под ред. А.Г. Блоха. – Л.: Энергия, 1971, 295 с.;
E.M. Sparrow, R.D. Cess. Radiation Heat Transfer– Belmont: Brooks/Cole Publ, 1970.
13. *Д.К. Винокуров.* Применение областей взаимооблучённости при расчёте лучистого теплообмена космического аппарата сложной формы // *Космонавтика и ракетостроение*, 2017, вып. 5(98), с.93-103;
D.K. Vinokurov. Primenenie oblastei vzaimoobluchennosti pri raschete luchistogo teploobmena kosmicheskogo apparata slozhnoi formy // *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2017, вып. 5(98), с.93-103.

Поступила в редакцию 26.02.2018

После доработки 26.02.2018

Принята к публикации 17.05.2018