



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ ИУ «Информатика и системы управления»

КАФЕДРА ИУ-7 «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

***«Анализ методов и алгоритмов трассировки лучей в
задачах расчета переноса селективного излучения в
осветительных системах с высокотемпературными
неоднородными средами»***

Студент ИУ7-11М
 (Группа)

(Подпись, дата)

Золотухин А. В.
(И.О.Фамилия)

Руководитель

(Подпись, дата)

Градов В. М.
(И.О.Фамилия)

2024 г.

РЕФЕРАТ

Научно-исследовательская работа представляет собой анализ существующих методов расчета излучения, а именно: метода на основе алгоритма трассировки лучей, метода дискретных ординат, зонального метода, диффузионного приближения. Также в работе представлена классификация описанных методов по выделенным критериям.

Ключевые слова: перенос излучением, лучистый теплообмен, трассировка лучей, метод дискретных ординат, зональный метод, диффузионное приближение.

Расчетно-пояснительная записка к научно-исследовательской работе содержит 17 страниц, 1 таблицу, 8 источников, 5 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Аналитический раздел	7
1.1 Описание предметной области переноса излучения	7
1.2 Метод на основе трассировке лучей	9
1.3 Зональный метод	11
1.4 Метод дискретных ординат	12
1.5 Приближение оптически толстого слоя (диффузионное при- ближение)	13
1.6 Классификация методов задач расчета переноса селективно- го излучения	14
1.7 IDEF0-диаграмма нулевого уровня	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	16
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	17

ВВЕДЕНИЕ

Лучистый перенос энергии играет существенную роль в высокотемпературных газодинамических процессах. Принято считать, что характерной температурой газа, при которой его тепловое излучение начинает заметно влиять на теплообмен, является температура около 10^4 К. При очень высоких температурах излучение вещества влияет и на его динамику. К таким явлениям относятся, например, процессы в звездных атмосферах, вхождение летательных аппаратов в атмосферу, сильноточные электрические разряды, лазерная плазма [1] [2]. В настоящее время актуальным является создание мощных источников ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения для проектирования новых технологий наноиндустрии, управляемого термоядерного синтеза, лабораторной астрофизики и фундаментальных исследований свойств вещества в экстремальных условиях. Для всех этих задач востребованным является высокоточное предсказательное моделирование, учитывающее геометрию конструкций и реальные свойства материалов. При выполнении такого рода расчетов в большинстве случаев необходимо решать связанные радиационно-газодинамические задачи, т.к. газодинамические параметры формируются под влиянием радиационного теплопереноса, а поле теплового излучения зависит от лучеиспускательной способности газа и его прозрачности. Повсеместное активное внедрение высокопроизводительной вычислительной техники позволяет делать такие расчеты серийными и тем самым является важным фактором успешного практического использования радиационно-газодинамических моделей в анализе экспериментальных данных об излучающих средах и при разработке новых технологий с применением источников излучений.

Цель научно-исследовательской работы: анализ методов и алгоритмов трассировки лучей в задачах расчета переноса селективного излучения в осветительных системах с высокотемпературными неоднородными средами.

Задачами данной научно-исследовательской работы являются:

- ввести основные понятия предметной области переноса селективного излучения в высокотемпературных неоднородных средах;
- описать алгоритмы трассировки лучей в осветительных системах, со-

держащих объемно излучающие и поглощающие элементы;

- сформулировать критерии сравнения методов;
- провести критический анализ существующих методов решения задач расчета переноса селективного излучения в высокотемпературных неоднородных средах.

1 Аналитический раздел

В данном разделе представлено описание предметной области, описание метода основанного на алгоритме трассировки лучей, описание метода дискретных ординат, описание приближения оптически толстого слоя, описание зонального метода. Представлена сравнительная таблица методов. Результатом данного раздела является IDEF0-диаграмма нулевого уровня.

1.1 Описание предметной области переноса излучения

Излучение характеризуется частотой колебаний электромагнитного поля ν или длиной волны λ , связанной с частотой через скорость света c : $\lambda = \frac{c}{\nu}$ [3]. С квантовой точки зрения излучение рассматривается как совокупность неких частиц, фотонов или световых квантов, энергия которых связана с частотой эквивалентного поля посредством постоянной Планка $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг \cdot сек. Температуре T в 1 электрон-вольт соответствует энергия $kT = 1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг, где $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град есть постоянная Больцмана.

Электромагнитное поле или световые кванты обладают не только энергией, но и импульсом. Импульс кванта $h\nu$ по абсолютной величине равен $h\nu/c$. Направление движения кванта совпадает с вектором потока энергии поля — вектором Пойнтинга.

Поле излучения, заполняющего пространство, описывается распределением интенсивности излучения по частотам, в пространство и по направлениям переноса лучистой энергии. Если говорить об излучении как о совокупности частиц — световых квантов, то поле можно охарактеризовать функцией распределения квантов, которая аналогична функции распределения любых частиц. Пусть $f(\nu, r, \Omega, t)d\nu dr d\Omega$ есть число световых квантов в спектральном интервале от ν до $\nu + d\nu$, находящихся в момент t в элементе объема dr около точки r и имеющих направление движения в элементе телесного угла $d\Omega$ около единичного вектора Ω . Функция f называется функцией распределения.

Каждый квант обладает энергией $h\nu$ и движется со скоростью , по-

тому величина

$$I_\nu(r, \Omega, t) d\nu d\Omega = h\nu c f(\nu, r, \Omega, t) d\nu d\Omega$$

есть количество лучистой энергии в спектральном интервале $d\nu$, протекающей в 1 сек через площадку в 1 см^2 , помещенную в точку перпендикулярно к направлениям распространения энергии, которые лежат в элементе телесного угла $d\Omega$ около вектора Ω . I_ν называют спектральной интенсивностью излучения. Количество лучистой энергии частоты ν , заключенной в единичном интервале частот и находящейся в 1 см^2 пространства в точке r в момент t , или спектральная плотность излучения, равно:

$$U_\nu(r, t) = h\nu \int_{(4\pi)} f d\Omega = \frac{1}{c} \int_{(4\pi)} I_\nu d\Omega \quad (1.1)$$

Спектральный поток энергии через площадку с нормалью n равен

$$F_\nu(r, t, n) = h\nu c \int_{(4\pi)} f \cos \vartheta d\Omega = \int_{(4\pi)} I_\nu \cos \vartheta d\Omega \quad (1.2)$$

Уравнение переноса излучения

$$\frac{1}{c} \frac{dI_\nu}{dt} + \Omega \nabla \cdot I_\nu = k_\nu (I_{\nu p} - I_\nu) \quad (1.3)$$

представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных относительно интенсивности, как функции координат, времени и направления $I_\nu(r, t, \Omega)$ и описывает поле неравновесного излучения. Обычно термодинамическое равновесие в самом веществе устанавливается весьма быстро, так что вещество можно считать термодинамически равновесным в каждой точке пространства и в каждый момент времени. Состояние вещества при этом характеризуется двумя параметрами, например температурой и плотностью. Уравнение переноса излучения включает в себя величины, зависящие от рода и состояния вещества: коэффициент поглощения k_ν , который зависит от свойств вещества, его температуры и плотности, и равновесную интенсивность $I_{\nu p}$, которая есть функция только температуры.

1.2 Метод на основе трассировке лучей

Метод расчета радиационно-газодинамических моделей на основе трассировке лучей является точным методом. Идея метода состоит в том, что с площадки испускается семейство лучей. Начальные лучи изображены на рисунке 1.1.

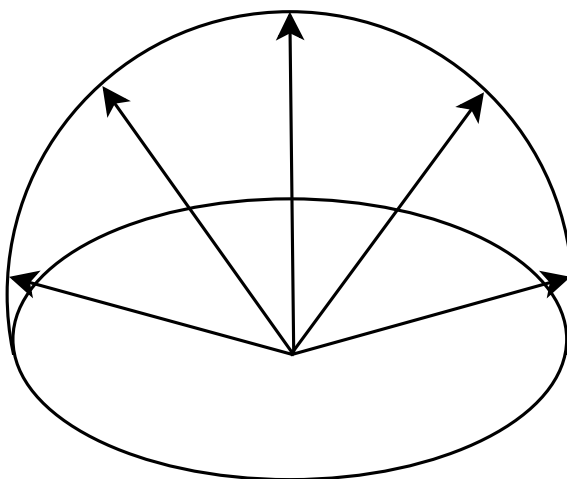


Рисунок 1.1

Каждый луч характеризуется направлением \vec{r} , начальной точкой \vec{r}_0 и интенсивностью I . Точка принадлежащая лучу рассчитывается по формуле (1.4)

$$\vec{R}(t) = \vec{r}_0 + \vec{r} \cdot t \quad (1.4)$$

Каждый луч отслеживается до момента пока не выйдет из системы, поглотится в атмосфере или рассеется. На своем пути луч может отражаться от поверхностей и преломляться, в следствии чего порождать новые лучи. Пример пути луча показан на рисунке 1.2.

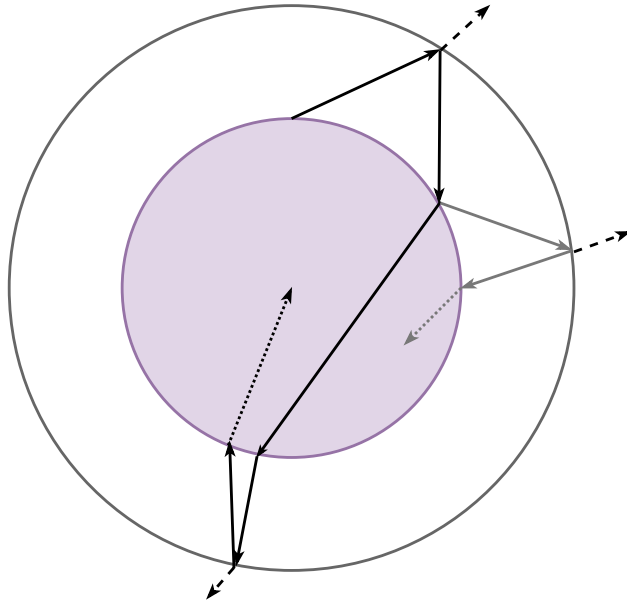


Рисунок 1.2 – Путь луча

Отражение луча рассчитывается по формуле (1.5).

$$\vec{R} = 2\vec{n}(\vec{n} \cdot \vec{L}) - \vec{L} \quad (1.5)$$

Пример изображен на рисунке 1.3.

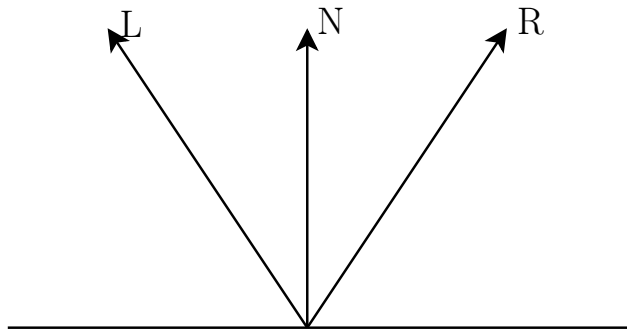


Рисунок 1.3 – Трассировка отражения

Преломление луча рассчитывается по формуле (1.6).

$$\vec{R} = n\vec{N}(\vec{N} \cdot \vec{L}) - n\vec{L} - \vec{N}\sqrt{1 + n^2((\vec{N} \cdot \vec{L}) - 1)}, \quad (1.6)$$

где n — коэффициент преломления

Пример изображен на рисунке 1.4.

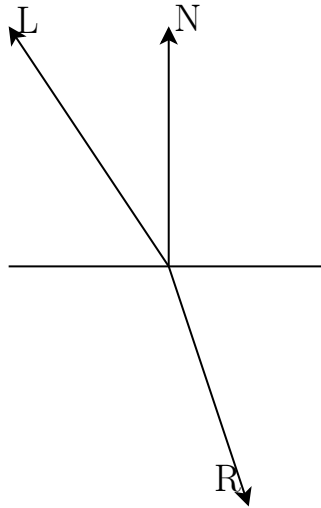


Рисунок 1.4 – Трассировка преломления

1.3 Зональный метод

Идея зональных методов расчета заключается в разбиении всех твердых поверхностей на дискретные участки (поверхностные зоны), а газовых объемов – на конечные объемы (объемные зоны), в пределах которых температуру, тепловые потоки и радиационные свойства тел можно считать постоянными [4][5]. Разобьем поверхность, ограничивающую газ на m поверхностных зон, а газовый объем – на n объемных зон. Для каждой зоны находим тепловой поток по заданной температуре.

При решении задач радиационного теплообмена зональными методами наряду с угловыми коэффициентами излучения используют обобщенные угловые коэффициенты и разрешающие угловые коэффициенты.

Обобщенные угловые коэффициенты используют для установления функциональной связи падающего и эффективного радиационных тепловых потоков в классическом зональном методе. Обобщенным угловым коэффициентом излучения (коэффициентом облученности) называют величину, которая определяет долю лучистой энергии, приходящей на данное тело с другого тела с учетом ослабления (поглощения и рассеяния) энергии лученепрозрачным газом, расположенным между телами. Таким образом, обобщенный угловой коэффициент характеризует взаимное расположение тел в пространстве и учитывает частичное поглощение (при отсутствии рассеяния) лучистой энергии газом в процессе радиационного теплообме-

на.

Разрешающие угловые коэффициенты используют для установления функциональной связи результирующего и собственного радиационных тепловых потоков в резольвентном зональном методе. Разрешающим угловым коэффициентом излучения (коэффициентом облученности) называют величину, которая определяет долю лучистой энергии, приходящей на данное тело с другого тела с учетом всех переотражений от поверхностных зон и поглощений энергии лученепрозрачным газом. Таким образом, разрешающий угловой коэффициент характеризует взаимное расположение тел в пространстве, учитывает все переотражения и частичное поглощение лучистой энергии газом в процессе радиационного теплообмена.

1.4 Метод дискретных ординат

Метод дискретных ординат (МДО) [6] считается самым быстрым численным методом теории переноса излучения. МДО применим как для рассеянного солнечного, так и для теплового излучения. Более того, пожалуй, это единственный метод, эффективно работающий сразу для суммы указанных компонент излучения. В рамках МДО можно учесть все особенности отражения от поверхности. Он применим не только для изотропного, но практически для любого типа отражения.

В основе МДО лежит рассмотрение исходного дифференциального уравнения для интенсивности излучения и замены стоящего в его правой части интеграла квадратурной формулой. Т.е. изначально осуществляется переход к дискретной сетке по косинусам зенитных углов, что и объясняет название метода. Система уравнений играет важную роль в теории переноса излучения. Это система линейных дифференциальных уравнений, математические методы решения которой хорошо известны: надо найти общее решение однородной системы, выражающееся через собственные числа и векторы ее матрицы, а потом прибавить к нему частное решение неоднородной системы, что сводится к линейным уравнениям для коэффициентов решения. Но при этом реальное решение системы возможно лишь для постоянных параметров атмосферы. В важном для практических расчетов случае неоднородной атмосферы это не так. Выход состоит в том, чтобы

использовать разбиение атмосферы на слои, решить задачу для каждого однородного слоя отдельно, а потом согласовать эти решения при учете граничных условий.

В итоге получаем следующую общую схему изложения МДО:

1. Решение задачи для отдельного однородного слоя.
2. Учет отражения от поверхности.
3. Решение для всей атмосферы, т.е. согласование отдельных решений для слоев.

Главным недостатком МДО является использование разложения по азимутальным гармоникам. Более того, именно МДО является наиболее чувствительным к указанной особенности, т.к. попытки учета в его рамках необходимого числа гармоник и количества узлов интегрирования по косинусу угла рассеяния соответственно увеличивают размерность решаемой системы уравнений. А это сводит на нет главное достоинство МДО – скорость вычислений. Указанное обстоятельство приводит к необходимости компромисса между скоростью расчетов и их адекватностью физической реальности.

Существенный недостаток МДО состоит в том, что этот метод является чисто математическим. В отличие от всех других численных методов теории переноса его операциям нельзя приписать физический смысл. Вообще говоря, это затрудняет отладку алгоритмов и кодов МДО, анализ результатов вычислений и их сравнение с расчетами по другим методам.

1.5 Приближение оптически толстого слоя (диффузионное приближение)

Среда называется оптически толстой [7], если средняя длина свободного пробега фотона (т.е. величина, обратная коэффициенту ослабления) мала по сравнению с ее характерным размером. Это приближение, известное также под названием приближения Росселанда, или диффузионного

приближения, впервые было предложено Росселандом [8]. Главное преимущество этого приближения состоит в том, что оно дает очень простое выражение для плотности потока результирующего излучения.

Ограничения в использовании диффузионного приближения. Оно справедливо внутри среды, но неприменимо вблизи границ. Оно не дает полного описания физического процесса вблизи границ, так как не включает в рассмотрение члены, учитывающие излучение от граничных поверхностей. Однако внутри оптически толстой области влияние граничных эффектов пренебрежимо мало, поскольку излучение, испускаемое граничными поверхностями, не достигает внутренних слоев.

При практическом использовании диффузионное приближение обладает существенным недостатком таким что, если среда не является оптически толстой, или толщина слоя не составляет нескольких длин свободного пробега фотонов, величина плотности потока результирующего излучения может быть определена с большой ошибкой.

1.6 Классификация методов задач расчета переноса селективного излучения

1. Применимость к неоднородным по температуре средам.
2. Ресурсы.
3. Точность.
4. Применимость к моделированию сложных оптических систем.
5. Применимость к условиям отражения излучения на границе

В таблице 1.1 приведена классификация по выделенным критериям.

Таблица 1.1 – Сравнение методов расчета переноса излучения

Метод	1	2	3	4	5
Трассировка лучей	да	медленный, но может быть распараллелен	точный	да	да
МДО	нет	быстрый	точный	да	да
Диффузионное приближение	да	быстрый	приближенный	нет	да
Зональный метод	да	медленнее, чем МДО	точный	нет	да

Метод на основе трассировки лучей является точным методом, что важно при построении, физических моделей. Он применим при построении сложных оптических моделей и при построении моделей неоднородных по температуре средами. Также для неоднородной среды он работает быстрее чем метод дискретных ординат.

1.7 IDEF0-диаграмма нулевого уровня

На рисунке 1.5 представлена IDEF0-диаграмма нулевого уровня.

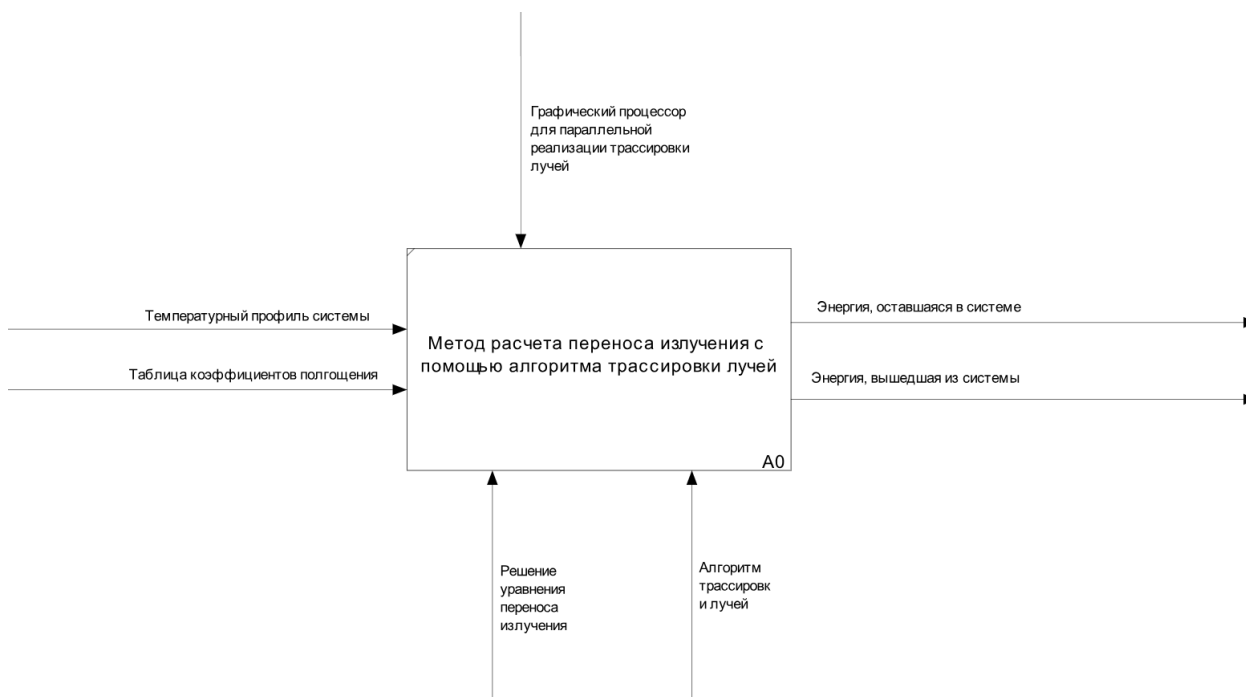


Рисунок 1.5 – IDEF0-диаграмма нулевого уровня

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленная цель была достигнута: проведен анализ методов и алгоритмов трассировки лучей в задачах расчета переноса селективного излучения в осветительных системах с высокотемпературными неоднородными средами.

В ходе выполнения научно-исследовательской работы были решены следующие задачи:

- введены основные понятия предметной области переноса селективного излучения в высокотемпературных неоднородных средах;
- описан алгоритм трассировки лучей в осветительных системах, содержащих объемно излучающие и поглощающие элементы;
- сформулированы критерии сравнения методов;
- проведен критический анализ существующих методов решения задач расчета переноса селективного излучения в высокотемпературных неоднородных средах;

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Михалас Д., Михалас Б. В. Основы радиационной гидродинамики. Нью-Йорк: Издательство Оксфордского университета, 1984 - 731 с.
2. Четверушкин Б. Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. М.: Наука, 1985 – 304 с.
3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 2008.
4. Бухмиров В.В., Солнышкова Ю.С. Зональные методы расчёта радиационного и сложного теплообмена/ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». - Иваново, 2012 .— 96 с.
5. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей./ В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990.
6. Численные методы теории переноса излучения / А.В. Васильев, В.П. Огибалов, Ю.М. Тимофеев — СПб., 2016. — 256 с.
7. Сложный теплообмен / М. Н. Оцисик — Университет штата Северная Каролина, 1973. — 615 с.
8. Росселанд С. Теоритическая астрофизика. Лондон: Издательство Оксфордского университета, 1936.