

## МЕТОДЫ МОНТЕ-КАРЛО В ЗАДАЧАХ РАСЧЕТА НАПРАВЛЕННОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ СТРУЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

С.Т. Суржиков

*Институт проблем механики Российской академии наук, Москва*

### Аннотация

Представлены результаты тестирования компьютерных кодов Plume-2D-MC и Plume-3D-MC, предназначенных для расчета спектральной направленной излучательной способности (сигнатуры) струй продуктов сгорания, различных нагретых объемов газа со светорассеивающими частицами и для предсказания степени ослабления этого излучения атмосферными газами на большом расстоянии наблюдения.

Указанные вычислительные коды реализуют различные алгоритмы имитационного моделирования переноса теплового излучения и различные спектральные модели теплового излучения нагретых газов.

С использованием указанных кодов выполнено моделирование экспериментальных данных исследовательской группы ERIM по спектральной излучательной способности нагретых газов  $H_2O/N_2$ .

### MONTE-CARLO METHODS FOR PREDICTION OF DIRECTIONAL EMISSIVITY OF PLUMES

Numerical simulation data on verification of computer codes Plume-2D-MC and Plume-3D-MC, which are intended for prediction of spectral directional emissivity (signature) of plumes combustion product are presented. The codes allow take into account light scattering and attenuation of heat radiation in ambient atmosphere. The codes realize different algorithms of numerical simulation and use different spectral optical models. Experimental data of scientific group ERIM are analyzed with the codes.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Задача нахождения направленной излучательной способности излучающих объектов имеет следующие особенности: первая из них связана с пространственным характером переноса излучения, а вторая – с сильной зависимостью оптических свойств излучающего объема и окружающей среды от длины волны излучения.

Задачи расчета направленной излучательной способности удобно разделить на два класса. К первому классу относятся задачи предсказания направленной излучательной способности (сигнатур) излучающих объемов (струй продуктов сгорания ракетных двигателей, сжатого слоя и следа вблизи космического аппарата, продуктов сгорания топлива в энергетических установках и т.п.). При расчете сигнатур, излучение объема (или его частей) необходимо предсказать на очень большом расстоянии  $L \gg D$ , где  $D$  есть характерный размер излучающего объема. В этом случае можно считать все исходящие из объема лучи параллельными. Второй класс задач, когда излучение от объема необходимо определить в непосредственной близости от него, также исключительно важен для задач теплоэнергетики и ракетно-космической техники. В этом случае необходимо учитывать взаимное расположение каждого элементарного излучающего объема и площадки, на которой регистрируется излучение.

Учет спектральной зависимости оптических свойств является одной из наиболее сложных проблем современной теории переноса теплового излучения. Классической задачей теории радиационного теплообмена является, как известно, определение лучистых тепловых потоков на заданных поверхностях. В этом случае селективные оптические свойства сред должны быть учтены настолько подробно, насколько это необходимо для решения исходной

задачи. Как правило, достаточно рассмотреть несколько десятков спектральных диапазонов.

При расчете сигнатур излучающих объемов в инфракрасном спектральном диапазоне  $\Delta\Omega = 2000 \div 5000 \text{ см}^{-1}$ , в котором переносится основная часть энергии теплового излучения продуктов сгорания, необходимо учитывать не менее 100–150 спектральных диапазонов. Несложно убедиться в том, что типичный спектральный диапазон в этом случае составляет  $\Delta\omega_g \approx 20 \div 50 \text{ см}^{-1}$ . Это означает, что учитываемый спектр поглощения и испускания усреднен, так как в каждом спектральном диапазоне присутствует несколько сот вращательных линий молекулярного спектра, в каждой из которых спектральный коэффициент поглощения изменяется в  $10\text{--}10^3$  раз. В этом случае используются либо модели усредненного по вращательной структуре спектра поглощения и испускания, либо более точные статистические модели спектра вращательных линий. Однако применение статистических моделей для решения задач переноса теплового излучения в двух- и трехмерных постановках является весьма сложной вычислительной задачей.

Проблема расчета спектральной направленной излучательной способности произвольной трехмерной конфигурации струй продуктов сгорания решена в работах [1–4] с использованием ряда алгоритмов имитационного моделирования, основанных на методе Монте-Карло, и различных спектральных оптических моделей нагретых газов.

В данной работе с использованием двумерного и трехмерного программных кодов Plume-2D-MC и Plume-3D-MC [3] решена задача определения спектральной направленной излучательной способности объемов нагретых газов, для которой имеются экспериментальные данные.

## 2. ПОСТАНОВКА, МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема экспериментов [5] по изучению излучения нагретых объемов горячих газов показана на рис. 1.

Указанные эксперименты были выполнены в институте исследования окружающей среды штата Мичиган США (Invironmental Research Institute of Michigan), поэтому часто они называются экспериментами ERIM. В этих экспериментах внутри замкнутой цилиндрической камеры радиусом 30 см и высотой 60 см нагревались различные смеси газов ( $H_2O/N_2$ ) и ( $CO_2/N_2$ ) в различных пропорциях. Экспериментально исследовалась спектральная излучательная способность этих смесей газов в направлении вдоль оси симметрии ( $\theta=0$ ). Причем, в части экспериментов изучалась спектральная направленная излучательная способность газов непосредственно на выходе из цилиндрического объема, а в части экспериментов моделировалось прохождение излучения через холодный атмосферный газ.

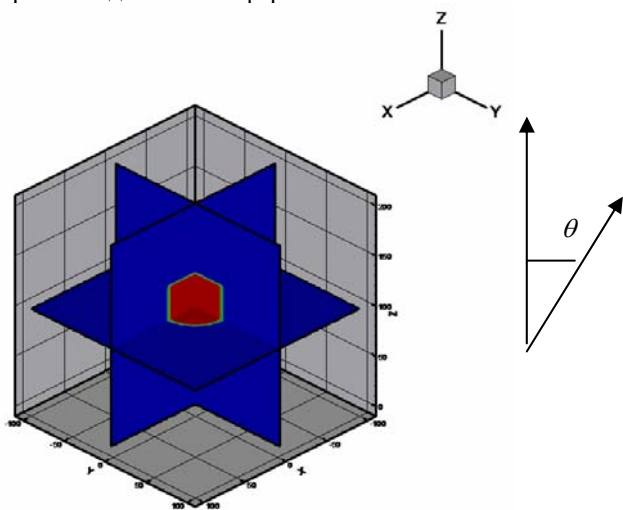


Рис.1. Схема экспериментов ERIM: измерение спектральной направленной излучательной способности однородного объема нагретого газа вдоль оси  $z$  (угол наблюдения  $\theta=0$ )

По аналогии с физическими экспериментами, были выполнены две серии численных экспериментов. В первой серии изучалось испускание смеси газов  $H_2O/N_2$  непосредственно у выхода из горячего объема, а во второй серии – учитывалось ослабление излучения холодным атмосферным газом. Два компьютерных кода, Plume-2D-МС и Plume-3D-МС показали одинаковые результаты. Первый из упомянутых кодов предназначен для расчета направленной излучательной способности двумерных осесимметричных объемов, а второй (Plume-3D-МС) – для расчета направленной излучательной способности произвольных пространственных объемов. Подчеркнем, что в указанных кодах реализованы различные алгоритмы имитационного моделирования, поэтому, несмотря на очевидную простоту расчетной схемы экспериментов ERIM, полученные результаты являются важным свидетельством в пользу разработанных и реализованных алгоритмов.

В первой и во второй серии расчетов смесь газов  $H_2O/N_2$  (в мольных долях  $x_{H_2O} = 0.5$ ,  $x_{N_2} = 0.5$ ) нагревалась в цилиндрическом объеме до температуры

$T = 1202$  К при давлении  $p = 0.1$  атм. Эти условия соответствуют экспериментам Test-9R [5]. Заметим, что из-за отсутствия светорассеяния радиус излучающего цилиндрического объема не должен влиять на его излучающую способность, измеренную вдоль оси симметрии. Тем не менее, радиус излучающего цилиндра полагался в расчетах таким же как в экспериментах,  $R_{hc} = 30$  см.

Результаты численного моделирования спектральной излучательной способности для условий эксперимента Test-9R показаны на рис. 2. Оптические свойства нагретых паров воды рассчитывались по модели инфракрасного излучения NASA [6], в которой вращательная структура испускания и поглощения была усреднена в спектральном диапазоне  $\Delta\omega = 25$   $cm^{-1}$ . Расчеты выполнены в спектральном диапазоне  $\Delta\Omega = 3000 \div 4200$   $cm^{-1}$  с тем же самым спектральным разрешением. На рис. 2 показаны также результаты измерений интенсивности излучения после его прохождения через толщину холодного атмосферного газа (на расстоянии 20 км при давлении 0.1 атм). Эти экспериментальные данные будут обсуждаться ниже. Из рис. 2 видно, что использование имитационной модели Монте-Карло совместно с моделью усредненного по вращательной структуре коэффициента поглощения, позволяет с хорошей точностью предсказать экспериментальные данные по излучению горячего объема исследованной смеси газов, которые были получены в непосредственной близости от излучающего объема.

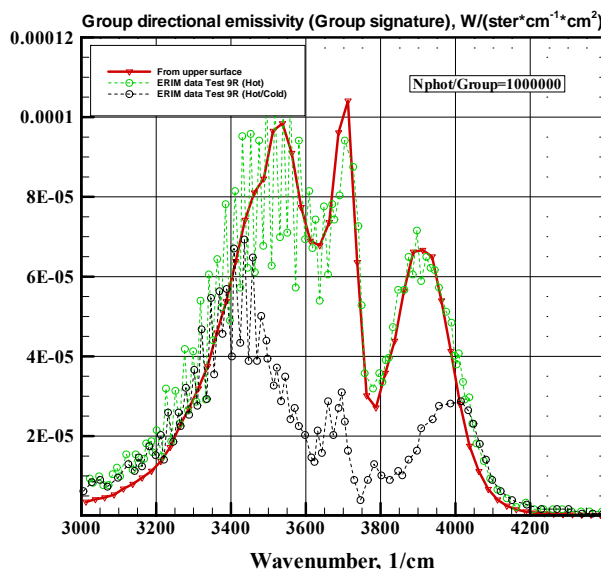


Рис. 2. Спектральная направленная излучательная способность однородного цилиндрического объема, К и давлении  $p = 0.1$  атм; сплошная кривая – расчеты методом Монте-Карло, верхняя пунктирная кривая – эксперимент ERIM (Test 9R) вблизи излучающего объема (без учета поглощения в холодном газе); нижняя пунктирная кривая – эксперимент ERIM (Test 9R) вдали от излучающего объема (с учетом поглощения в холодном газе). Число фотонов в одной спектральной группе – 100000. Оптическая модель инфракрасного излучения NASA

В настоящей работе выполнены также расчеты прохождения теплового излучения сквозь атмосферный газ.

Результаты расчетов спектральной излучательной способности смеси газов  $H_2O/N_2$  для условий эксперимента Test-9R, когда излучение фиксировалось после прохождения толщи холодной атмосферы, показаны на рис.3 и 4. В первом случае расчеты проводились классическим методом Монте-Карло с использованием многогруппового описания спектра коэффициента поглощения, который рассчитывался усреднением по вращательной структуре [3,6]. Из рис. 3 отчетливо видно, что данная методика расчетов приводит к значительной погрешности вычислений. В расчетах слой холодного газа оказывается более оптически толстым, чем в реальности.

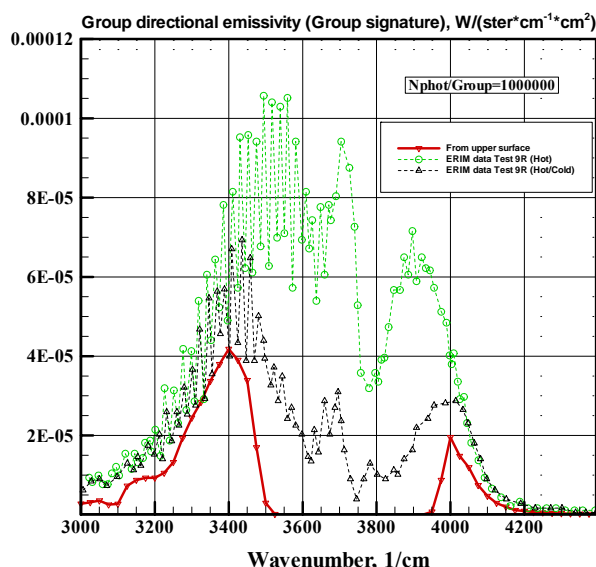


Рис. 3. Спектральная направленная излучательная способность однородного цилиндрического объема, содержащего смесь газов  $H_2O/N_2$  при температуре  $T=1202$  К и давлении  $p=0.1$  атм; сплошная кривая – расчеты методом Монте-Карло излучения, прошедшего сквозь толщу атмосферы (использовалась модель усредненного по вращательной структуре коэффициента поглощения), верхняя пунктирная кривая – эксперимент ERIM (Test 9R) вблизи излучающего объема (без учета поглощения в холодном газе); нижняя пунктирная кривая – эксперимент ERIM (Test 9R) вдали от излучающего объема (с учетом поглощения в холодном газе). Число фотонов в одной спектральной группе – 100000. Оптическая модель инфракрасного излучения NASA

Во втором случае расчеты выполнены с использованием имитационного метода Монте-Карло совместно со статистической моделью вращательных линий (т.е. с учетом тонкой вращательной структуры спектра), изложенной в работе [1,3]. Сравнение экспериментальных и расчетных кривых на рис. 4 показывает то, что гибридная модель Монте-Карло, в которой вращательная структура спектра учитывается посредством статистических моделей, вполне применима к условиям данного эксперимента при определенных условиях. Имеются участки заметного расхождения расчета с экспериментом. Возможные причины этого расхождения, вероятно, связаны с погрешностью расчета спектральных оптических свойств.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при интерпретации экспериментальных данных по прохождению излучения нагретых газов сквозь толщу холодной атмосферы необходимо учитывать линейчатую структуру молекулярного спектра. В данной работе этот учет выполнен с использованием гибридного метода Монте-Карло, в котором реализуются траектории групп фотонов и статистические модели вращательного спектра.

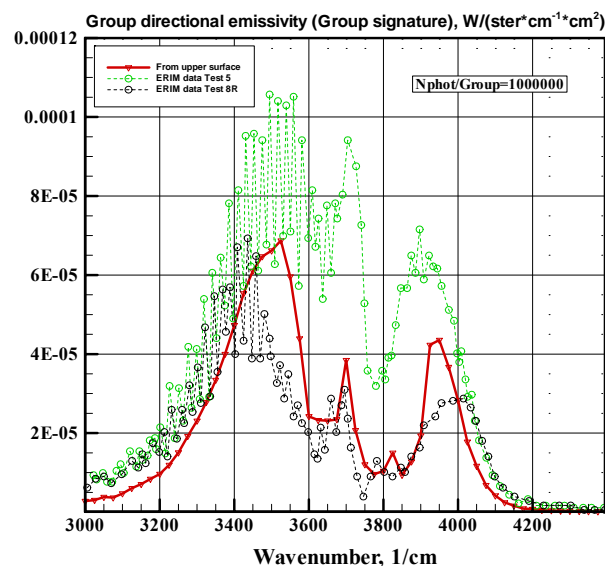


Рис. 4. Спектральная направленная излучательная способность однородного цилиндрического объема, содержащего смесь газов  $H_2O/N_2$  при температуре  $T=1202$  К и давлении  $p=0.1$  атм; сплошная кривая – расчеты гибридным методом Монте-Карло (с использованием статистических моделей полос вращательных линий), верхняя пунктирная кривая – эксперимент ERIM (Test 9R) вблизи излучающего объема (без учета поглощения в холодном газе); нижняя пунктирная кривая – эксперимент ERIM (Test 9R) вдали от излучающего объема (с учетом поглощения в холодном газе). Число фотонов в одной спектральной группе – 100000. Оптическая модель инфракрасного излучения NASA

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 07-01-00133 (разработка метода расчета переноса излучения) и по Программе фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН (развитие спектральных моделей теплового излучения для газовой динамики).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Surzhikov S.T., Howell J.R. Monte-Carlo Simulation of Radiation in Scattering Volumes with Line Structure// J. of Thermophysics and Heat Transfer, 1998, Vol. 12, No. 2, pp. 278–281.
2. Surzhikov S.T. Monte-Carlo Simulation of Plumes Spectral Emission// AIAA Paper 2003-3895, 36<sup>th</sup> AIAA Thermophysics Conference, 23-26 June 2003, Orlando, Florida
3. Суржилов С.Т. Расчет имитационными методами Монте-Карло излучения струй продуктов сгорания с учетом вращательной структуры спектра//ТВТ. 2003. Т.41. №5. С.785–799.
4. Суржилов С.Т. Пространственная модель спектральной излучательной способности светорассеивающих струй //ТВТ. 2004. Т.41. №5. С.760-771.

5. Lindquist G.H., Arnold C.B., Spellicy R.L. Atmospheric Absorption Applied to Plume Emission. Experimental and Analytical Investigations of Hot Gas Emission Attenuated by Cold Gases// Report ERIM No. 102700-20-F, AFRPL-TR-75-30. August 1975, 208 p.
6. Ludwig C.B., Malkmus W., Reardon J.E., Thomson J.A.L. Handbook Infrared Radiation from Combustion Gases. Scientific and Technical Information Office. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1973.
7. Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping .H. et al. The HITRAN Molecular Database: Editions of 1991 and
8. 1992// JQSRT, 1992, Vol.48, No.5/6, pp.469–518; Also edition of 1996 (on CD).