

СПЕКТРАЛЬНАЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ РАВНОВЕСНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДУХА В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 2000 ÷ 8000 Å

С.Т. Суржиков

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1*

Аннотация

Представлены результаты расчетов спектральной излучательной способности высокотемпературной воздушной струи высокочастотного плазмотрона. Условия в низкотемпературной плазме ($T < 7600$ К, $p = 1$ атм) отвечают термическому равновесию. Выполнено сопоставление с экспериментальными данными. Приведены профили температуры и концентраций частиц высокотемпературного воздуха по нормали к оси струи, которые рекомендуются для сравнения расчетных данных.

SPECTRAL EMISSIVITY OF HIGH TEMPERATURE AIR IN SPECTRAL REGION 2000 ÷ 8000 Å AT CONDITIONS OF LOCAL THERMODYNAMIC EQUILIBRIUM

Sergey T. Surzhikov

Institute for problems in mechanics RAS, Russia, Moscow, 119526

Numerical simulation results on spectral emissivity of high temperature air plume of inductive plasma generator are presented. Thermodynamic conditions in the plume ($T < 7600$ K, $p = 1$ atm) correspond to the Local Thermodynamic Equilibrium state. Comparison of the numerical simulation results with experimental data are performed. Temperature and high temperature air species profiles recommended for calculation data comparison are presented.

1. ВВЕДЕНИЕ

С начала работы рабочей группы Европейского космического агентства по излучению высокотемпературных газов (2003 г.) была достигнута договоренность о формулировке ряда тестовых задач, на примере которых, научные группы из разных стран Европы, Азии и США, Канады и Австралии получили возможность согласовывать свои данные. Первой тестовой задачей (так называемый Test Case #1 (ТС1)) была определена задача расчета спектральной излучательной способности струи высокочастотного плазмотрона в ограниченном спектральном диапазоне при заданном распределении температуры вдоль оптического луча и атмосферном давлении.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Тестовая задача № 1 предназначена для тестирования спектральных баз данных в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 2000 \div 8000$ Å. Экспериментальные данные получены в [1, 2] на примере анализа спектральной излучательной способности струи высокочастотного индукционного плазмотрона при атмосферном давлении. Многочисленные эксперименты показали, что химическое и термическое состояние высокотемпературного воздуха можно принять равновесным.

Измерения спектральной излучательной способности были выполнены вдоль оптического пути нормального оси струи. Аппаратная функция может аппроксимироваться трапецией с основаниями 3.42 Å и 1.7 Å, что соответствует ширине входной и выходной щели 80 мкм и 240 мкм соответственно (линейная дисперсия монохроматора принята 10.7 Å/мм при $\lambda = 6328$ Å).

Как уже отмечалось, измеренная спектральная излучательная способность отвечает излучению, испущенному всеми слоями горячего газа вдоль неоднородного оптического пути. Поэтому в расчетах необходимо провести интегрирование формального решения уравнения переноса излучения вдоль неоднородной оптической трассы. Особенностью предположенной тестовой задачи является задание температурного профиля вдоль оптического луча и распределение концентраций частиц высокотемпературного воздуха. Рекомендуемые численные значения приведены в таблице 1. Первая колонка содержит радиальные координаты (в см), вторая равновесную температуру (в К), а последующие колонки – относительные мольные концентрации компонент.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Результаты тестовых расчетов, выполненных с использованием компьютерного кода ASTEROID [3], и соответствующие экспериментальные данные показаны на рис. 1–3.

Рисунки 4 и 5 показывают примеры расчетов тонкой вращательной структуры спектра излучательной способности. Эти расчеты выполнены с целью дать представление о реальной структуре спектра, усреднение которого выполняется при сопоставлении экспериментальных и расчетных данных. В расчетах усредненной по вращательной структуре излучательной способности использовалась модель Q-ветви [3]. Использовалось предположение о синглетной структуре. Лоренцевская и доплеровская полуширины полагаются равными.

Таблица 1

Профили температуры и относительных мольных концентраций, задаваемые в тестовой задаче №1 [1]

r, см	T, К	N ₂	O ₂	NO	N	O	C	N ₂ ⁺	N ⁺	O ⁺	CN	E-
0.0	1700.	7.796E-01	2.077E-01	3.079E-03	2.612E-12	1.986E-05	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	5.762E-15
0.1	1700.	7.796E-01	2.077E-01	3.079E-03	2.612E-12	1.986E-05	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	5.762E-15
0.2	2800.	7.549E-01	1.781E-01	3.463E-02	3.003E-06	2.275E-02	3.905E-16	6.735E-18	1.000E-20	1.453E-16	5.780E-14	6.090E-09
0.3	3700.	6.778E-01	6.376E-02	5.004E-02	4.424E-04	1.993E-01	1.253E-11	4.323E-13	5.332E-15	1.227E-11	8.146E-11	1.093E-06
0.4	4260.	6.466E-01	1.515E-02	3.483E-02	3.465E-03	2.928E-01	1.031E-09	6.262E-11	5.088E-12	1.110E-09	2.544E-09	7.276E-06
0.5	4621.	6.367E-01	5.635E-03	2.552E-02	9.983E-03	3.138E-01	1.064E-08	8.308E-10	1.567E-10	1.027E-08	1.169E-08	1.858E-05
0.6	4961.	6.245E-01	2.365E-03	1.914E-02	2.362E-02	3.224E-01	7.375E-08	6.993E-09	2.599E-09	6.238E-08	4.907E-08	3.894E-05
0.7	5310.	6.023E-01	1.050E-03	1.436E-02	5.059E-02	3.238E-01	4.204E-07	4.704E-08	3.195E-08	3.128E-07	1.763E-07	7.488E-05
0.8	5513.	5.822E-01	6.734E-04	1.216E-02	7.499E-02	3.219E-01	1.051E-06	1.273E-07	1.193E-07	7.288E-07	3.439E-07	1.050E-04
0.9	5728.	5.541E-01	4.300E-04	1.016E-02	1.096E-01	3.181E-01	2.580E-06	3.370E-07	4.386E-07	1.677E-06	6.559E-07	1.457E-04
1.0	5937.	5.186E-01	2.830E-04	8.489E-03	1.522E-01	3.118E-01	5.738E-06	7.937E-07	1.398E-06	3.540E-06	1.152E-06	1.947E-04
1.1	6133.	4.802E-01	1.930E-04	7.133E-03	2.033E-01	3.063E-01	1.144E-05	1.678E-06	3.890E-06	6.843E-06	1.847E-06	2.506E-04
1.2	6315.	4.374E-01	1.361E-04	6.002E-03	2.577E-01	2.989E-01	2.048E-05	3.149E-06	9.404E-06	1.213E-05	2.701E-06	3.116E-04
1.3	6484.	3.919E-01	9.915E-05	5.053E-03	3.122E-01	2.898E-01	3.322E-05	5.342E-06	2.018E-05	1.995E-05	3.623E-06	3.774E-04
1.4	6642.	3.475E-01	7.427E-05	4.270E-03	3.662E-01	2.811E-01	4.921E-05	8.310E-06	0.911E-05	3.078E-05	4.482E-06	4.489E-04
1.5	6789.	3.054E-01	5.711E-05	3.625E-03	4.172E-01	2.727E-01	6.703E-05	1.197E-05	6.922E-05	4.485E-05	5.147E-06	5.270E-04
1.6	6924.	2.668E-01	4.507E-05	3.097E-03	4.639E-01	2.649E-01	8.464E-05	1.611E-05	1.129E-04	6.206E-05	5.534E-06	6.124E-04
1.7	7048.	2.327E-01	3.650E-05	2.667E-03	5.052E-01	2.580E-01	1.005E-04	2.041E-05	1.711E-04	8.196E-05	5.653E-06	7.059E-04
1.8	7161.	2.034E-01	3.031E-05	2.322E-03	5.406E-01	2.520E-01	1.137E-04	2.458E-05	2.427E-04	1.038E-04	5.564E-06	8.067E-04
1.9	7263.	1.788E-01	2.580E-05	2.046E-03	5.703E-01	2.470E-01	1.242E-04	2.836E-05	3.249E-04	1.266E-04	5.346E-06	9.127E-04
2.0	7352.	1.587E-01	2.249E-05	1.829E-03	5.946E-01	2.429E-01	1.321E-04	3.162E-05	4.130E-04	1.493E-04	5.072E-06	1.020E-03
2.1	7428.	1.427E-01	2.007E-05	1.661E-03	6.138E-01	2.396E-01	1.379E-04	3.428E-05	5.014E-04	1.709E-04	4.796E-06	1.125E-03
2.2	7491.	1.305E-01	1.833E-05	1.534E-03	6.284E-01	2.371E-01	1.420E-04	3.634E-05	5.836E-04	1.902E-04	4.551E-06	1.220E-03
2.3	7539.	1.216E-01	1.712E-05	1.443E-03	6.390E-01	2.353E-01	1.447E-04	3.785E-05	6.531E-04	2.060E-04	4.356E-06	1.300E-03
2.4	7571.	1.159E-01	1.637E-05	1.385E-03	6.458E-01	2.341E-01	1.464E-04	3.881E-05	7.027E-04	2.171E-04	4.225E-06	1.357E-03
2.5	7584.	1.137E-01	1.608E-05	1.363E-03	6.484E-01	2.337E-01	1.470E-04	3.918E-05	7.233E-04	2.216E-04	4.172E-06	1.380E-03
2.6	7571.	1.159E-01	1.637E-05	1.385E-03	6.458E-01	2.341E-01	1.464E-04	3.881E-05	7.027E-04	2.171E-04	4.225E-06	1.357E-03
2.7	7539.	1.216E-01	1.712E-05	1.443E-03	6.390E-01	2.353E-01	1.447E-04	3.785E-05	6.531E-04	2.060E-04	4.356E-06	1.300E-03
2.8	7491.	1.305E-01	1.833E-05	1.534E-03	6.284E-01	2.371E-01	1.420E-04	3.634E-05	5.836E-04	1.902E-04	4.551E-06	1.220E-03
2.9	7428.	1.427E-01	2.007E-05	1.661E-03	6.138E-01	2.396E-01	1.379E-04	3.428E-05	5.014E-04	1.709E-04	4.796E-06	1.125E-03
3.0	7352.	1.587E-01	2.249E-05	1.829E-03	5.946E-01	2.429E-01	1.321E-04	3.162E-05	4.130E-04	1.493E-04	5.072E-06	1.020E-03
3.1	7263.	1.788E-01	2.580E-05	2.046E-03	5.703E-01	2.470E-01	1.242E-04	2.836E-05	3.249E-04	1.266E-04	5.346E-06	9.127E-04
3.2	7161.	2.034E-01	3.031E-05	2.322E-03	5.406E-01	2.520E-01	1.137E-04	2.458E-05	2.427E-04	1.038E-04	5.564E-06	8.067E-04
3.3	7048.	2.327E-01	3.650E-05	2.667E-03	5.052E-01	2.580E-01	1.005E-04	2.041E-05	1.711E-04	8.196E-05	5.653E-06	7.059E-04
3.4	6924.	2.668E-01	4.507E-05	3.097E-03	4.639E-01	2.649E-01	8.464E-05	1.611E-05	1.129E-04	6.206E-05	5.534E-06	6.124E-04
3.5	6789.	3.054E-01	5.711E-05	3.625E-03	4.172E-01	2.727E-01	6.703E-05	1.197E-05	6.922E-05	4.485E-05	5.147E-06	5.270E-04
3.6	6642.	3.475E-01	7.427E-05	4.270E-03	3.662E-01	2.811E-01	4.921E-05	8.310E-06	0.911E-05	3.078E-05	4.482E-06	4.489E-04
3.7	6484.	3.919E-01	9.915E-05	5.053E-03	3.122E-01	2.898E-01	3.322E-05	5.342E-06	2.018E-05	1.995E-05	3.623E-06	3.774E-04
3.8	6315.	4.374E-01	1.361E-04	6.002E-03	2.577E-01	2.989E-01	2.048E-05	3.149E-06	9.404E-06	1.213E-05	2.701E-06	3.116E-04
3.9	6133.	4.802E-01	1.930E-04	7.133E-03	2.033E-01	3.063E-01	1.144E-05	1.678E-06	3.890E-06	6.843E-06	1.847E-06	2.506E-04
4.0	5937.	5.186E-01	2.830E-04	8.489E-03	1.522E-01	3.118E-01	5.738E-06	7.937E-07	1.398E-06	3.540E-06	1.152E-06	1.947E-04
4.1	5728.	5.541E-01	4.300E-04	1.016E-02	1.096E-01	3.181E-01	2.580E-06	3.370E-07	4.386E-07	1.677E-06	6.559E-07	1.457E-04
4.2	5513.	5.822E-01	6.734E-04	1.216E-02	7.499E-02	3.219E-01	1.051E-06	1.273E-07	1.193E-07	7.288E-07	3.439E-07	1.050E-04
4.3	5310.	6.023E-01	1.050E-03	1.436E-02	5.059E-02	3.238E-01	4.204E-07	4.704E-08	3.195E-08	3.128E-07	1.763E-07	7.488E-05
4.4	4961.	6.245E-01	2.365E-03	1.914E-02	2.362E-02	3.224E-01	7.375E-08	6.993E-09	2.599E-09	6.238E-08	4.907E-08	3.894E-05
4.5	4621.	6.367E-01	5.635E-03	2.552E-02	9.983E-03	3.138E-01	1.064E-08	8.308E-10	1.567E-10	1.027E-08	1.169E-08	1.858E-05
4.6	4260.	6.466E-01	1.515E-02	3.483E-02	3.465E-03	2.928E-01	1.031E-09	6.262E-11	5.088E-12	1.110E-09	2.544E-09	7.276E-06
4.7	3700.	6.778E-01	6.376E-02	5.004E-02	4.424E-04	1.993E-01	1.253E-11	4.323E-13	5.332E-15	1.227E-11	8.146E-11	1.093E-06
4.8	2800.	7.549E-01	1.781E-01	3.463E-02	3.003E-06	2.275E-02	3.905E-16	6.735E-18	1.000E-20	1.453E-16	5.780E-14	6.090E-09
4.9	1700.	7.796E-01	2.077E-01	3.079E-03	2.612E-12	1.986E-05	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	5.762E-15
5.0	1700.	7.796E-01	2.077E-01	3.079E-03	2.612E-12	1.986E-05	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	5.762E-15

Представленные на рис. 1–3 данные свидетельствуют о хорошем согласии расчетных и экспериментальных данных. Увеличение числа спектральных групп (см. последовательно рис. 1–3) не приводит к заметному изменению расчетных данных. Замечено незначительное увеличение спектральной излучательной способности в узких спектральных диапазонах в окрестности центров колебательных полос. Для справки, на рис. 4–5 показана вращательная структура спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует подчеркнуть, что выполненное сопоставление расчетных и экспериментальных данных свидетельствует лишь о правильности используемых соотношений по спектральной излучательной способности при заданной температуре, а также об адекватности

используемой базы данных по коэффициентам Эйнштейна молекулярных полос, расположенных в заданном спектральном диапазоне (подробная информация об учтенных электронно-колебательных полосах приведена в [3]). К сожалению, данное сопоставление не дает гарантий правильного расчета спектральных оптических свойств, требуемых для решения задач радиационной газовой динамики в силу ограниченности начальных условий проведенных тестовых расчетов. Модели спектральных оптических свойств горячих газов, используемые при решении задач радиационной аэрофизики спускаемых космических аппаратов [4, 5], должны быть тестированы в диапазоне волновых чисел $\Delta\omega \sim 10^3 \div 2 \times 10^5 \text{ см}^{-1} = 10^5 \div 500 \text{ \AA}$ в широком диапазоне температур и давлений.

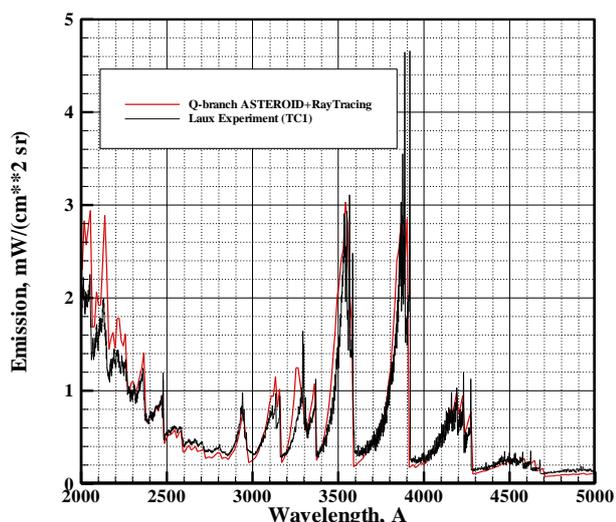


Рис. 1. Спектральная излучательная способность высокотемпературного воздуха при $p=1$ атм. Число расчетных спектральных групп $N_{group}=500$

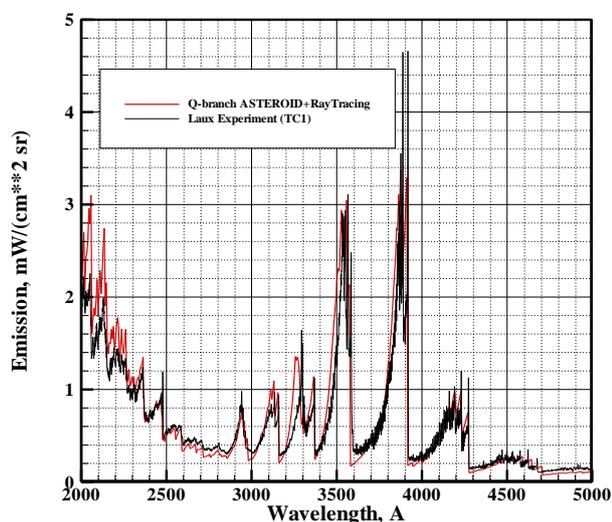


Рис. 2. Спектральная излучательная способность высокотемпературного воздуха при $p=1$ атм. Число расчетных спектральных групп $N_{group}=1000$

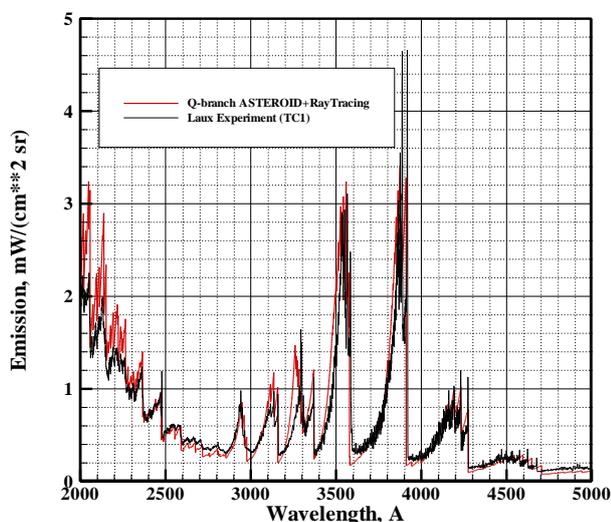


Рис. 3. Спектральная излучательная способность высокотемпературного воздуха при $p=1$ атм. Число расчетных спектральных групп $N_{group}=10000$

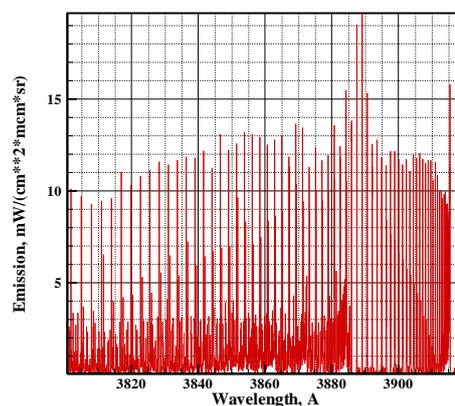


Рис.4. Спектральная испускательная способность в диапазоне длин волн $3800 \div 3920 \text{ \AA}$ с разрешением вращательной структуры спектра ($N_{group}=100000$)

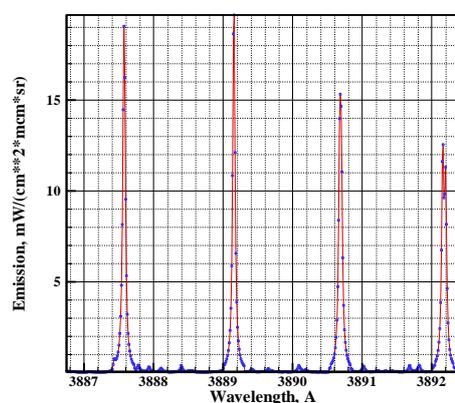


Рис.5. Спектральная испускательная способность в диапазоне длин волн $3887 \div 3892.4 \text{ \AA}$ с разрешением вращательной структуры спектра ($N_{group}=100000$)

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований РАН.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- λ – длина волны излучения, \AA ;
- ω – длина волны излучения, cm^{-1} ;
- p – давление, атм;
- N_{group} – число спектральных групп, использовавшееся в расчетах

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Laux C.O., "Optical Diagnostics and Radiative Emission of Air Plasmas", HTGL Report No. T-288 (1993).
2. Laux, C.O., Gessman, R.J., Hilbert, B., Kruger, C.H., "Experimental Study and Modeling of Infrared Air Plasma Radiation", AIAA Paper 95-2124, 30th AIAA Thermophysics Conference, June 19–22, 1995, San Diego, CA.
3. Суржиков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы. Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2004. 544 с.
4. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Поле течения около космического аппарата Fig II под углом атаки // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-020.pdf>
5. Железнякова А.Л., Кузенов В.В., Петрусев А.С., Суржиков С.Т. Расчет аэротермодинамики двух типов моделей спускаемых космических аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-025.pdf>