

ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПЛОТНОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ К ПОВЕРХНОСТИ ГИПЕРЗВУКОВОГО АППАРАТА В ЛЕТНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ FIRE-II В УСЛОВИЯХ БЛИЗКИХ К РАВНОВЕСНЫМ

С.Т. Суржиков

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

Аннотация

Представлены результаты расчетов спектральных и интегральных радиационных тепловых потоков к поверхности космического аппарата Fire-II для траекторных условий рекомендуемых рабочей группой Европейского космического агентства по излучению высокотемпературных газов. Обсуждаются проблемы проведения тестовых расчетов задач радиационной аэрофизики.

TEST CALCULATION OF RADIATION HEATING OF FIRE-II SURFACE IN CONDITIONS CLOSE TO EQUILIBRIUM

Sergey T. Surzhikov

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

Numerical simulation results on spectral and integral heating of Fire-II surface for conditions recommended by Working group of European Space Agency on High Temperature Gas Radiation (HTGR) are presented. Current problems of test calculations in radiative aerophysics are discussed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Расчет плотности радиационных тепловых потоков к поверхности гиперзвукового аппарата в летном эксперименте Fire-II является тестовой задачей #6 рабочей группы Европейского космического агентства (ЕКА) по излучению высокотемпературных газов. До настоящего времени результаты летного эксперимента Fire-II [1,2] остаются наиболее документированными данными по радиационно-конвективному теплообмену у поверхности космического аппарата при сверхорбитальном входе в плотные слои атмосферы Земли.

Указанные летные данные явились основой для проведения большого количества расчетно-теоретических исследований [3–16] в рамках которых отработывались вычислительные, физико-химические и радиационные модели процессов в неравновесном высокотемпературном излучающем сжатом слое у поверхности гиперзвукового экспериментального аппарата.

В работе [13] показаны значительные различия в расчетных данных не только радиационных, но и конвективных тепловых потоков, которые были получены в разных работах. В работе [15] показано, что одной из главных причин различия разных данных является использование различных моделей физико-химической кинетики. Важной причиной также является использование различной топологии расчетных сеток [20,21].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На теплонапряженном участке входа спускаемого аппарата (СА) Fire-II использовались три аэродинамических щита, конструкция которых показана на рис. 1

[1]. Первый щит (большого размера, радиус затупления $R_n = 93.5$ см) использовался на первом, наиболее неравновесном участке траектории (в диапазоне высот $H > 60$ км). Второй щит (радиус затупления $R_n = 80.5$ см) использовался на участке максимального аэродинамического нагрева $48 \text{ км} < H < 54 \text{ км}$, а третий щит (радиус затупления $R_n = 70.2$ см) – на завершающем этапе аэродинамического нагрева, когда газ в сжатом слое практически полностью термализован. Параметры траектории спускаемого аппарата в летном эксперименте Fire-II показаны на рис. 2, где для сравнения приведены траектории ряда других спускаемых космических аппаратов.

В качестве тестовой задачи #6 рабочей группы ЕКА по излучению высокотемпературных газов выбрана точка траектории на «равновесном» участке ($t = 1645.5$ с) [11,13]. Рекомендуемые для использования в качестве теста распределения поступательной температуры, давления и числовых концентраций частиц смеси газов представлены в табл.1.

Условия полета в указанной точке даны в табл. 2. Также как и в тестовой задаче #3 [16], ее назначение состоит фактически только в тестировании спектральной оптической модели, используемой для расчета плотностей радиационных тепловых потоков и, отчасти, метода расчета переноса селективного теплового излучения. Тем не менее, проверка этой, радиационной, части задачи представляется весьма важной в кругу остальных элементов полной радиационно-газодинамической модели.

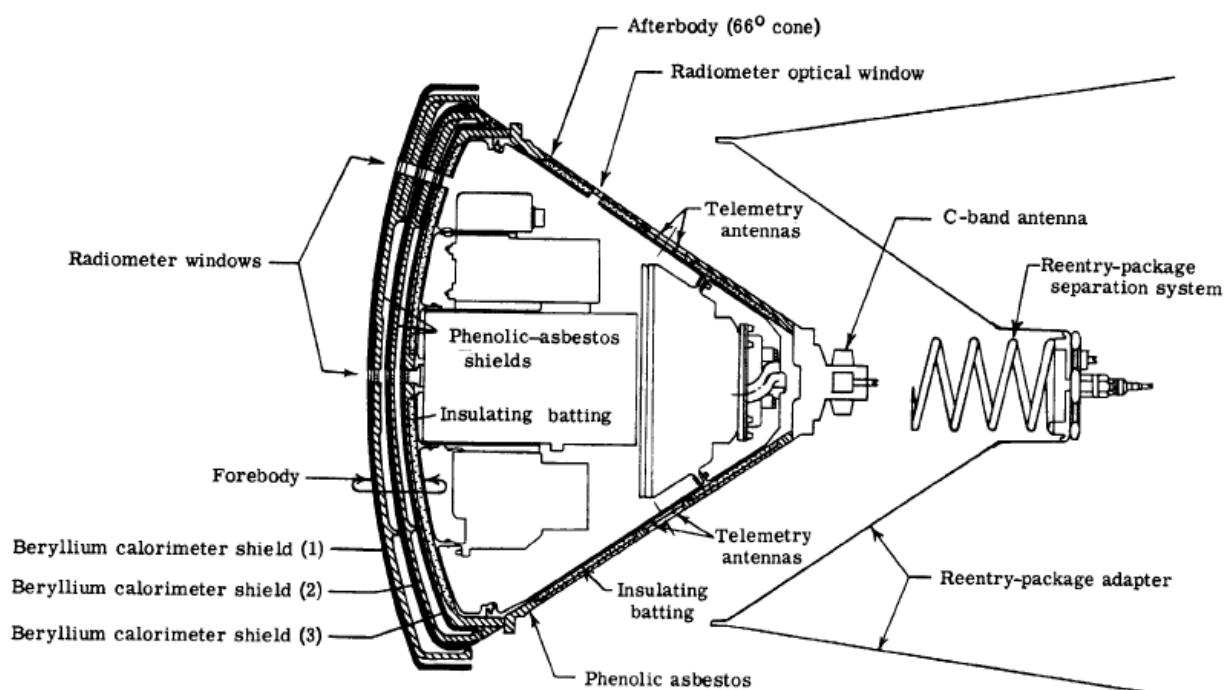


Рис. 1. Схема гиперзвукового аппарата летного эксперимента Fire-II из работы [1]

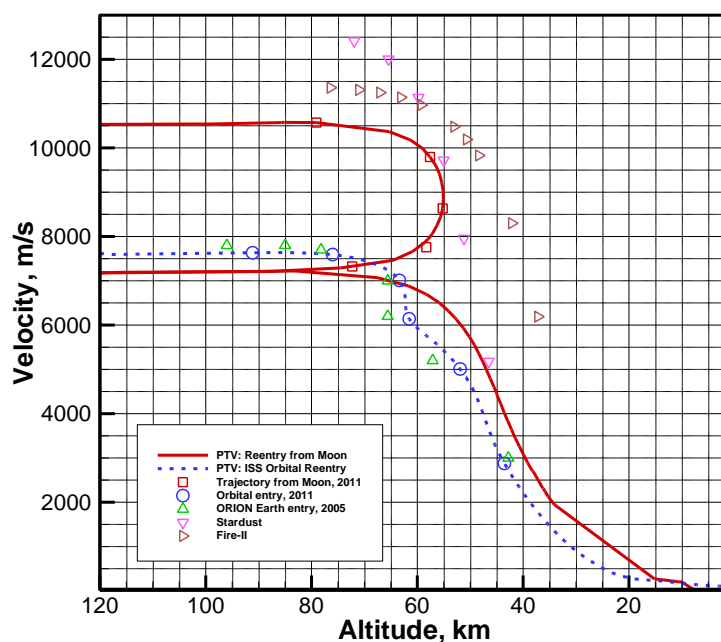


Рис. 2. Параметры траектории в летном эксперименте Fire-II и примеры траекторий входа в плотные слои атмосферы ряда других космических аппаратов. Сплошная кривая и квадраты – траектория возвращения с Луны гипотетического спускаемого аппарата [18], штриховая кривая и кружки – траектория орбитального входа [18], треугольники (дельта) – траектория орбитального входа СА Orion [17], треугольники (оператор набла) – траектория СА Stardust [19], правые треугольники – Fire-II

Таблица 1

Распределение температуры, давления и концентраций частиц вдоль критической линии тока ($t=1648.5$ с)

x, m	T	Pressure, Pa	N ₂	O ₂	NO	NO ⁺	O ₂ ⁺	N ₂ ⁺	N	O	N ⁺	O ⁺	e ⁻
-0.23112E-03	0.54000E+03	0.20922E+06	0.20322E+20	0.32976E+19	0.85721E+18	0.28486E+14	0.35473E+11	0.16284E+06	0.68527E+13	0.35881E+19	0.18926E+07	0.23039E+12	0.28408E+08
-0.23400E-03	0.11737E+04	0.20922E+06	0.93493E+19	0.15171E+19	0.39438E+18	0.13106E+14	0.16320E+11	0.74919E+05	0.31527E+13	0.16508E+19	0.87072E+06	0.10600E+12	0.13069E+08
-0.24021E-03	0.16012E+04	0.20922E+06	0.68128E+19	0.10493E+19	0.28739E+18	0.11231E+14	0.19495E+11	0.10510E+07	0.76034E+13	0.13153E+19	0.14635E+08	0.15016E+12	0.11264E+08
-0.24735E-03	0.19692E+04	0.20922E+06	0.54970E+19	0.78779E+18	0.23190E+18	0.11345E+14	0.26783E+11	0.93470E+07	0.25838E+14	0.11790E+19	0.21961E+07	0.24415E+12	0.11477E+08
-0.25557E-03	0.23153E+04	0.20922E+06	0.46342E+19	0.60649E+18	0.19556E+18	0.12393E+14	0.36276E+11	0.55417E+08	0.83282E+14	0.11092E+19	0.14635E+08	0.39026E+12	0.12666E+08
-0.26503E-03	0.26542E+04	0.20922E+06	0.40025E+19	0.46750E+18	0.16905E+18	0.14237E+14	0.47540E+11	0.23974E+09	0.24799E+15	0.10706E+19	0.34475E+07	0.60260E+12	0.14709E+08
-0.27591E-03	0.29932E+04	0.20922E+06	0.35099E+19	0.35470E+18	0.14858E+18	0.17069E+14	0.60722E+11	0.81631E+09	0.69330E+15	0.10492E+19	0.92647E+06	0.89998E+12	0.17815E+08
-0.28844E-03	0.33363E+04	0.20922E+06	0.31101E+19	0.25995E+18	0.13211E+18	0.21420E+14	0.76711E+11	0.23156E+10	0.18391E+16	0.10384E+19	0.21726E+08	0.13037E+13	0.22529E+08
-0.30286E-03	0.36852E+04	0.20922E+06	0.27768E+19	0.17921E+18	0.11792E+18	0.28414E+14	0.97012E+11	0.56944E+10	0.46698E+16	0.10337E+19	0.16804E+09	0.18357E+13	0.29989E+08
-0.31945E-03	0.40393E+04	0.20922E+06	0.24942E+19	0.11155E+18	0.10369E+18	0.40358E+14	0.12227E+12	0.12586E+11	0.11435E+17	0.10309E+19	0.11092E+10	0.25182E+13	0.42497E+08
-0.33855E-03	0.43932E+04	0.20922E+06	0.22529E+19	0.58971E+17	0.86554E+17	0.61702E+14	0.14744E+12	0.26192E+11	0.26902E+17	0.10243E+19	0.61595E+10	0.33796E+13	0.64480E+08
-0.36053E-03	0.47296E+04	0.20922E+06	0.20473E+19	0.24640E+17	0.65534E+17	0.99337E+14	0.15763E+12	0.54921E+11	0.59140E+17	0.10075E+19	0.28230E+11	0.44809E+13	0.10281E+09
-0.38582E-03	0.50203E+04	0.20922E+06	0.18721E+19	0.80574E+16	0.44911E+17	0.15847E+15	0.14806E+12	0.12231E+12	0.11584E+18	0.97760E+18	0.10781E+12	0.59664E+13	0.16284E+09
-0.41493E-03	0.52535E+04	0.20922E+06	0.17175E+19	0.25232E+16	0.30468E+17	0.23464E+15	0.14508E+12	0.27817E+12	0.19582E+18	0.93815E+18	0.35420E+12	0.80947E+13	0.24060E+09
-0.44844E-03	0.54473E+04	0.20922E+06	0.15732E+19	0.10571E+16	0.22305E+17	0.31776E+15	0.16039E+12	0.59697E+12	0.28991E+18	0.89522E+18	0.10179E+13	0.11226E+14	0.32679E+09
-0.48700E-03	0.56212E+04	0.20922E+06	0.14343E+19	0.60280E+15	0.17543E+17	0.40208E+15	0.18473E+12	0.11761E+13	0.39076E+18	0.85239E+18	0.25912E+13	0.15828E+14	0.41681E+09
-0.53137E-03	0.57829E+04	0.20921E+06	0.12992E+19	0.39573E+15	0.14324E+17	0.48532E+15	0.21175E+12	0.21364E+13	0.49513E+18	0.81096E+18	0.59508E+13	0.22501E+14	0.50993E+09
-0.58244E-03	0.59351E+04	0.20921E+06	0.11680E+19	0.27598E+15	0.11886E+17	0.56545E+15	0.23892E+12	0.36134E+13	0.60133E+18	0.77129E+18	0.12546E+14	0.31973E+14	0.60646E+09
-0.64122E-03	0.60790E+04	0.20921E+06	0.10409E+19	0.19917E+15	0.99246E+16	0.64003E+15	0.26486E+12	0.57406E+13	0.70777E+18	0.73344E+18	0.24618E+14	0.45082E+14	0.70715E+09
-0.70887E-03	0.62164E+04	0.20921E+06	0.91858E+18	0.14718E+15	0.83011E+16	0.70636E+15	0.28876E+12	0.86275E+13	0.81253E+18	0.69743E+18	0.45421E+14	0.62727E+14	0.81355E+09
-0.78673E-03	0.63491E+04	0.20921E+06	0.80221E+18	0.11085E+15	0.69442E+16	0.76170E+15	0.31023E+12	0.12333E+14	0.91332E+18	0.66331E+18	0.79356E+14	0.85766E+14	0.92821E+09
-0.87633E-03	0.64785E+04	0.20921E+06	0.69325E+18	0.84916E+14	0.58090E+16	0.80343E+15	0.32894E+12	0.16826E+14	0.10077E+19	0.63125E+18	0.13183E+15	0.11484E+15	0.10545E+10
-0.97945E-03	0.66051E+04	0.20921E+06	0.59346E+18	0.66170E+14	0.48643E+16	0.82959E+15	0.34460E+12	0.21950E+14	0.10931E+19	0.60159E+18	0.20856E+15	0.15012E+15	0.11961E+10
-1.0981E-02	0.67292E+04	0.20921E+06	0.50461E+18	0.52565E+14	0.40903E+16	0.83991E+15	0.35755E+12	0.27446E+14	0.11672E+19	0.57462E+18	0.31434E+15	0.19079E+15	0.13564E+10
-1.12347E-02	0.68568E+04	0.20920E+06	0.42823E+18	0.42856E+14	0.34862E+16	0.83809E+15	0.37190E+12	0.33173E+14	0.12265E+19	0.55022E+18	0.45158E+15	0.23421E+15	0.15388E+10
-1.13919E-02	0.70121E+04	0.20921E+06	0.36700E+18	0.36622E+14	0.30981E+16	0.83814E+15	0.40470E+12	0.39615E+14	0.12619E+19	0.52741E+18	0.61180E+15	0.27299E+15	0.17418E+10
-1.15728E-02	0.70004E+04	0.20920E+06	0.34468E+18	0.33364E+14	0.28158E+16	0.81455E+15	0.37785E+12	0.39623E+14	0.12916E+19	0.52371E+18	0.67319E+15	0.29792E+15	0.18038E+10
-1.17810E-02	0.70049E+04	0.20919E+06	0.33168E+18	0.31753E+14	0.26790E+16	0.80313E+15	0.36824E+12	0.39928E+14	0.13062E+19	0.52079E+18	0.71279E+15	0.31316E+15	0.18470E+10
-1.20207E-02	0.70271E+04	0.20920E+06	0.31971E+18	0.30539E+14	0.25858E+16	0.79669E+15	0.36808E+12	0.40849E+14	0.13153E+19	0.51693E+18	0.75674E+15	0.32570E+15	0.18973E+10
-1.22965E-02	0.70495E+04	0.20919E+06	0.30894E+18	0.29490E+14	0.25056E+16	0.79079E+15	0.36876E+12	0.41759E+14	0.13227E+19	0.51326E+18	0.79984E+15	0.33707E+15	0.19462E+10
-1.26139E-02	0.70692E+04	0.20918E+06	0.29982E+18	0.28617E+14	0.24381E+16	0.78547E+15	0.36936E+12	0.42545E+14	0.13290E+19	0.51014E+18	0.83885E+15	0.34709E+15	0.19902E+10
-1.29791E-02	0.70859E+04	0.20917E+06	0.29233E+18	0.27910E+14	0.23832E+16	0.78087E+15	0.36993E+12	0.43202E+14	0.13339E+19	0.50752E+18	0.87264E+15	0.35554E+15	0.20280E+10
-1.33995E-02	0.70997E+04	0.20916E+06	0.28641E+18	0.27360E+14	0.23402E+16	0.77712E+15	0.37047E+12	0.43734E+14	0.13377E+19	0.50542E+18	0.90059E+15	0.36238E+15	0.20592E+10
-1.38834E-02	0.71104E+04	0.20915E+06	0.28193E+18	0.26947E+14	0.23079E+16	0.77420E+15	0.37094E+12	0.44143E+14	0.13405E+19	0.50380E+18	0.92248E+15	0.36762E+15	0.20835E+10
-1.44402E-02	0.71183E+04	0.20913E+06	0.27870E+18	0.26652E+14	0.22848E+16	0.77205E+15	0.37133E+12	0.44443E+14	0.13423E+19	0.50260E+18	0.93867E+15	0.37143E+15	0.21015E+10
-1.50811E-02	0.71239E+04	0.20910E+06	0.27649E+18	0.26451E+14	0.22691E+16	0.77053E+15	0.37161E+12	0.44687E+14	0.13435E+19	0.50175E+18	0.94983E+15	0.37400E+15	0.21137E+10
-1.58186E-02	0.71274E+04	0.20907E+06	0.27506E+18	0.26321E+14	0.22590E+16	0.76952E+15	0.37178E+12	0.44777E+14	0.13441E+19	0.50116E+18	0.95698E+15	0.37562E+15	0.21215E+10
-1.66675E-02	0.71296E+04	0.20903E+06	0.27419E+18	0.26240E+14	0.22527E+16	0.76882E+15	0.37184E+12	0.44848E+14	0.13443E+19	0.50076E+18	0.96111E+15	0.37653E+15	0.21259E+10
-1.76444E-02	0.71307E+04	0.20898E+06	0.27367E+18	0.26190E+14	0.22489E+16	0.76833E+15	0.37181E+12	0.44879E+14	0.13443E+19	0.50047E+18	0.96321E+15	0.37697E+15	0.21279E+10
-1.87687E-02	0.71321E+04	0.20890E+06	0.27336E+18	0.26158E+14	0.22465E+16	0.76790E+15	0.37168E+12	0.44881E+14	0.13439E+19	0.50021E+18	0.96395E+15	0.37707E+15	0.21284E+10
-1.10063E-01	0.71312E+04	0.20880E+06	0.27317E+18	0.26134E+14	0.22448E+16	0.76747E+15	0.37146E+12	0.44861E+14	0.13433E+19	0.49996E+18	0.96377E+15	0.37696E+15	0.21276E+10
-1.11552E-01	0.71310E+04	0.20866E+06	0.27301E+18	0.26110E+14	0.22431E+16	0.76694E+15	0.37112E+12	0.44821E+14	0.13425E+19	0.49965E+18	0.96294E+15	0.37666E+15	0.21259E+10
-1.13266E-01	0.71305E+04	0.20847E+06	0.27283E+18	0.26080E+14	0.22410E+16	0.76625E+15	0.37064E+12	0.44763E+14	0.13413E+19	0.49924E+18	0.96159E+15	0.37622E+15	0.21234E+10
-1.15238E-01	0.71298E+04	0.20821E+06	0.27259E+18	0.26041E+14	0.22383E+16	0.76528E+15	0.36996E+12	0.44679E+14	0.13396E+19	0.49867E+18	0.95962E+15	0.37558E+15	0.21198E+10

Продолжение Таблицы 1

x, m	T	Pressure, Pa	N ₂	O ₂	NO	NO ⁺	O ₂ ⁺	N ₂ ⁺	N	O	N ⁺	O ⁺	e ⁻
-0.17451E-01	0.71290E+04	0.20792E+06	0.27234E+18	0.25998E+14	0.22353E+16	0.76422E+15	0.36922E+12	0.44585E+14	0.13378E+19	0.49804E+18	0.95736E+15	0.37485E+15	0.21157E+10
-0.19613E-01	0.71281E+04	0.20757E+06	0.27205E+18	0.25949E+14	0.22319E+16	0.76299E+15	0.36837E+12	0.44476E+14	0.13356E+19	0.49731E+18	0.95472E+15	0.37399E+15	0.21109E+10
-0.21492E-01	0.71271E+04	0.20719E+06	0.27174E+18	0.25896E+14	0.22283E+16	0.76164E+15	0.36743E+12	0.44355E+14	0.13331E+19	0.49651E+18	0.95174E+15	0.37303E+15	0.21056E+10
-0.23125E-01	0.71261E+04	0.20681E+06	0.27144E+18	0.25843E+14	0.22247E+16	0.76026E+15	0.36647E+12	0.44231E+14	0.13306E+19	0.49569E+18	0.94863E+15	0.37207E+15	0.21001E+10
-0.24544E-01	0.71250E+04	0.20642E+06	0.27114E+18	0.25790E+14	0.22211E+16	0.75887E+15	0.36550E+12	0.44105E+14	0.13281E+19	0.49486E+18	0.94547E+15	0.37118E+15	0.20946E+10
-0.25776E-01	0.71239E+04	0.20603E+06	0.27084E+18	0.25737E+14	0.22174E+16	0.75741E+15	0.36448E+12	0.43975E+14	0.13256E+19	0.49404E+18	0.94223E+15	0.37054E+15	0.20892E+10
-0.26847E-01	0.71230E+04	0.20568E+06	0.27058E+18	0.25691E+14	0.22144E+16	0.75602E+15	0.36357E+12	0.43858E+14	0.13234E+19	0.49331E+18	0.93924E+15	0.37055E+15	0.20847E+10
-0.27778E-01	0.71219E+04	0.20533E+06	0.27033E+18	0.25645E+14	0.22112E+16	0.75439E+15	0.36251E+12	0.43726E+14	0.13211E+19	0.49258E+18	0.93595E+15	0.37166E+15	0.20808E+10
-0.28586E-01	0.71212E+04	0.20504E+06	0.27011E+18	0.25607E+14	0.22087E+16	0.75258E+15	0.36146E+12	0.43598E+14	0.13192E+19	0.49194E+18	0.93268E+15	0.37484E+15	0.20788E+10
-0.29289E-01	0.71205E+04	0.20474E+06	0.26990E+18	0.25568E+14	0.22062E+16	0.75011E+15	0.36007E+12	0.43438E+14	0.13172E+19	0.49131E+18	0.92871E+15	0.38117E+15	0.20786E+10
-0.29900E-01	0.71202E+04	0.20450E+06	0.26974E+18	0.25541E+14	0.22048E+16	0.74699E+15	0.35854E+12	0.43269E+14	0.13156E+19	0.49077E+18	0.92436E+15	0.39213E+15	0.20819E+10
-0.30430E-01	0.71206E+04	0.20425E+06	0.26957E+18	0.25517E+14	0.22040E+16	0.74272E+15	0.35667E+12	0.43066E+14	0.13137E+19	0.49017E+18	0.91905E+15	0.40908E+15	0.20889E+10
-0.30891E-01	0.71222E+04	0.20408E+06	0.26950E+18	0.25518E+14	0.22059E+16	0.73744E+15	0.35478E+12	0.42869E+14	0.13120E+19	0.48966E+18	0.91335E+15	0.43344E+15	0.21020E+10
-0.31320E-01	0.71264E+04	0.20385E+06	0.26936E+18	0.25531E+14	0.22105E+16	0.73065E+15	0.35303E+12	0.42690E+14	0.13094E+19	0.48885E+18	0.90724E+15	0.46598E+15	0.21212E+10
-0.31748E-01	0.71362E+04	0.20362E+06	0.26930E+18	0.25604E+14	0.22234E+16	0.72179E+15	0.35221E+12	0.42622E+14	0.13054E+19	0.48772E+18	0.90177E+15	0.51316E+15	0.21536E+10
-0.32177E-01	0.71593E+04	0.20333E+06	0.26922E+18	0.25799E+14	0.22544E+16	0.71065E+15	0.35491E+12	0.42936E+14	0.12979E+19	0.48559E+18	0.90071E+15	0.58032E+15	0.22082E+10
-0.32606E-01	0.72126E+04	0.20296E+06	0.26925E+18	0.26311E+14	0.23278E+16	0.69834E+15	0.36768E+12	0.44328E+14	0.12829E+19	0.48148E+18	0.91453E+15	0.67397E+15	0.23036E+10
-0.33035E-01	0.73370E+04	0.20232E+06	0.26930E+18	0.27659E+14	0.25001E+16	0.68854E+15	0.40894E+12	0.48658E+14	0.12505E+19	0.47266E+18	0.97029E+15	0.79941E+15	0.24773E+10
-0.33464E-01	0.76423E+04	0.20089E+06	0.26912E+18	0.32027E+14	0.29137E+16	0.69442E+15	0.54651E+12	0.61902E+14	0.11767E+19	0.45253E+18	0.11384E+16	0.95279E+15	0.28139E+10
-0.33892E-01	0.85104E+04	0.19455E+06	0.26429E+18	0.87991E+14	0.37697E+16	0.76249E+15	0.12463E+13	0.11108E+15	0.98580E+18	0.39844E+18	0.15472E+16	0.10729E+16	0.34530E+10
-0.34321E-01	0.11647E+05	0.12937E+06	0.19132E+18	0.23385E+16	0.28844E+16	0.74841E+15	0.82349E+13	0.28319E+15	0.40339E+18	0.20143E+18	0.14850E+16	0.69931E+15	0.31855E+10
-0.34750E-01	0.11470E+04	0.11606E+04	0.57181E+17	0.15120E+17	0.53681E+13	0.23371E+13	0.94258E+12	0.83251E+12	0.64921E+15	0.32499E+15	0.37057E+13	0.22142E+13	0.99118E+05
-0.35179E-01	0.25991E+03	0.25490E+03	0.56118E+17	0.14917E+17	0.25250E+11	0.22609E+11	0.26253E+11	0.74811E+10	0.30699E+13	0.15289E+13	0.16900E+11	0.20645E+11	0.92763E+05
-0.35608E-01	0.25720E+03	0.25223E+03	0.56117E+17	0.14917E+17	0.73516E+08	0.12992E+09	0.21237E+09	0.38796E+08	0.81843E+10	0.40555E+10	0.42879E+08	0.11848E+09	0.53595E+03
-0.36036E-01	0.25906E+03	0.25407E+03	0.56122E+17	0.14918E+17	0.70057E+07	0.94100E+07	0.29072E+08	0.11731E+07	0.51702E+08	0.25236E+08	0.10948E+06	0.10826E+08	0.49985E+02
-0.36465E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68304E+07	0.87467E+07	0.27928E+08	0.10227E+07	0.30100E+08	0.14572E+08	0.28138E+03	0.10306E+08	0.47428E+02
-0.36894E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.87200E+07	0.27860E+08	0.10633E+07	0.30019E+08	0.14524E+08	0.72616E+00	0.10346E+08	0.47414E+02
-0.37323E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.86966E+07	0.27797E+08	0.11065E+07	0.29996E+08	0.14503E+08	0.64808E-02	0.10390E+08	0.47414E+02
-0.37752E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.86731E+07	0.27731E+08	0.11514E+07	0.29972E+08	0.14483E+08	0.94698E-02	0.10434E+08	0.47414E+02
-0.38395E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.86495E+07	0.27664E+08	0.11983E+07	0.29949E+08	0.14462E+08	0.19440E-01	0.10478E+08	0.47414E+02
-0.39252E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.86022E+07	0.27526E+08	0.12955E+07	0.29901E+08	0.14421E+08	0.60405E-01	0.10566E+08	0.47414E+02
-0.40539E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.85545E+07	0.27379E+08	0.14008E+07	0.29853E+08	0.14380E+08	0.18791E+00	0.10655E+08	0.47414E+02
-0.42254E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.84584E+07	0.27068E+08	0.16279E+07	0.29757E+08	0.14296E+08	0.98017E+00	0.10835E+08	0.47414E+02
-0.43969E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.83607E+07	0.26720E+08	0.18919E+07	0.29660E+08	0.14211E+08	0.51131E+01	0.11017E+08	0.47414E+02
-0.45685E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.82614E+07	0.26326E+08	0.21987E+07	0.29560E+08	0.14125E+08	0.26673E+02	0.11203E+08	0.47414E+02
-0.47400E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.81604E+07	0.25882E+08	0.25553E+07	0.29459E+08	0.14037E+08	0.13915E+03	0.11392E+08	0.47414E+02
-0.49115E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.80576E+07	0.25378E+08	0.29697E+07	0.29356E+08	0.13948E+08	0.72592E+03	0.11584E+08	0.47414E+02
-0.50830E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.79530E+07	0.24802E+08	0.34513E+07	0.29248E+08	0.13857E+08	0.37870E+04	0.11779E+08	0.47414E+02
-0.52545E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.78462E+07	0.24135E+08	0.40111E+07	0.29127E+08	0.13764E+08	0.19756E+05	0.11978E+08	0.47414E+02
-0.54261E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.77349E+07	0.23311E+08	0.46616E+07	0.28939E+08	0.13667E+08	0.10307E+06	0.12179E+08	0.47415E+02
-0.55976E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68299E+07	0.76080E+07	0.22042E+08	0.54176E+07	0.28411E+08	0.13555E+08	0.53770E+06	0.12385E+08	0.47415E+02
-0.57691E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68298E+07	0.74073E+07	0.18888E+08	0.62962E+07	0.26120E+08	0.13369E+08	0.28052E+07	0.12593E+08	0.47415E+02
-0.59406E-01	0.26000E+03	0.25500E+03	0.56124E+17	0.14919E+17	0.68295E+07	0.68295E+07	0.64027E+07	0.73174E+07	0.14635E+08	0.12805E+08	0.14635E+08	0.12805E+08	0.47415E+02

Таблица 2

Параметры траектории Fire-II в трех точках. Результаты расчетов плотностей радиационных тепловых потоков в критической точке

t, c	1634	1643	1648
R_n, cm	93.5	80.5	70.2
$\rho_\infty \cdot 10^{+7}, g/cm^3$	0.372	7.80	30.0
$p_\infty, \text{эрг}/cm^3$	20.8	617.9	2298.9
T_∞, K	195	276	267
T_w, K	615	640	1560
$V_\infty, km/c$	11.36	10.48	8.3
[8]: $\alpha W_r, \text{Вт}/cm^2$	~18	357	52.1
[9]: $W_r(UC), \text{Вт}/cm^2$	31.3	720	
[9]: $W_r(C), \text{Вт}/cm^2$	27.2	540	43.1
[9]: $\alpha W_r(C), \text{Вт}/cm^2$	19.7	344	24.6
Данная работа $W_r(C), \text{Вт}/cm^2$ Исходные данные Табл.1			40
[14]: $W_r(C), \text{Вт}/cm^2$			40
Данная работа $\alpha W_r(C), \text{Вт}/cm^2$ Исходные данные Табл.1			22.8
[14]: $\alpha W_r(C), \text{Вт}/cm^2$			22.8

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Распределения поступательной температуры и числовых концентраций вдоль критической линии тока, построенные по данным табл. 1, приведены на рис. 3 и 4.

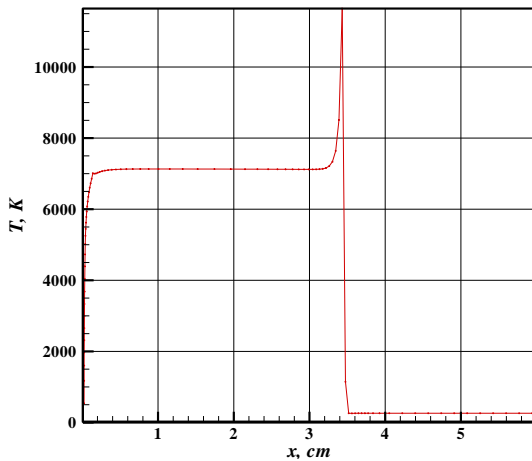


Рис.3. Распределение температуры вдоль критической линии тока, K

Результаты решения задачи расчета переноса теплового излучения в сжатом слое показаны на рис. 5–7. Спектральные оптические свойства вычислялись с использованием кода ASTEROID. Первая серия расчетов проведена без учета атомных линий, а вторая – с учетом (рис. 5). Способ расчета параметров атомных линий и их номенклатура приведены в [20].

На рис. 6 показаны результаты расчетов радиационного нагрева критической точки при тех же самых условиях полета. Расчеты выполнены с использованием модели Парка [8] и модели неравновесной диссоциации Тринора – Мэрроуна. На рис. 7 показаны распределения кумулятивных функций спектральных радиационных тепловых потоков к поверхности.

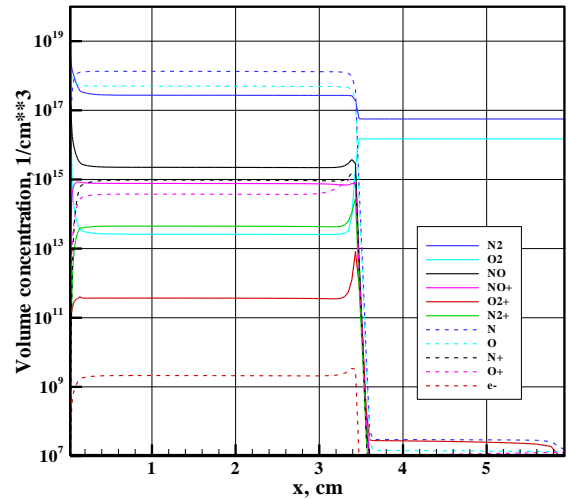


Рис. 4. Распределение числовых концентраций частиц вдоль критической линии тока, $1/cm^3$

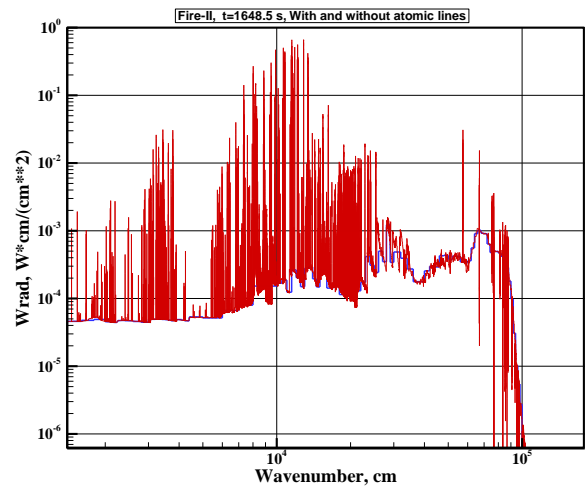


Рис. 5. Плотность спектрального радиационного теплового потока в критической точке с учетом и без учета атомных линий (толстая синяя жирная кривая), $W*cm/(cm^2)$

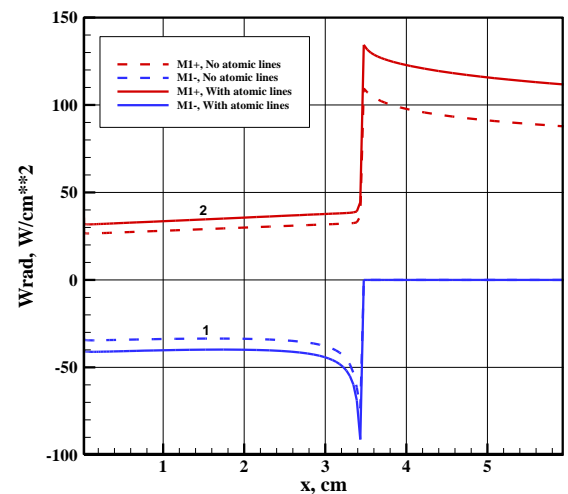


Рис. 6. Распределение односторонних интегральных радиационных тепловых потоков к поверхности тела (1) и от поверхности тела (2); штриховые кривые – без учета атомных линий, сплошные кривые – с учетом атомных линий.

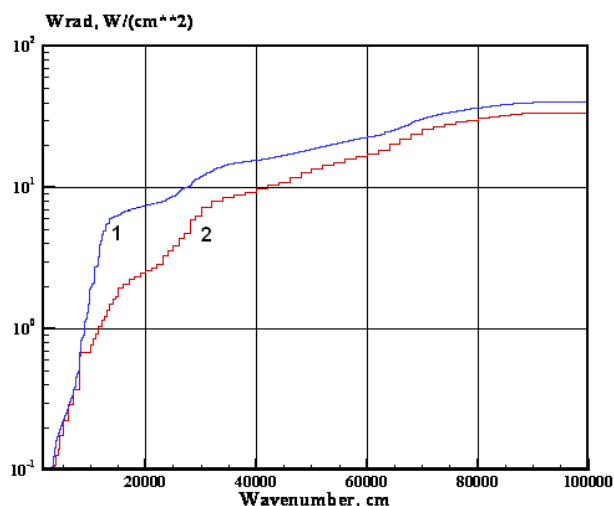


Рис. 7. Кумулятивная функция спектрального распределения радиационных тепловых потоков в критической точке с учетом (1) и без учета (2) атомных линий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует заметить, что рекомендуемые рабочей группой ЕКА исходные данные для расчета радиационных тепловых потоков в траекторной точке $t = 1648.5$ с нуждаются в пересмотре, поскольку в них нарушены условия квазинейтральности в сжатом слое (см. рис.4).

В данной работе для проведения тестовых расчетов рекомендуются три расчетные точки, параметры траектории в которых даны в табл. 1. Первая точка характеризуется высокой степенью неравновесности, вторая точка соответствует участку наибольшего нагрева, а третья точка, как было указано ранее, соответствует квазиравновесному режиму течения.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cornette, E.S., "Forebody Temperatures and Calorimeter Heating Rates Measured During Project Fire II Reentry at 11.5 Kilometers per Second," 1966. NASA TM-X-1305.
2. Cauchon D.L., "Radiative Heating Results From the Fire II Flight Experiment at a Reentry velocity of 11.4 km/s," 1967. NASA TM-X-1402.
3. Sutton, K., "Air Radiation Revisited," AIAA Paper 84-1733, 1984.
4. Balakrishnan, A., Park, C., and Green, M.J., "Radiative Viscous-Shock Layer Analysis of Fire, Apollo, and PAET Flight Data," AIAA Paper 85-1064, 1985.
5. Gupta, R.N., "Navier-Stokes and Viscous Shock-Layer Solutions for Radiating Hypersonic Flows," AIAA Paper 87-1576, 1987.
6. Bird, G.A., "Nonequilibrium Radiation During Re-Entry at 10 km/s," AIAA Paper 87-1543, 1987.
7. Carlson, L.A., "Approximations for Hypervelocity Nonequilibrium Radiating, Reacting, and Conducting Stagnation Regions," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.3, No.4, 1989, Pp.380-388.
8. Park, C., "Assessment of Two Temperature Kinetic Model for Ionizing Air," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.3, No.3, July 1989, Pp.233-244.
9. Gally, T.A., "Development of Engineering Methods for Nonequilibrium Radiative Phenomena about Aeroassisted Entry Vehicles, Ph.D. Dissertation, Texas A&M Univ., College Station, TX, 1992.
10. Greendyke, R.B., and Hartung, L.C., "Convective and Radiative Heat Transfer Analysis for the Fire II Forebody," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.31, No.6, 1994, Pp.986-992.
11. Olynick, D.R., Henline, W.D., Chambers, L.H., and Candler, G.V., "Comparisons of Coupled Radiative Navier-Stokes Flow Solutions with the Project Fire II Flight Data," AIAA Paper 94-1955, 1994.
12. Park, C., "Stagnation Point Radiation for Apollo 4," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.18, No.3, 2004, Pp.349-357.
13. Johnston C.O., Hollis B.R., Sutton K. "Nonequilibrium Stagnation-Line Radiative Heating for Fire-II," JSR, Vol. 45, No.6, 2008, Pp.1185-1195.
14. Surzhikov S.T., Shang J.S., "Numerical Rebuilding of Fire-II Flight Data With the Use of Different Physical-Chemical Kinetics and Radiation Models", AIAA-2013-0190, 51st Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 07-10 January 2013. Grapevine (Dallas/ Ft. Worth Region), Texas, USA. 19 p.
15. Суржиков С.Т. Анализ моделей ионизационной кинетики при гиперзвуковом обтекании цилиндра // Журнал химической физики. 2010. Т.29. №7. С.48-62.
16. Суржиков С.Т. Плотность радиационных тепловых потоков к наветренной поверхности марсианского космического аппарата в тестовой задаче № 3 рабочей группы по излучению высокотемпературных смесей газов ЕКА // См. статью в сборнике АФМ-6, изд-во ИПМех РАН, 2014 г.
17. Surzhikov S.T., "Non-Equilibrium Radiative Gas Dynamics of ORION Space Vehicle", AIAA-13-0231, 51st Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 07-10 January 2013. Grapevine (Dallas/ Ft. Worth Region), Texas, USA. 30 p. DOI: 10.2514/6.2013-66
18. Djadkin A., Beloshitsky A., Shuvalov M., Surzhikov S., "Uncertainties in Heating Predictions of Segmental-Conical Space Vehicle Resulting From Data on Chemical and Physical Kinetics", AIAA-2013-1056, 51st Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 07-10 January 2013. Grapevine (Dallas/ Ft. Worth Region), Texas, USA. 43 p. DOI: 10.2514/6.2013-1056
19. Surzhikov S.T., Shang J.S. Coupled Radiation-Gasdynamic Model for Stardust Earth Entry Simulation // Journal of Spacecraft and Rockets. 2012. Vol. 49. No.5. Pp.875-888. Surzhikov S.T. Data Base of Atomic Lines for Radiative Gas Dynamic Models // AIAA Paper № 02-2898. 2002. 46 p.
21. Кузенов В.В. Использование регулярных адаптивных сеток для анализа импульсных сверхзвуковых струй плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-016.pdf>
22. Котов М.А., Кузенов В.В. Создание сложных поверхностей гиперзвуковых летательных аппаратов системами САПР // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-039.pdf>