

ПЛОТНОСТЬ РАДИАЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ К НАВЕТРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МАРСИАНСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ТЕСТОВОЙ ЗАДАЧЕ №3 РАБОЧЕЙ ГРУППЫ ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СМЕСЕЙ ГАЗОВ ЕКА

С.Т. Суржиков

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

Аннотация

Представлены результаты расчетов спектральных радиационных тепловых потоков к поверхности космического аппарата (КА) MSRO в окрестности передней критической линии тока. Геометрия космического аппарата и условия полета выбраны по рекомендации рабочей группы Европейского космического агентства по излучению высокотемпературных газов. Приводятся рекомендуемые распределения температуры и концентраций компонент в сжатом слое у лобовой поверхности КА при его полете в атмосфере чистой двуокиси углерода. Исследуется влияние числа учитываемых спектральных групп на результаты расчетов интегральных по спектру радиационных тепловых потоков к поверхности космического аппарата.

RADIATIVE HEATING OF WINDWARD SURFACE OF MARTIAN SPACE VEHICLE FOR THE TEST CASE #3 OF WORKING GROUP ON HIGH TEMPERATURE GASES RADIATION OF EUROPEAN SPACE AGENCY

Sergey T. Surzhikov

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

Numerical simulation results on spectral radiation heating of windward surface of Martian space vehicle MSRO are presented. Geometry of the space vehicle and initial conditions were recommended by the Working group on high temperature gases radiation (HTGR). Distributions of recommended by HTGR temperature and species concentrations for pure CO₂ are also presented in the paper. Investigation of influence of spectral group on infrared heating of windward surface of the space vehicle has been performed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Расчет плотности радиационных тепловых потоков к поверхности марсианского космического аппарата составляет тестовую задачу №3 (ТС3) рабочей группы Европейского космического агентства (ЕКА) по излучению высокотемпературных газов [1,2]. К сожалению, для рассматриваемой тестовой задачи отсутствуют какие либо образцовые экспериментальные данные. Поэтому в рассматриваемой тестовой задаче просто постулируются профили температуры и молярных концентраций продуктов разложения двуокиси углерода CO₂ вдоль критической линии тока, по которым производится расчет плотности радиационного теплового потока к поверхности. Эти распределения были получены в одной из серии расчетов, выполненных участниками рабочей группы при анализе радиационной газовой динамики модели космического аппарата Mars Sampler Return Orbiter (MSRO). Так что смысл данной тестовой задачи состоит фактически только в тестировании спектральной оптической модели, используемой для расчета плотностей радиационных тепловых потоков, а также модели переноса селективного теплового излучения.

Несмотря на то, что необходимость решения задачи в такой постановке была сформулирована более 10 лет назад [3], до настоящего времени в международном аэрокосмическом сообществе отсутствует согласие относительно вклада инфракрасного излучения в нагрев поверхности марсианских космических аппара-

тов, в особенности их подветренной поверхности. Подчеркнем, что в данной работе исследуется только часть обсуждаемой проблемы, а именно нагрев лобовой поверхности марсианского аппарата инфракрасным излучением сжатого слоя. Задача в полной трехмерной постановке решена в [4-8].

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ТЕСТОВОЙ ЗАДАЧИ ТС3

Геометрия исследуемого космического аппарата показана на рис.1.

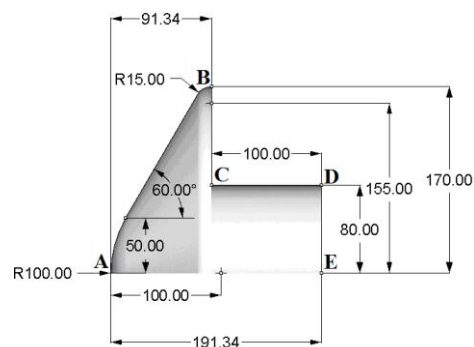


Рис. 1. Расчетная модель космического аппарата Mars Sampler Return Orbiter (MSRO), принятая в рабочей группе по излучению высокотемпературных газов [1]. Все размеры в см

Начальные условия тестовой задачи №3 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Распределение температуры, давления и объемных концентраций вдоль критической линии тока

x, м	T, К	p, Па	O ₂	CO	CO ₂	O	C
-0.10996E-03	0.15000E+04	0.79281E+04	0.28348E+17	0.18855E+18	0.34092E+17	0.13186E+18	0.51285E+07
-0.11046E-03	0.15008E+04	0.79281E+04	0.28333E+17	0.18846E+18	0.34074E+17	0.13179E+18	0.51259E+07
-0.11153E-03	0.15024E+04	0.79281E+04	0.28302E+17	0.18825E+18	0.34037E+17	0.13164E+18	0.51205E+07
-0.11274E-03	0.15043E+04	0.79281E+04	0.28267E+17	0.18801E+18	0.33995E+17	0.13148E+18	0.51148E+07
-0.11410E-03	0.15064E+04	0.79281E+04	0.28227E+17	0.18775E+18	0.33947E+17	0.13130E+18	0.51088E+07
-0.11564E-03	0.15088E+04	0.79281E+04	0.28183E+17	0.18746E+18	0.33894E+17	0.13109E+18	0.51028E+07
-0.11739E-03	0.15114E+04	0.79281E+04	0.28133E+17	0.18713E+18	0.33834E+17	0.13086E+18	0.50969E+07
-0.11936E-03	0.15144E+04	0.79281E+04	0.28077E+17	0.18676E+18	0.33767E+17	0.13060E+18	0.50912E+07
-0.12159E-03	0.15178E+04	0.79281E+04	0.28015E+17	0.18634E+18	0.33692E+17	0.13031E+18	0.50861E+07
-0.12412E-03	0.15216E+04	0.79281E+04	0.27945E+17	0.18588E+18	0.33608E+17	0.12999E+18	0.50820E+07
-0.12698E-03	0.15258E+04	0.79281E+04	0.27866E+17	0.18536E+18	0.33514E+17	0.12963E+18	0.50795E+07
-0.13022E-03	0.15306E+04	0.79281E+04	0.27778E+17	0.18478E+18	0.33409E+17	0.12922E+18	0.50791E+07
-0.13388E-03	0.15360E+04	0.79281E+04	0.27680E+17	0.18413E+18	0.33292E+17	0.12877E+18	0.50820E+07
-0.13802E-03	0.15421E+04	0.79281E+04	0.27570E+17	0.18341E+18	0.33160E+17	0.12826E+18	0.50892E+07
-0.14272E-03	0.15489E+04	0.79281E+04	0.27448E+17	0.18260E+18	0.33014E+17	0.12770E+18	0.51023E+07
-0.14803E-03	0.15565E+04	0.79281E+04	0.27311E+17	0.18170E+18	0.32852E+17	0.12708E+18	0.51233E+07
-0.15404E-03	0.15651E+04	0.79281E+04	0.27159E+17	0.18070E+18	0.32671E+17	0.12639E+18	0.51548E+07
-0.16085E-03	0.15748E+04	0.79281E+04	0.26990E+17	0.17960E+18	0.32470E+17	0.12562E+18	0.51999E+07
-0.16857E-03	0.15856E+04	0.79281E+04	0.26802E+17	0.17837E+18	0.32248E+17	0.12477E+18	0.52629E+07
-0.17731E-03	0.15977E+04	0.79281E+04	0.26594E+17	0.17702E+18	0.32002E+17	0.12383E+18	0.53489E+07
-0.18722E-03	0.16113E+04	0.79281E+04	0.26364E+17	0.17552E+18	0.31730E+17	0.12279E+18	0.54645E+07
-0.19845E-03	0.16265E+04	0.79281E+04	0.26110E+17	0.17388E+18	0.31431E+17	0.12165E+18	0.56182E+07
-0.21118E-03	0.16435E+04	0.79280E+04	0.25831E+17	0.17207E+18	0.31103E+17	0.12041E+18	0.58208E+07
-0.22561E-03	0.16626E+04	0.79280E+04	0.25524E+17	0.17009E+18	0.30743E+17	0.11905E+18	0.60859E+07
-0.24199E-03	0.16839E+04	0.79280E+04	0.25187E+17	0.16794E+18	0.30350E+17	0.11756E+18	0.64312E+07
-0.26056E-03	0.17076E+04	0.79280E+04	0.24819E+17	0.16559E+18	0.29923E+17	0.11596E+18	0.68796E+07
-0.28163E-03	0.17342E+04	0.79280E+04	0.24419E+17	0.16306E+18	0.29459E+17	0.11422E+18	0.74613E+07
-0.30555E-03	0.17637E+04	0.79280E+04	0.23985E+17	0.16031E+18	0.28959E+17	0.11234E+18	0.82157E+07
-0.33271E-03	0.17966E+04	0.79279E+04	0.23516E+17	0.15737E+18	0.28420E+17	0.11034E+18	0.91962E+07
-0.36354E-03	0.18331E+04	0.79279E+04	0.23011E+17	0.15422E+18	0.27843E+17	0.10820E+18	0.10475E+08
-0.39856E-03	0.18736E+04	0.79278E+04	0.22470E+17	0.15087E+18	0.27227E+17	0.10593E+18	0.12151E+08
-0.43835E-03	0.19186E+04	0.79278E+04	0.21893E+17	0.14732E+18	0.26575E+17	0.10353E+18	0.14364E+08
-0.48357E-03	0.19683E+04	0.79277E+04	0.21281E+17	0.14357E+18	0.25886E+17	0.10101E+18	0.17309E+08
-0.53497E-03	0.20231E+04	0.79277E+04	0.20634E+17	0.13966E+18	0.25163E+17	0.98388E+17	0.21269E+08
-0.59340E-03	0.20835E+04	0.79276E+04	0.19955E+17	0.13558E+18	0.24409E+17	0.95667E+17	0.26656E+08
-0.65986E-03	0.21499E+04	0.79275E+04	0.19246E+17	0.13136E+18	0.23627E+17	0.92864E+17	0.34074E+08
-0.73545E-03	0.22226E+04	0.79273E+04	0.18510E+17	0.12702E+18	0.22822E+17	0.89998E+17	0.44432E+08
-0.82145E-03	0.23020E+04	0.79272E+04	0.17753E+17	0.12260E+18	0.21999E+17	0.87089E+17	0.59101E+08
-0.91931E-03	0.23883E+04	0.79270E+04	0.16979E+17	0.11812E+18	0.21164E+17	0.84160E+17	0.80181E+08
-0.10307E-02	0.24816E+04	0.79268E+04	0.16194E+17	0.11363E+18	0.20324E+17	0.81237E+17	0.11092E+09
-0.11575E-02	0.25817E+04	0.79266E+04	0.15405E+17	0.10916E+18	0.19487E+17	0.78348E+17	0.15637E+09
-0.13019E-02	0.26887E+04	0.79263E+04	0.14617E+17	0.10475E+18	0.18658E+17	0.75514E+17	0.22464E+09
-0.14667E-02	0.28043E+04	0.79259E+04	0.13824E+17	0.10036E+18	0.17833E+17	0.72712E+17	0.33055E+09
-0.16548E-02	0.29271E+04	0.79257E+04	0.13038E+17	0.96074E+17	0.17027E+17	0.69996E+17	0.49826E+09
-0.18693E-02	0.30532E+04	0.79254E+04	0.12284E+17	0.92023E+17	0.16266E+17	0.67455E+17	0.76010E+09
-0.21137E-02	0.31785E+04	0.79251E+04	0.11578E+17	0.88306E+17	0.15574E+17	0.65150E+17	0.11614E+10
-0.23923E-02	0.32981E+04	0.79247E+04	0.10936E+17	0.85006E+17	0.14971E+17	0.63135E+17	0.17527E+10
-0.27167E-02	0.34091E+04	0.79241E+04	0.10358E+17	0.82131E+17	0.14465E+17	0.61415E+17	0.25868E+10
-0.31005E-02	0.35074E+04	0.79237E+04	0.98482E+16	0.79709E+17	0.14073E+17	0.60012E+17	0.37042E+10
-0.35470E-02	0.35879E+04	0.79234E+04	0.94173E+16	0.77783E+17	0.13818E+17	0.58948E+17	0.50614E+10
-0.40656E-02	0.36494E+04	0.79224E+04	0.90614E+16	0.76304E+17	0.13702E+17	0.58181E+17	0.65517E+10
-0.46772E-02	0.36943E+04	0.79213E+04	0.87673E+16	0.75181E+17	0.13720E+17	0.57647E+17	0.80922E+10
-0.53955E-02	0.37276E+04	0.79200E+04	0.85168E+16	0.74283E+17	0.13853E+17	0.57250E+17	0.96707E+10
-0.62440E-02	0.37547E+04	0.79172E+04	0.82886E+16	0.73478E+17	0.14070E+17	0.56900E+17	0.11418E+11
-0.72546E-02	0.37801E+04	0.79150E+04	0.80652E+16	0.72688E+17	0.14357E+17	0.56558E+17	0.13670E+11
-0.84568E-02	0.38077E+04	0.79111E+04	0.78288E+16	0.71817E+17	0.14689E+17	0.56159E+17	0.17004E+11
-0.98977E-02	0.38398E+04	0.79067E+04	0.75697E+16	0.70829E+17	0.15067E+17	0.55689E+17	0.22491E+11
-0.11547E-01	0.38763E+04	0.79037E+04	0.72851E+16	0.69737E+17	0.15506E+17	0.55166E+17	0.32258E+11
-0.13351E-01	0.39191E+04	0.78953E+04	0.69767E+16	0.68472E+17	0.15960E+17	0.54518E+17	0.49418E+11
-0.15324E-01	0.39637E+04	0.78876E+04	0.66571E+16	0.67166E+17	0.16471E+17	0.53852E+17	0.79915E+11
-0.17477E-01	0.40196E+04	0.78759E+04	0.63042E+16	0.65615E+17	0.17001E+17	0.53006E+17	0.13409E+12
-0.19788E-01	0.40806E+04	0.78647E+04	0.59312E+16	0.63961E+17	0.17616E+17	0.52099E+17	0.22816E+12
-0.22230E-01	0.41566E+04	0.78469E+04	0.55224E+16	0.62004E+17	0.18259E+17	0.50960E+17	0.38259E+12

Продолжение таблицы 1

x, м	T, K	p, Па	O ₂	CO	CO ₂	O	C
-0.24803E-01	0.42437E+04	0.78282E+04	0.50870E+16	0.59849E+17	0.19006E+17	0.49676E+17	0.62410E+12
-0.27510E-01	0.43589E+04	0.78008E+04	0.45979E+16	0.57203E+17	0.19823E+17	0.48009E+17	0.97967E+12
-0.30351E-01	0.45081E+04	0.77672E+04	0.40517E+16	0.54016E+17	0.20818E+17	0.45915E+17	0.14667E+13
-0.33326E-01	0.47306E+04	0.77178E+04	0.34114E+16	0.49782E+17	0.22017E+17	0.42964E+17	0.20649E+13
-0.36432E-01	0.51044E+04	0.76369E+04	0.26342E+16	0.43688E+17	0.23622E+17	0.38425E+17	0.26636E+13
-0.39667E-01	0.59587E+04	0.73211E+04	0.15901E+16	0.32548E+17	0.25483E+17	0.29373E+17	0.28415E+13
-0.43027E-01	0.74073E+04	0.24392E+04	0.14430E+15	0.47892E+16	0.14417E+17	0.45017E+16	0.60690E+12
-0.46506E-01	0.49942E+03	0.28515E+02	0.44593E+12	0.14848E+14	0.41065E+16	0.13952E+14	0.18725E+10
-0.50094E-01	0.14181E+03	0.79724E+01	0.19109E+10	0.71097E+11	0.40720E+16	0.59812E+11	0.79777E+07
-0.53782E-01	0.14000E+03	0.78702E+01	0.38844E+07	0.76086E+10	0.40719E+16	0.12166E+09	0.16137E+05
-0.57552E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.76829E+04	0.74794E+10	0.40719E+16	0.24063E+06	0.44456E+02
-0.61374E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.20561E+02	0.74792E+10	0.40719E+16	0.48048E+03	0.12917E+02
-0.65209E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.56279E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.12109E+02	0.12941E+02
-0.69042E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11200E+02	0.13026E+02
-0.72872E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13112E+02
-0.76698E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13198E+02
-0.80522E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13285E+02
-0.84342E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13373E+02
-0.88158E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13460E+02
-0.91971E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13549E+02
-0.95779E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13638E+02
-0.99583E-01	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13727E+02
-0.10338E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13817E+02
-0.10718E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13908E+02
-0.11096E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.13998E+02
-0.11475E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.14090E+02
-0.11853E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.14182E+02
-0.12230E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.14274E+02
-0.12606E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.14366E+02
-0.12982E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.14459E+02
-0.13358E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.14553E+02
-0.13733E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.14647E+02
-0.14107E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.14741E+02
-0.14480E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.14835E+02
-0.14853E+00	0.14000E+03	0.78700E+01	0.55989E+01	0.74792E+10	0.40719E+16	0.11198E+02	0.14930E+02

Графическое изображение этих данных дано на рис. 2 и 3.

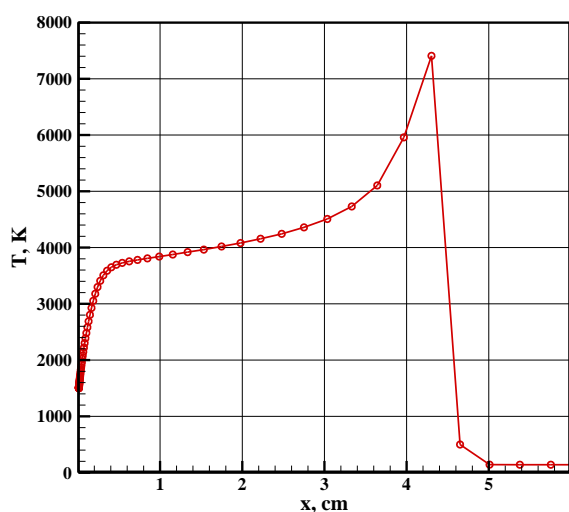


Рис. 2. Распределение температуры вдоль передней критической линии тока при обтекании MSRO в марсианской атмосфере

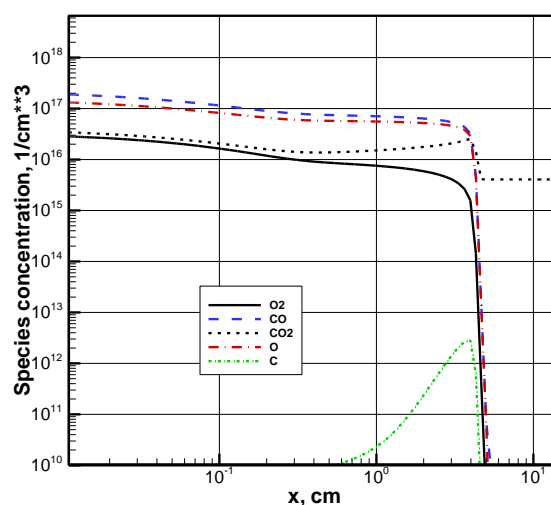


Рис. 3. Распределение объемных концентраций вдоль передней критической линии тока при обтекании MSRO в марсианской атмосфере

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ РАСЧЕТОВ

Расчеты были выполнены с использованием компьютерного кода ASTEROID+RAD_PLANE [6], который предназначен для расчетов переноса излучения в плоских неоднородных слоях смесей высокотемпературных газов. Результаты расчетов показаны на рис. 4–11.

Плотность интегральных радиационных тепловых потоков в критической точке показана на рис. 4–7. Расчеты выполнены для разного числа спектральных групп, соответственно $N_{\text{group}} = 10, 37, 100, 500$. Рисунки 8–11 показывают распределение односторонних радиационных потоков к поверхности (M_1^-) и от поверхности в направлении фронта ударной волны (M_1^+), а также плотность суммарного радиационного теплового потока для соответствующего числа спектральных групп.

Представленные расчетные случаи иллюстрируют достаточно заметное влияние выбора числа спектральных групп на интегральные радиационные потоки.

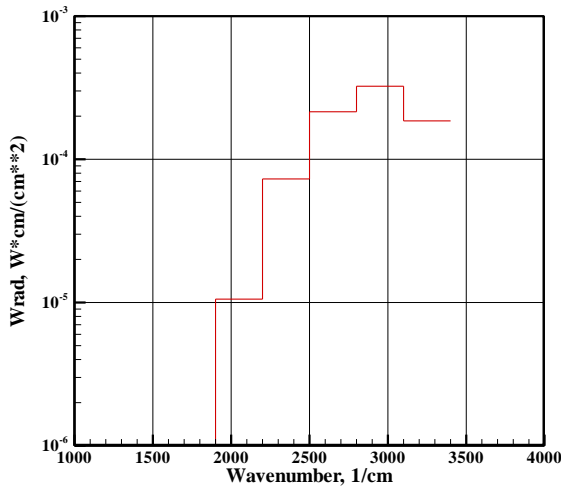


Рис. 4. Спектральные радиационные тепловые потоки в критической точке, Вт*см/(см²); $N_{\text{group}} = 10$

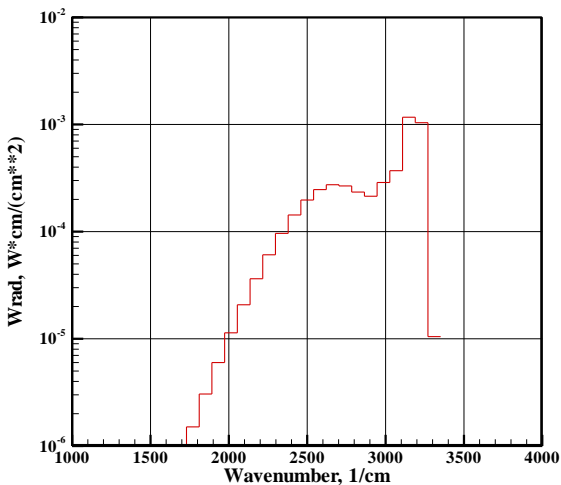


Рис. 5. Спектральные радиационные тепловые потоки в критической точке, Вт*см/(см²); $N_{\text{group}} = 37$

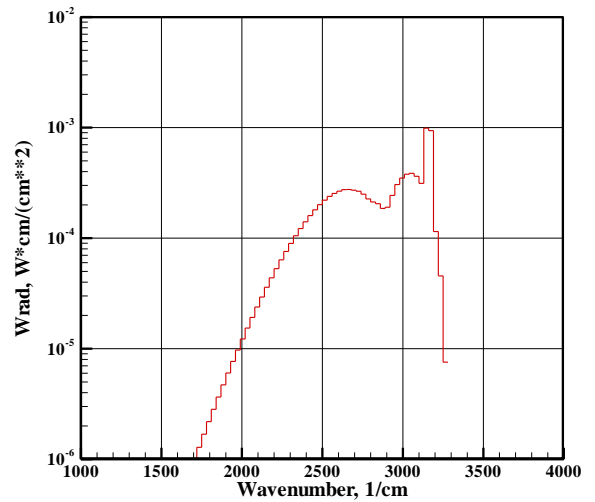


Рис. 6. Спектральные радиационные тепловые потоки в критической точке, Вт*см/(см²); $N_{\text{group}} = 100$

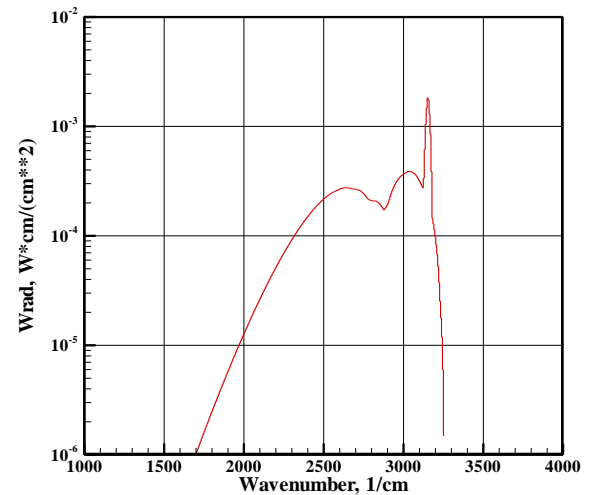


Рис. 7. Спектральные радиационные тепловые потоки в критической точке, Вт*см/(см²); $N_{\text{group}} = 500$

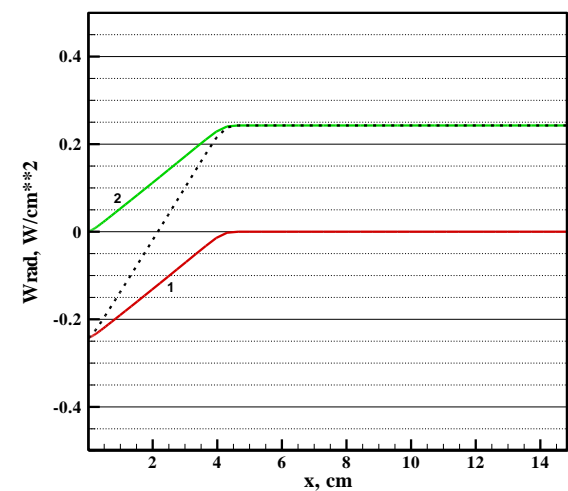


Рис. 8. Распределение односторонних интегральных радиационных тепловых потоков вдоль линии торможения, Вт/см²; $N_{\text{group}} = 10$; 1 – M_1^+ , 2 – M_1^- ; пунктирная линия – полный интегральный радиационный тепловой поток

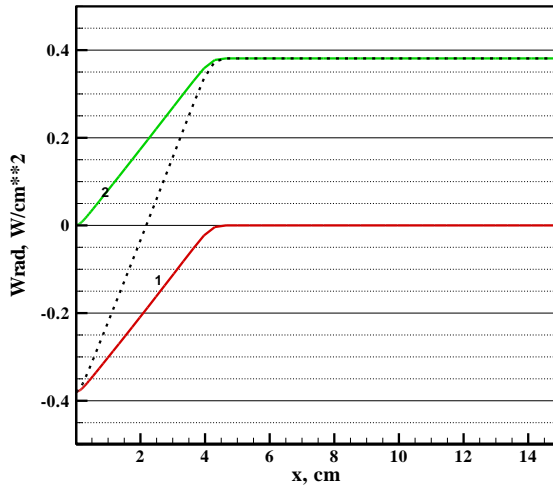


Рис. 9. Распределение односторонних интегральных радиационных тепловых потоков вдоль линии торможения, Вт/см²; $N_{\text{group}} = 37$; 1 – M_1^- , 2 – M_1^+ ; пунктирная линия – полный интегральный радиационный тепловой поток

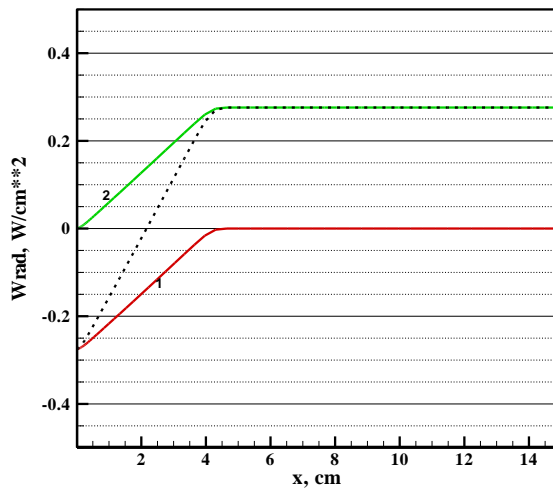


Рис. 10. Распределение односторонних интегральных радиационных тепловых потоков вдоль линии торможения, Вт/см²; $N_{\text{group}} = 100$; 1 – M_1^- , 2 – M_1^+ ; пунктирная линия – полный интегральный радиационный тепловой поток

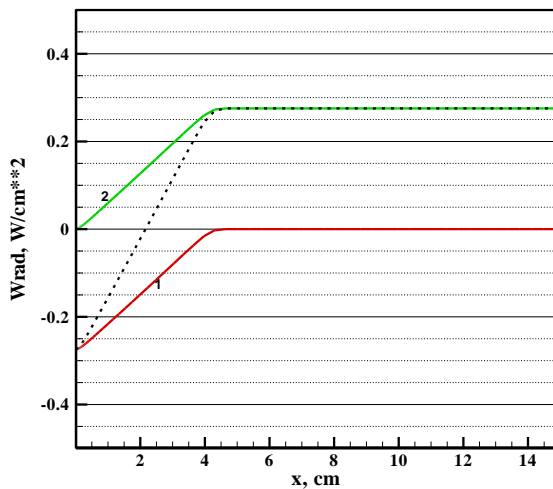


Рис. 11. Распределение односторонних интегральных радиационных тепловых потоков вдоль линии торможения, Вт/см²; $N_{\text{group}} = 500$; 1 – M_1^- , 2 – M_1^+ ; пунктирная линия – полный интегральный радиационный тепловой поток

В случае 37 спектральных групп достаточно грубое усреднение интенсивности излучения в окрестности 3150 см⁻¹ приводит примерно к полутора кратному превышению радиационных тепловых потоков на поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение заметим, что в перспективе следует сформулировать тестовую задачу расчета неравновесного излучения сжатого слоя в условиях марсианского входа. На рис. 12 показано типичное распределение поступательной и колебательных температур вдоль критической линии тока, полученные в расчетах [1] второй тестовой точки: $\rho_{\infty} = 2.93 \times 10^{-7}$ г/см³, $p_{\infty} = 78.7$ эрг/см³, $V_{\infty} = 5.223$ км/с, $T_{\infty} = 150$ К. Хорошо видна сильная температурная неравновесность во фронте ударной волны, влияние которой на спектральную и интегральную излучательные способности предстоит исследовать.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований РАН.

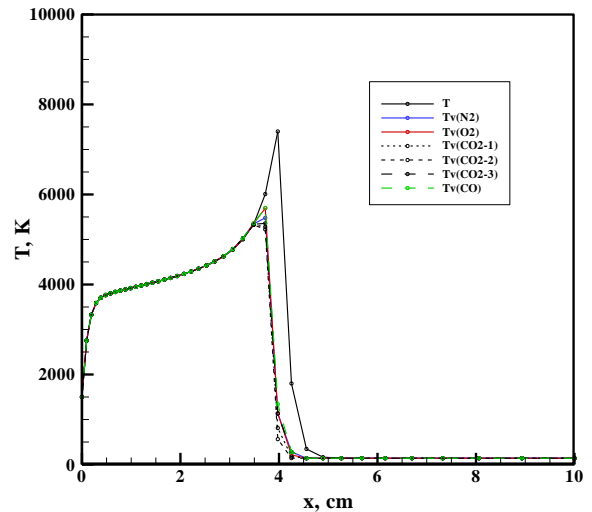


Рис. 12. Распределение поступательной и колебательных температур вдоль критической линии тока, полученные в расчетах [1] второй тестовой точки

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ρ – плотность, г/см³;
- p – давление, эрг/см³;
- V – скорость набегающего потока;
- N_{group} – число учитываемых спектральных групп.

Индексы:

- ∞ – условия в набегающем потоке

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Surzhikov S.T. Convective and Radiative Heating of MSRO Predicted by Different Kinetic Models//2nd International Workshop on Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry. 6-8 September 2006. Rome. Italy. Second Radiation Workshop. 2006. ESA SP-629. 13 p.
2. Surzhikov S.T., Omary P. MSRO convective and radiative heating //AIAA Paper 08-1274. 2008. 43 p.

3. Gromov V.G., Surzhikov S.T., Charbonnier J.-M. Convective and Radiative Heating of a Martian Space Vehicle Base Surface. Proceeding of the 4th European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles. 15-18 Oct. 2001. Capua, Italy. ESA SP-487. 2002. Pp. 265–269.
4. Суржиков С.Т. Радиационная газовая динамика марсианских космических аппаратов // Доклады академии наук. 2012. Т.443. № 1. С.6.
5. Суржиков С.Т. Радиационно-конвективный теплообмен космического аппарата сферической формы в углекислом газе // ТВТ. 2011. Т.49. № 1. С.92–107.
6. Суржиков С.Т. Трехмерная радиационно-газодинамическая модель аэрофизики спускаемых космических аппаратов. В кн.: Актуальные проблемы механики. Физико-химическая механика жидкостей и газов. Под ред. С.Т. Суржикова. М.: Наука. 2010. С. 25–124.
7. Суржиков С.Т. Расчет обтекания модели космического аппарата MSRO с использованием кодов NERAT-2D и NERAT-3D // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-003.pdf>
8. Суржиков С.Т. Трехмерная вычислительная модель аэротермодинамики спускаемых космических аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-002.pdf>